



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PABLO LUCIAN CARDOSO DE AZEVÊDO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DO TIPO FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DO USO DE TECNOLOGIAS
SEM FIO E DISPOSITIVOS PLANARES

MOSSORÓ - RN

2020

PABLO LUCIAN CARDOSO DE AZEVÊDO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DO TIPO FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DO USO DE TECNOLOGIAS
SEM FIO E DISPOSITIVOS PLANARES

Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e
Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Humberto Dionisio De
Andrade

Coorientador: Prof. Dr. José Lucas Da Silva
Paiva

MOSSORÓ - RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C994d Cardoso de Azevêdo, Pablo Lucian.
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
COMUNICAÇÃO PARA MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DE
UM SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DO TIPO
FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DO USO DE TECNOLOGIAS SEM FIO
E DISPOSITIVOS PLANARES / Pablo Lucian Cardoso
de Azevêdo. - 2020.
188 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio De Andrade.
Coorientador: José Lucas Da Silva Paiva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2020.

1. Telemetria. 2. Antena impressa. 3. Yagi-
Uda. 4. Quase-Yagi. 5. Sistema de comunicação. I.
Dionísio De Andrade, Humberto, orient. II. Da
Silva Paiva, José Lucas, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PABLO LUCIAN CARDOSO DE AZEVÊDO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO PARA
MONITORAMENTO DAS VARIÁVEIS DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA DO TIPO FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DO USO DE TECNOLOGIAS
SEM FIO E DISPOSITIVOS PLANARES

Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e
Eletromagnetismo Aplicado

Defendida em: 31/07/2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade - Presidente e orientador (UFERSA – Videoconferência)



Prof. Dr. José Lucas da Silva Paiva – Coorientador (UFERSA – Videoconferência),



Prof. Dr. Edwin Luiz Ferreira Barreto – Membro interno (UFERSA – Videoconferência)



Prof. Dr. Eliel Poggi dos Santos – Membro externo (UFT – Videoconferência)



Prof. Dr. Jonathan Paulo Pinheiro Pereira - Membro externo (IFRN – Videoconferência)

Severina Amâncio de Azevêdo (In Memoriam).
Pedro Martins Azevêdo (In Memoriam).
Sebastião Cardoso dos Santos (In Memoriam).

Rita de Cassia Cardoso Andrade de Azevêdo
Francisco de Assis Azevêdo
Alzenira Andrade de Freitas

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que contribuíram infinitamente para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje, sou grato à educação que eles me deram. Obrigado pelo grande exemplo de vida.

A meu orientador Profº Dr. Humberto Dionísio de Andrade e ao meu coorientador Profº Dr. José Lucas da Silva Paiva, pela orientação, dedicação, comprometimento, apoio e sugestões, tornando possível a realização deste trabalho e aos demais membros da banca. O meu muito obrigado.

Enfim, a todos que contribuíram de uma forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”.

Isaac Newton

RESUMO

Com o crescente aumento de usinas solares fotovoltaicas, faz-se necessário meios de obtenção de variáveis correlacionados a sua capacidade de geração e meios para a transmissão desses dados obtidos. Para esse trabalho será desenvolvido uma plataforma de comunicação para obtenção, armazenamento e transmissão dos parâmetros de um sistema de geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica, tais como níveis de radiação solar e temperatura de operação nos painéis solares da usina Mossoró II instalada na Universidade Federal Rural do Semiárido. No decorrer do trabalho será demonstrado o projeto do protótipo, que será dividido em duas etapas: uma voltada para aquisição desses parâmetros e outra para o sistema de comunicação onde ocorrerá a transmissão dos dados via rádio frequência. Para esse estudo será utilizado a plataforma de prototipagem arduino, responsável pela interconexão das partes de aquisição de dados e transmissão por meio de rádio frequência. Para o envio dos dados foi adotado o transceptor NRF24L01 cujo a frequência de operação está dentro da faixa ISM 2,4 GHz, com isso foi projetada uma antena do tipo Yagi planar. Os resultados das simulações foram obtidos por meio da utilização do *software* ANSYS HFSS®. Os resultados das simulações atingiram as características da aplicação, pois a perda de retorno da antena apresentou conformidade com a faixa da frequência do transceptor, em relação a características de radiação a antenas teve diagrama de radiação direcional e um ganho de aproximadamente 8,71 dB. O comportamento da perda de retorno obtido por meio da medição da antena construída foi similar em valores e em seu comportamento, porém com um leve deslocamento da frequência de ressonância, que a níveis práticos não interferem para essa aplicação da antena. Após isso, a antena foi implementada no transceptor realizando teste de alcance a fim de averiguar a comunicação dos dispositivos, apresentando um resultado satisfatório, desse modo o sistema foi implementado e os parâmetros influenciadores de um sistema fotovoltaico foram adquiridos.

Palavras-chave: Telemetria, Antena impressa, Yagi-Uda, Quase-Yagi, Sistema de comunicação, Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

With the growing increase in solar photovoltaic plants, it becomes necessary to obtain variables related to their generation capacity and to transmit these data. For this work, a communication platform will be developed to obtain, store and transmit the parameters of an electricity generation system using photovoltaic solar energy, such as solar radiation levels and operating temperature in the solar panels of the Mossoró II plant installed at the Federal Rural University of Semiarid. During the work, the prototype project will be demonstrated, which will be divided into two stages, one focused on the acquisition of these parameters and the other for the communication system where data transmission via radio frequency will occur. For this study, the Arduino prototyping platform will be used, responsible for the interconnection of the parts of data acquisition and transmission through radio frequency. To send the data, the NRF24L01 transceiver was adopted, whose operating frequency is within the 2.4 GHz ISM band, with which a planar Yagi antenna was designed. The results of the simulations were obtained using the ANSYS HFSS® software. The results of the simulations reached the characteristics of the application, since the loss of return of the antenna presented conformity with the frequency range of the transceiver, in relation to radiation characteristics the antennas had directional radiation diagram and a gain of approximately 8.71 dB. The experimental result of the loss of return was in accordance with the values and behavior, but with a slight shift in the resonance frequency, which at practical levels does not interfere with anything in the application of the antenna. After that, the antenna was implemented in the transceiver performing a range test in order to verify the communication of the devices, presenting a satisfactory result, in this way the system was implemented and acquired the influencing parameters of a solar photovoltaic system.

Keywords: Telemetry, Printed antenna, Yagi-Uda, Quasi-Yagi, Communication system, Photovoltaic solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Experimento de Hertz.	26
Figura 2: Aplicações das antenas.....	27
Figura 3: Antena filamentos: (a) Dipolo e (b) Helicoidal.....	28
Figura 4: Antenas cornetas: (a) Setorial, (b) Piramidal e (c) Cônica.	29
Figura 5: Antena refletora: (a) Alimentação frontal, (b) Alimentação Cassegrain.	30
Figura 6: Antena Yagi-Uda.	31
Figura 7: Arranjo planar 4x4 de microfita.....	31
Figura 8: Funcionamento da antena com lente dielétrica.	32
Figura 9: Antena de microfita com patch retangular: (a) Vista de cima, (b) Vista lateral e (c) Vista posterior.	33
Figura 10: Antena Yagi-Uda.	34
Figura 11: Diagrama de radiação de uma antena Yagi-Uda: (a) Diagrama Horizontal, (b) Diagrama Vertical.....	35
Figura 12: Diagrama geral do sistema de telemetria comandado pelo CCO.....	36
Figura 13: Curvas para correção do comprimento dos elementos parasitas da antena Yagi-Uda.	39
Figura 14: Diagrama esquemático da antena Yagi-Uda planar alimentada com microfita.....	41
Figura 15: Antena Yagi-Uda planar.	41
Figura 16: Representação de balun sem núcleo, feito com cabo coaxial.	44
Figura 17: Balun uniplanar e CPS	45
Figura 18: Diagrama de irradiação de um dipolo.	46
Figura 19: Diagrama de radiação 2D em sua forma retangular e seus lóbulos.	46
Figura 20: Diagrama de radiação e seu ângulo de meia potência.	47
Figura 21: Diagrama de radiação de uma antena e sua relação frente-costa.....	48
Figura 22: Conjunto de Círculos: (a) Resistivos e (b) Reatância.	52
Figura 23: Ilustração de uma Carta de Smith.	52
Figura 24: Gráfico de perda de retorno em função da frequência.	53
Figura 25: Onda plana circularmente polarizada.....	55
Figura 26: Polarização elíptica.	55
Figura 27: Polarização: (a) Linear, (b) Circular e (c) Elíptica.....	57
Figura 28: Densidade de corrente em uma antena de microfita com patch retangular.	59
Figura 29: Representação do efeito fotoelétrico em uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.....	60
Figura 30: Capacidade instalada de energia renovável no mundo no ano de 2019.....	61
Figura 31: Potência instalada no mundo.....	62
Figura 32: Países com maior capacidade instalada de sistemas solares fotovoltaicos.	63
Figura 33: Percentual da potência instalada de cada região.	65
Figura 34: Percentual da potência instalada de cada estado.	66
Figura 35: Potência instalada de sistemas fotovoltaicos no Rio Grande do Norte em função do ano.	67
Figura 36: Mapa do Rio Grande do Norte com os sistemas de energia solar conectados à rede.	68

Figura 37: Imagem aérea da usina Mossoró II.	70
Figura 38: Distribuição espectral da radiação solar.....	71
Figura 39: Absorção e reflexão da irradiância na atmosfera da Terra.....	73
Figura 40: Irradiação horizontal global anual e diária em diferentes zonas do planeta Terra..	74
Figura 41: Transferência de calor do sistema fotovoltaico.....	75
Figura 42: Efeito da temperatura na curva característica da placa.	76
Figura 43: Espectro da irradiância e Espectro resposta.	77
Figura 44: Piranômetro LP02 da HUKSEFLUX.....	78
Figura 45:Piranômetro LI-200R da LI-COR.	79
Figura 46: Termovisor FLUKE TI9.	79
Figura 47: Sistema de geração distribuída.....	81
Figura 48: Processo para a participação dos sistemas de mini e microgeração distribuída.	82
Figura 49: Divisão do Espectro do Rádio.....	83
Figura 50: Componentes básicos de um rádio enlace ponto-a-ponto.....	85
Figura 51: Comportamento do sinal ao longo do percurso.	86
Figura 52: Principais mecanismos de propagação: (A) Refração das camadas Ionosféricas, (B) Refração das camadas Troposféricas, (C) Linha de visada e (D) Reflexões do terreno.	89
Figura 53: Tecnologias sem fio.	90
Figura 54: Bandas de frequência ISM utilizadas em redes WLAN (IEEE 802.11).	91
Figura 55: Componentes da arquitetura da rede.....	93
Figura 56: Sistema de telemetria aplicado a sistemas de geração de energia elétrica.....	96
Figura 57: Tipos de arduino.	97
Figura 58: Arduino MEGA2560.....	98
Figura 59: Do IDE para a execução.....	99
Figura 60: Tipos de Sensores: (a) Mecânicos, (b) Ultrassônico, (c) Indutivos, (d) Capacitivos, (e) Fotoelétricos.....	100
Figura 61: Atuadores: (a) Relé, (b) solenoide e (c) Contatores.....	101
Figura 62: Fotodiodo BPW34.....	102
Figura 63: Resposta espectral: (a) LDR e (b) fotodiodo.	102
Figura 64: Dallas ds18b20.....	103
Figura 65: Sensor de umidade e temperatura ambiente AM2301	104
Figura 66: Antena HyperLink HG24 12U-PRO.....	105
Figura 67: Antena Yagi-Uda CF917.	106
Figura 68: Antena Yagi-Uda comercial.....	107
Figura 69: Fonte de alimenta 12 V/24 V com bateria.	108
Figura 70: Sistema de alimentação por baterias e painéis solares.....	109
Figura 71: Fluxograma da metodologia utilizada.....	110
Figura 72: Circuito esquemático do piranômetro de fotodiodo.....	112
Figura 73: Projeto do Sensor de radiação	113
Figura 74: Usinagem da PCI.	113
Figura 75: Circuito do piranômetro de fotodiodo: (a) Frontal, (b) Posterior.	114
Figura 76: Sensor de radiação.	114
Figura 77: Piranômetro MES-100	115

Figura 78: Esquemático da ligação do Dallas DS18B20.	117
Figura 79: Esquemático do funcionamento do NRF24L01 com PA e LNA: (a) Transmissor e (b) Receptor.	119
Figura 80: NRF24L01 com PA e LNA.	119
Figura 81: Dimensões da Antena Yagi-Uda planar de 4 diretores.	120
Figura 82: Antena Yagi-Uda planar simulada no Ansys HFSS®.	121
Figura 83: Impressão da antena.	121
Figura 84: Conector SMA fêmea reto de quatro pinos.	122
Figura 85: Antena Yagi-uda planar construída.	122
Figura 86: Esquemático do teste: (a) Transmissão, (b) Recepção.	123
Figura 87: Garmin GPSMap 78s.	124
Figura 88: Teste de distância com a antena dipolo.	124
Figura 89: Teste de distância com a antena Yagi planar construída.	125
Figura 90: Local de instalação das antenas: (a) antena transmissora (b) antena receptora. ...	126
Figura 91: Visada do enlace de rádio CITED-USINA.	127
Figura 92: Esquema de ligação do circuito de transmissão.	128
Figura 93: PCI de transmissão: (a) Projeto, (b) Construída.	129
Figura 94: PCI de transmissão com os componentes instalados.	129
Figura 95: Esquema de ligação do circuito de recepção.	130
Figura 96: PCI de recepção: (a) Projeto, (b) Construída.	130
Figura 97: PCI de recepção com os componentes instalados.	131
Figura 98: Fluxograma do Algoritmo.	132
Figura 99: Esquemático do sistema de telemetria.	132
Figura 100: Local da instalação.	133
Figura 101: Caixa hermética.	133
Figura 102: Sensores de temperatura. (a) Disposição e (b) instalados.	134
Figura 103: local de instalação do sensor DHT21.	135
Figura 104: Estrutura de fixação do piranômetro de fotodiodo.	135
Figura 105: Placa solar para alimentação do sistema.	136
Figura 106: Regulador de tensão LM2596.	136
Figura 107: Sistema de baterias para alimentação.	137
Figura 108: Instalação do sistema e conexão dos sensores dentro da caixa hermética.	138
Figura 109: Locação de rádio enlace a 1680 metros.	139
Figura 110: Locação de rádio enlace a 170 metros.	139
Figura 111: Coeficiente de reflexão simulado da antena.	140
Figura 112: Diagrama de radiação linear.	141
Figura 113: Diagrama de radiação: (a) 2D polar (b) 3D.	142
Figura 114: Diagrama de radiação da antena Yagi planar.	142
Figura 115: Medição do S_{11} por meio do VNA.	143
Figura 116: Coeficiente de reflexão experimental e simulado.	144
Figura 117: Carta de Smith da antena construída.	144
Figura 118: Coeficiente de reflexão experimental e comercial.	145
Figura 119: Radiação solar em função dos bits e curva tendência.	146

Figura 120: Curva de radiação obtida pelo MES-100 no dia 02/07/2020.	147
Figura 121: Curva de radiação obtida pelo protótipo no dia 02/07/2020.	147
Figura 122: Sobreposição das curvas de radiação do MES-100 e protótipo.	148
Figura 123: Plataforma de monitoramento.	149
Figura 124: Radiação solar no dia 03/07/2020.	149
Figura 125: Temperatura ambiente no dia 03/07/2020.	150
Figura 126: Umidade relativa do ar no dia 03/07/2020.	150
Figura 127: Temperatura de operação do painel no dia 03/07/2020.	151
Figura 128: Radiação solar no dia 04/07/2020.	152
Figura 129: Temperatura ambiente no dia 04/07/2020.	152
Figura 130: Umidade relativa do ar no dia 04/07/2020.	153
Figura 131: Temperatura de operação do painel no dia 04/07/2020.	153
Figura 132: Radiação solar no dia 06/07/2020.	154
Figura 133: Temperatura ambiente no dia 06/07/2020.	155
Figura 134: Umidade relativa do ar no dia 06/07/2020.	155
Figura 135: Radiação solar no dia 08/07/2020.	156
Figura 136: Temperatura ambiente no dia 08/07/2020.	157
Figura 137: Umidade relativa do ar no dia 08/07/2020.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comprimentos otimizados de elementos parasitas para antenas Yagi-Uda de seis diferentes comprimentos.....	37
Tabela 2: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída e sua potência instalada por região.	64
Tabela 3: Unidades consumidoras com geração distribuída e sua potência instalada por estado.	66
Tabela 4: Usinas solares fotovoltaicas da UFERSA.	69
Tabela 5: Características gerais da usina solar Mossoró II.	70
Tabela 6: Características de temperatura.	75
Tabela 7: Protocolos IEEE 802.11.	93
Tabela 8: Endereçamento do Dallas DS18B20.	117

NOMECLATURA

Letras Latinas

BW	-	Largura de banda da antena
c	-	Velocidade da luz no vácuo
D	-	Diretividade
E	-	Intensidade de campo elétrico
f_c	-	Frequência central
f_{inf}	-	Frequência inferior
f_{sup}	-	Frequência superior
G	-	Ganho
H	-	Intensidade de campo Magnético
h	-	Espessura do substrato
I_{sc}	-	Coeficiente de temperatura
L_o	-	Comprimento da linha de microfita
P_e	-	Potência total fornecida (entrada)
P_m	-	Lóbulo principal
P_{max}	-	Coeficiente de temperatura
P_{pop}	-	Lóbulo posterior
RFC	-	Relação frente-costa
S	-	Vetor de Poynting (densidade de potência)
S_{11}	-	Coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo
$U_{máx}$	-	Intensidade de radiação máxima
V_{oc}	-	Coeficiente de temperatura
W	-	Largura do <i>patch</i>
W_0	-	Largura da linha de microfita
x	-	reatância normalizada da carga
Z	-	Impedância do transformador de um quarto de onda
Z_L	-	Impedância de carga
Z_0	-	Impedância característica da linha de transmissão
Z_E	-	Impedância de entrada da antena

Letras Gregas

Γ	-	Coeficiente de reflexão
β	-	Deslocamento de fase
ε	-	Permissividade elétrica complexa
ε'	-	Constante dielétrica
ε_0	-	Permissividade elétrica do vácuo
ε_r	-	Permissividade elétrica relativa do material
ε_{ref}	-	Permissividade elétrica efetiva
η_{rad}	-	Eficiência de radiação
η_{ref}	-	Eficiência de reflexão
η	-	Eficiência total
θ	-	Ângulo plano horizontal (azimutal)
λ	-	Comprimento de onda
λ_0	-	Comprimento de onda no espaço livre
τ	-	ângulo de inclinação
μ	-	Permeabilidade magnética
μ_0	-	Permeabilidade magnética do vácuo
φ	-	Ângulo plano vertical (elevação)

Siglas

ANATEL	-	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	-	<i>Access Point</i>
BAN	-	<i>Body Area Network</i>
BSS	-	<i>Basic Service Set</i>
CCC	-	Central de Comutação e Controle
CITED	-	Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semiárido
CNC	-	<i>Computer Numeric Control</i>
COSERN	-	Companhia Energética do Rio Grande do Norte

CPS	- <i>Coplanar Stripline</i>
CPU	- <i>Central Processing Unit</i>
DDP	- <i>Diferença de Potencial</i>
DS	- <i>Distribution System</i>
DSSS	- <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
EHF	- <i>Extremely High Frequency</i>
ERB	- <i>Estações Rádio Bases</i>
FHSS	- <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GA	- <i>Genetic Algorithm</i>
GAN	- <i>Global Area Network</i>
GMSK	- <i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GSM	- <i>Global System for Mobile Communications</i>
HF	- <i>High Frequency</i>
HFSS	- <i>High Frequency Structural Simulator</i>
HPBW	- <i>Half Power Beam Width</i>
ICSP	- <i>In Circuit Serial Programming</i>
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISM	- <i>Industrial, Scientific and medical</i>
LAN	- <i>Local Area Network</i>
LDR	- <i>Light Dependent Resistor</i>
LED	- <i>Light Emitting Diode</i>
LF	- <i>Low Frequency</i>
LNA	- <i>Low Noise Amplifier</i>
LTE	- <i>Long Term Evolution</i>
MF	- <i>Medium Frequency</i>
NBS	- <i>National Bureau of Standards</i>
OFDM	- <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PA	- <i>Power Amplifier</i>
PAN	- <i>Personal Area Network</i>
PCI	- <i>Placa de Circuito Impresso</i>
PDA	- <i>Assistente Pessoal Digital</i>

PSO	- <i>Particle Swarm Optimization</i>
PVC	- <i>Polyvinyl chloride</i>
RA	- Razão Axial
RF	- Radio frequência
RFC	- relação frente-costa
RFID	- <i>Radio Frequency IDentification</i>
RTC	- <i>Real Time Clock</i>
SHF	- <i>Super High Frequency</i>
SMA	- SubMiniature A
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i>
UFERSA	- Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UHF	- <i>Ultra High Frequency</i>
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
VHF	- <i>Very High Frequency</i>
VLF	- <i>Very Low Frequency</i>
VNA	- <i>Vector Network Analyzer</i>
WAN	- <i>Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. OBJETIVO GERAL	23
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3. MOTIVAÇÃO	24
2. ANTENAS	25
2.1. TIPOS DE ANTENAS	27
2.1.1. Antenas filamentosas.....	28
2.1.2. Antenas de abertura.....	29
2.1.3. Antenas refletoras.....	29
2.1.4. Arranjo de antenas.....	30
2.1.5. Antenas de lente.....	32
2.1.6. Antenas planares	32
2.2. ANTENA YAGI-UDA.....	33
2.2.1. Projeto de Yagi-Uda por meio da norma técnica NBS 688.....	36
2.2.2. Aplicações e Tendências com Yagi-Uda.	39
2.2.3. Yagi-Uda Planar	40
2.3. PARÂMETROS DE ANTENAS	45
2.3.1. Diagrama de Radiação	45
2.3.2. Relação Frente-Costa	47
2.3.3. Diretividade.....	48
2.3.4. Eficiência	49
2.3.5. Ganho	50
2.3.6. Carta de Smith.....	50
2.3.7. Perda de retorno e Largura de banda	53
2.3.6. Polarização	54
2.3.7. Densidade de corrente.....	57
3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	60
3.1. PANORAMA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO NO MUNDO	61
3.1.1. Brasil.....	63
3.1.2. Energia Solar Fotovoltaica no Nordeste e Rio Grande do Norte.....	65
3.2. USINAS SOLARES DA UFERSA	68
3.2.1. A usina de estudo (Mossoró II).....	69
3.3. PARÂMETROS INFLUENCIADORES NA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA	71

3.3.1. Radiação Solar	71
3.3.2. Temperatura de operação de placas solares fotovoltaicas.....	74
3.4. SISTEMAS CLÁSSICOS DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS SOLARES	76
3.4.1. Piranômetro	77
3.4.2. Termômetro Infravermelho com Termovisor	79
3.5. SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICO	80
4. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO.....	83
4.1. SISTEMA DE RÁDIO ENLACE	84
4.2. SISTEMAS DE VISADA DIRETA.....	87
4.3. TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO	89
4.3.1. Rede Sem Fio – WLAN.....	91
4.3.2. PADRÃO IEEE 802.11	92
5. PLATAFORMA, SENSORES / ATUADORES UTILIZADOS PARA TELEMETRIA	95
5.1. FERRAMENTAS DE PROTOTIPAGEM – ARDUINO	96
5.1.1. <i>Hardware</i>	97
5.1.2. <i>Software</i>	99
5.2. SENSORES E ATUADORES	100
5.2.1. Radiação Solar.....	101
5.2.2. Temperatura.....	103
5.2.3. Umidade e Temperatura Ambiente	103
5.3. ANTENAS PARA TELEMETRIA.....	105
5.3.1. Antena comercial.....	106
5.4. FONTE DE ENERGIA	107
6. METODOLOGIA.....	110
6.1. AQUISIÇÃO DE DADOS	111
6.1.1. Radiação Solar Global	112
6.1.2. Temperatura Ambiente e umidade relativa do ar.....	116
6.1.3. Temperatura de operação dos painéis solares	116
6.2. TRANSMISSÃO DE DADOS	118
6.2.1. O transceptor NRF24L01	118
6.2.2. Antena Yagi-Uda Planar.....	119
6.2.3. Teste de comunicação e distância.....	122
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	140
7.1. ANÁLISE DA ANTENA PROPOSTA	140

7.1.1. Resultados Computacionais.....	140
7.1.2. Resultados Experimentais.....	143
7.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	145
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	158
REFERÊNCIAS	160

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação possuíam a característica de restrição aos ambientes confinados, limitando o acesso a comunicação as pessoas a esses ambientes. Posterior ao desenvolvimento e popularização das redes de comunicação sem fio (*wireless*), a restrição e limitação a comunicação, foram substituídas por mobilidade e flexibilidade, possibilitando a comunicação indiferente a sua localização. Decorrente de alta aplicabilidade e surgimento de diferentes tecnologias *wireless*, como *GSM*, *bluetooth*, *WiMAX* e *Wi-Fi* é que se tem uma busca por novas tecnologias no segmento, como novos transmissores mais eficientes, compactos e leves, também melhoramento e desenvolvendo de antenas para uma melhor aplicabilidade, permitindo assim uma melhor integração nos equipamentos dos sistemas de comunicação, pois no novo mundo sem fios as antenas são onipresentes (EURAAP, 2018).

Quando aplicadas em sistemas embarcados as antenas do tipo impressas (planares) apresentam algumas vantagens em relação as antenas tradicionais, no ponto de vista financeiro e construtivos, pois se trata de uma antena de baixo custo para sua fabricação, tem volume e peso reduzido facilitando o embarque em dentro de equipamentos ou até mesmo na própria placa do circuito do equipamento sendo ainda de fácil construção. É possível fazer uma conversão de alguns tipos de antenas já difundidas na literatura para antenas impressas, a exemplo a antena dipolo e a do tipo Yagi-Uda, sendo possível combinar características das antenas originais como a diretividade de uma antena Yagi-Uda com o perfil baixo de uma antena planar (QIAN; KANEDA, 1998). Antenas essas aplicadas a sistemas de telemetria e supervisórios dos mais diversos tipos, dentre esses são supervisórios em sistemas de geração de energia elétrica a exemplo um sistema de geração solar fotovoltaico.

Devido com o crescente aumento da utilização de sistema de geração distribuída por meio de energia solar fotovoltaica, faz-se necessário a busca por novas maneiras de se obter parâmetros desse sistema não somente os parâmetros adquiridos pelo inversor, mas parâmetros que influencia diretamente e indiretamente na geração solar fotovoltaico. Isso possibilita um comparativo para constatar se o sistema de geração está trabalhando como esperado ou tem algum problema, a exemplo se a curva de potência instalada instantânea estar com o comportamento semelhante a curva de radiação diária (MOURA, 2009). Outro exemplo é a verificação temperatura de operação dos painéis que interfere diretamente na produção de energia (BELTRÃO, 2008). com esse dado em mãos, facilitando a toma de decisões, para possíveis manutenções.

Essa dissertação está organizada em oito capítulos da seguinte forma:

- O capítulo 2 demonstra os conceitos e definições sobre antenas, os tipos e parâmetros básicos das antenas. Também é dada uma ênfase na antena Yagi-Uda em sua forma convencional e planar.
- No capítulo 3 tem-se conceitos sobre a energia solar fotovoltaica e os parâmetros que influenciam de forma direta e indireta a sua geração, além disso, também se tem dados de sua participação na matriz energética mundial, nacional e estadual, demonstrando também as usinas solares instaladas na UFERSA.
- Por meio do capítulo 4 é possível ver conceitos sobre sistemas de comunicação sem fio.
- No capítulo 5 traz conceitos e exemplificações de plataformas, sensores/atuadores utilizados para telemetria.
- O capítulo 6 demonstra toda a metodologia e materiais utilizados nessa dissertação e como foi organizado o passo a passo para elaboração de cada estágio da metodologia.
- No sétimo capítulo são expostos os resultados obtidos com a metodologia utilizada, demonstrados resultados dos parâmetros das antenas e dos resultados obtidos com sistema.
- E por fim, no capítulo 8 as considerações finais sobre todo o processo descrito nessa dissertação.

1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma plataforma de comunicação para o monitoramento de parâmetros que influenciam diretamente e indiretamente na geração solar fotovoltaica.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho serão demonstrados para uma melhor compreensão:

- Efetuar estudo acerca de sistemas de telemetria;

- Desempenhar estudo sobre antenas yagi-uda tradicional e planar;
- Projetar, simular e construir uma antena Yagi-Uda planar;
- Projetar e desenvolver *hardware* capaz de realizar a aquisição de parâmetros influenciadores na geração fotovoltaica e enviar via rádio frequência;
- Analisar os parâmetros da antena Yagi-Uda planar construída;
- Realizar coleta de dados que influenciam na geração solar fotovoltaico por meio do sistema de telemetria desenvolvido.

1.3. MOTIVAÇÃO

Para a área da engenharia se faz necessário a obtenção de parâmetros com exatidão possibilitando a elaboração de projetos, projeções e proteger os sistemas. Parâmetros esses obtidos pelos mais diversos sistemas de medição e sensores. Mesmo obtendo os parâmetros corretos a serem medidos com os melhores sensores, a diferença de tempo entre a obtenção desses parâmetros e visualização dos mesmos e constatação de um possível problema, podem ser cruciais para tomadas de decisões em sistemas de potência ou plantas industriais. Com isso se faz importante a implementação de um dispositivo de comunicação em diversos sistemas de medição, como exemplo usinas solares fotovoltaicas.

2. ANTENAS

Uma antena pode ser definida segundo o IEEE (1973) como sendo o meio que a onda eletromagnética é radiada para o espaço livre ou captada. Podendo ser aplicado em sistemas de comunicação, telemetria e radar, onde é o elemento que desempenha o papel responsável pela transferência do sinal gerado pelo transmissor para o espaço livre, ou o inverso, captando um sinal do espaço livre.

O surgimento da teoria de antenas se deu após a unificação das teorias de magnetismo e eletricidade, por meio das equações denominadas equações de Maxwell, elaboradas pelo físico e matemático James Clerk Maxwell publicadas em 1873, quando ele provou matematicamente que os impulsos elétricos viajava pelo espaço em forma de onda, sendo isso possível decorrente da junção dos trabalhos produzidos por Michael Faraday, André-Marie Ampère e Johann Carl Friedrich Gauss, onde demonstrou matematicamente que todo conhecimento adquirido até o momento sobre eletromagnetismo poderia ser descritas por quatro equações. Onde a Equação 1 representa a Lei de Gauss para o Magnetismo, Equação 2 a Lei da indução de Faraday, Equação 3 descreve a Lei de Gauss e Equação 4 refere-se a Lei de Ampère (ALENCAR; QUEIROZ, 2010).

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

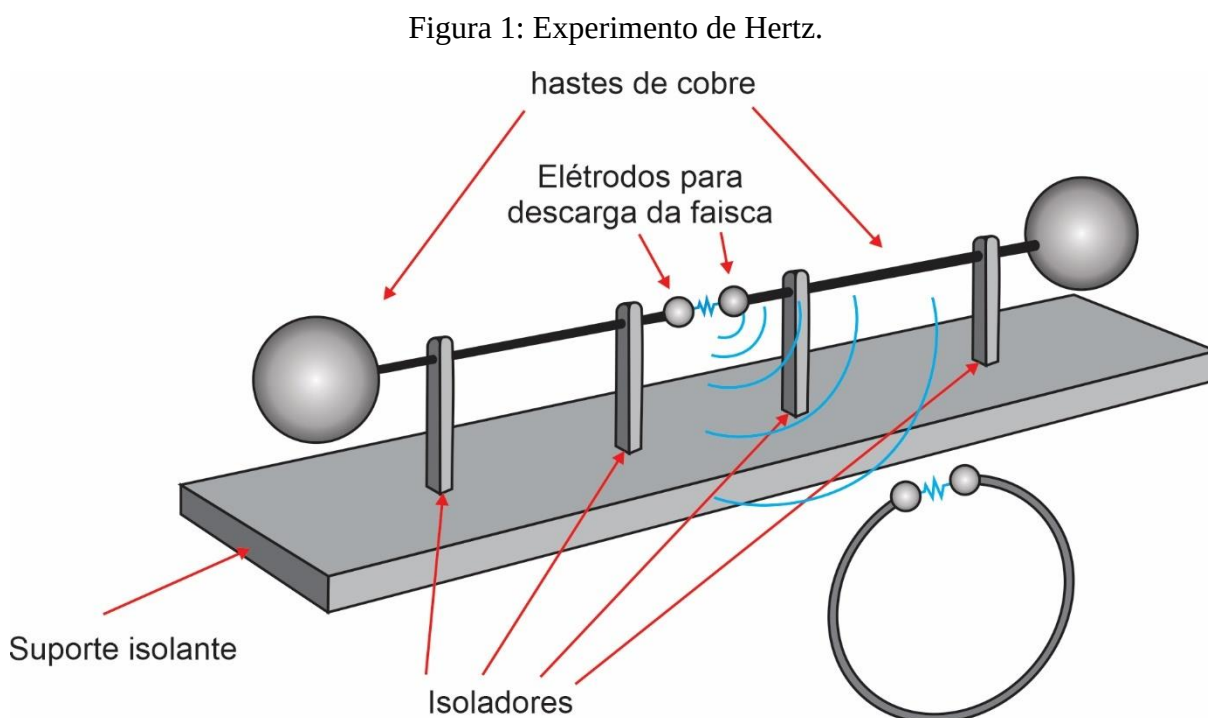
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (4)$$

Posterior as equações de Maxwell teve-se a confirmação da existência das onda eletromagnéticas por meio dos experimentos feitos pelo físico Heinrich Hertz que fazendo uso da teoria de Maxwell conseguiu a primeira transmissão de rádio, onde seu experimento consistia em um sistema que gerava uma fagulha, oscilando em uma determinada frequência, sendo que essa fagulha gerava um onda eletromagnética com a mesmas frequência que a fagulha oscilava, após isso colocou um cabo em forma de anel com isso essa onda eletromagnética induzia uma

fagulha em um cabo em forma de anel que tinha uma abertura quando aproximou do oscilador notou que uma faísca saltou na abertura do anel, com isso provando a existência de ondas eletromagnéticas afirmadas por Maxwell (TOLEDO, 2018). A Figura 1 ilustra o experimento feito por Hertz, sendo possível visualizar pela ilustração as hastes de cobre que transmitem a energia até os eletrodos onde é gerada a centelha e o cabo em formato de anel com uma pequena abertura, sendo nessa abertura responsável pela visualização da centelha induzida.

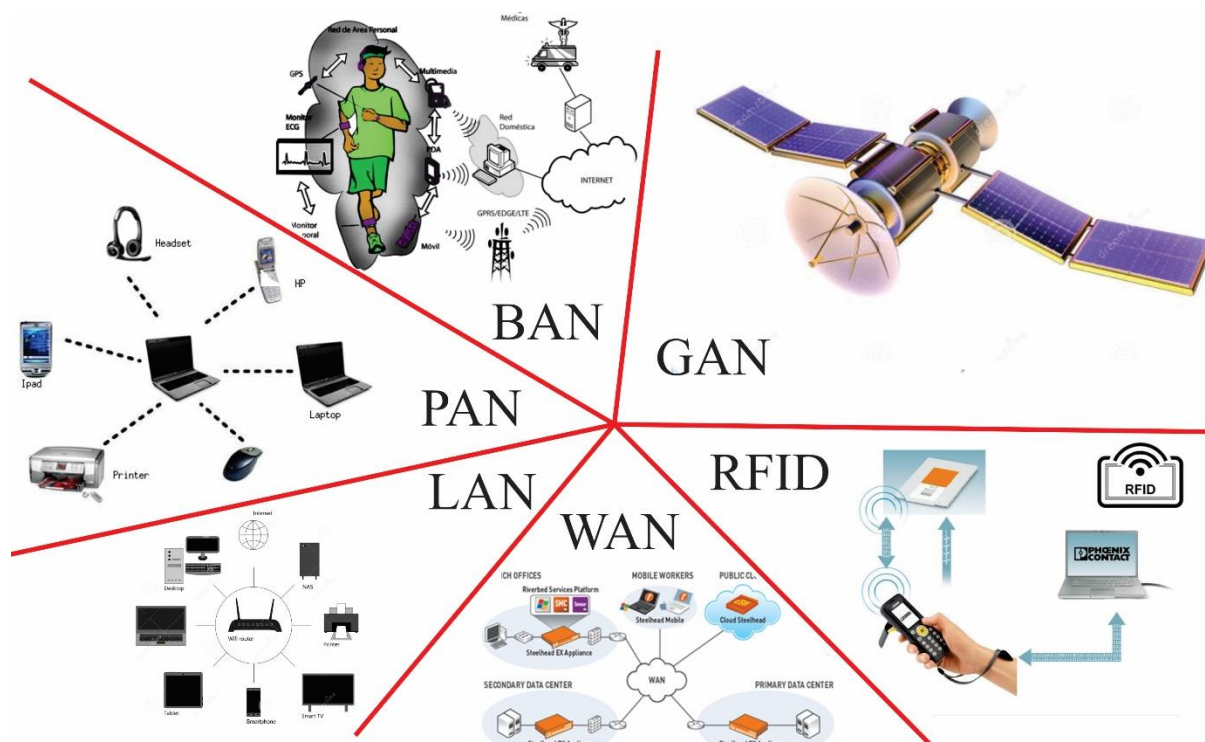


Fonte: Adaptado de TOLEDO, 2018.

Após a comprovação da existência das ondas eletromagnéticas descritas por Maxwell por meio do experimento de Hertz passando pela primeira transmissão transatlântica feita por Marconi, as antenas evoluíram, deixaram de ser somente um fio metálico e passaram ter diversas formas e diversas matérias. Com as mais distintas aplicações as antenas são fundamentais para as mais múltiplas aplicações de serviços emergentes a exemplo navegação, redes sem fio, aeronáutica e espacial, segurança e saúde, com isso as antenas se tornam praticamente onipresentes. Assim as redes que as antenas são aplicadas são: *RFID* (*Radio Frequency IDentification*) são referidos a sistemas de identificação de objetos por radiofrequência, *GAN* (*Global Area Network*) que é a junção de várias *WANs* sendo uma rede a nível global, *WAN* (*Wide Area Network*) é uma rede a nível de país ou continente, *LAN* (*Local Area Network*) é considerado uma rede local até a abrangência de um edifício ou uma área até

10 Km, PAN (*Personal Area Network*) comunicação entre dispositivos ao alcance de uma pessoa e BAN (*Body Area Network*) referida como rede sem fio da área do corpo que pode ser um sistema de monitoramento voltado para a área de saúde (EURAAP, 2018). A Figura 2 ilustra exemplos de aplicações das antenas separando por abrangências espaciais.

Figura 2: Aplicações das antenas.



Fonte: Adaptado de EURAAP, 2018.

Para suprir essas aplicações se faz necessário antenas que se adequem as características e peculiaridades de suas aplicações. É nesse ponto que o estudo acerca das antenas contribui, pois, trazendo melhorias e desenvolvendo novos tipos de antenas de acordo com a necessidade do sistema em que ela será embarcada. Assim os principais tipos de antenas serão apresentados no tópico seguinte demonstrando suas principais características.

2.1. TIPOS DE ANTENAS

Com uma grande diversidade de tipos de antenas, sendo possível ser agrupadas como as antenas do tipo filamentosares, de abertura, microfita, refletoras, arranjos de antenas, de lente e planares.

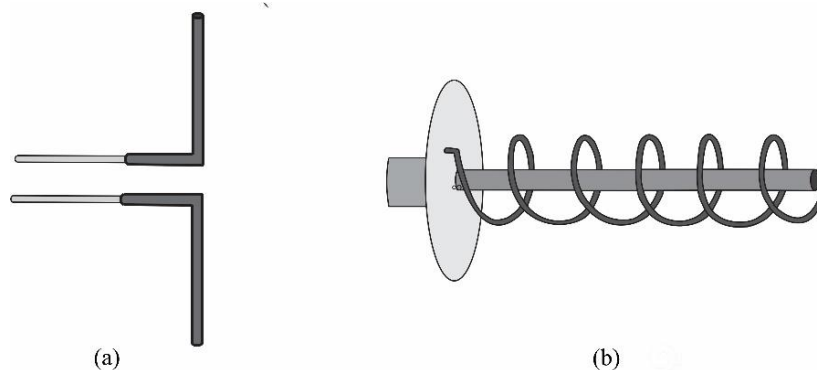
2.1.1. Antenas filamentosas

Sendo a antena filamentar o tipo mais comum, por ser simples e versátil em suas aplicações, dentre elas as principais são: dipolo e helicoidais.

Os dipolos são antenas lineares, seu comprimento total é proporcional ao comprimento de onda radiado, estando correlacionado diretamente com a frequência de operação. Os tipos de dipolo mais conhecidos são o dipolo de meia onda ($\lambda/2$) e um quarto de onda ($\lambda/4$), dentre suas características estão diagrama de radiação omnidirecional e polarização linear (vertical ou horizontal). O dipolo de meio comprimento de onda é formado por duas hastes condutoras, alimentadas por uma linha de transmissão localizada no centro, sendo que cada haste tem o comprimento de $\lambda/4$, assim tendo o comprimento total de $\lambda/2$, como é demonstrado na Figura 3 (a) (FRENZEL, 2013).

Construídas em formas de hélices ou espiras, as antenas helicoidais com um ou múltiplos condutores, comumente com polarização circular, permitem gerar uma onda que se desloca no espaço na forma de espiral. Suas espiras podem ser nos formatos circulares, retangulares ou quadradas, sendo a mais comum a circular decorrente da facilidade em sua construção, onde seu núcleo pode ser de ar ou ferrite. As dimensões da antena como: diâmetro da helicóide e o espaçamento entre as espiras, estão ligadas a seu comprimento de onda. Estas antenas são comumente aplicadas em sistemas de navegação por satélite. Por meio da Figura 3 (b) é possível ver uma representação de uma antena helicoidal (FUSCO, 2006).

Figura 3: Antena filamentosas: (a) Dipolo e (b) Helicoidal.

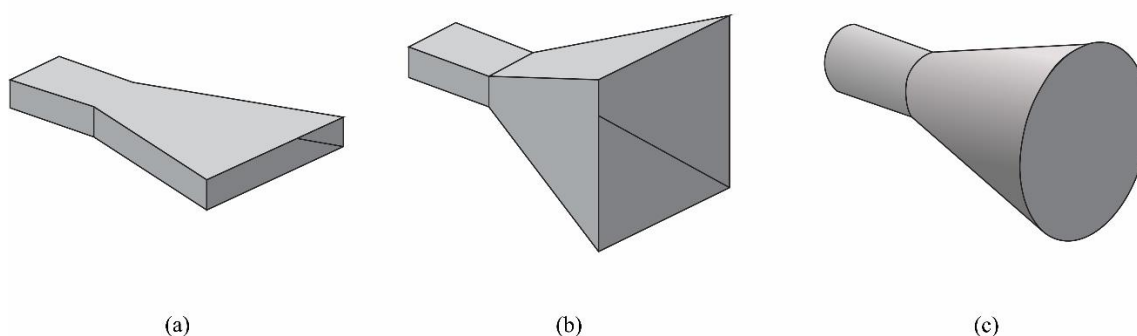


Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

2.1.2. Antenas de abertura

Inseridas entre a extremidade de um guia de onda e o espaço livre, as antenas de abertura são antenas comumente utilizadas para sistemas de alta frequência, alimentadas por um guia de onda, instaladas de forma que seja obtido o casamento de impedância. Como sendo uma de suas principais características diagrama de radiação diretivo e alto ganho, suas dimensões estão ligadas diretamente a faixa de frequências que opera. Na Figura 4 é possível ver os principais tipos de antenas de abertura, sendo respectivamente (a) antena setorial, (b) piramidal e (c) cônica. (FRENZEL, 2013).

Figura 4: Antenas cornetas: (a) Setorial, (b) Piramidal e (c) Cônica.



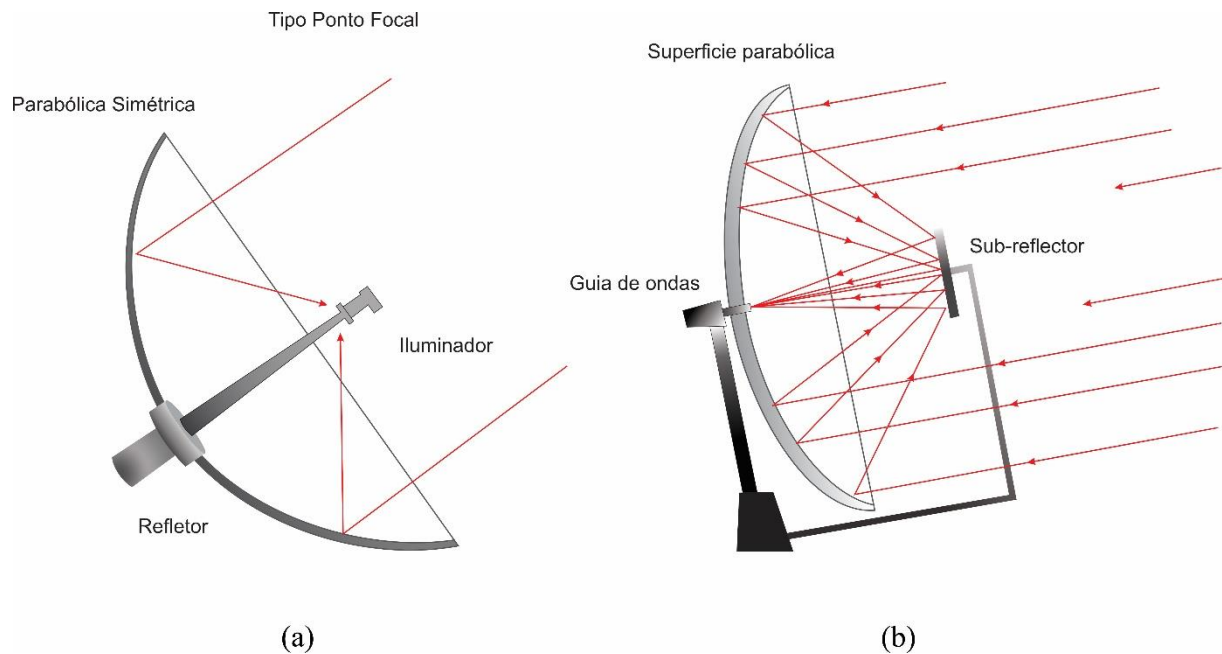
Fonte: Adaptado de Balanis, 2005.

2.1.3. Antenas refletoras

As antenas refletoras são constituídas por um refletor parabólico cujo a finalidade é concentrar os feixes das ondas eletromagnéticas em um ponto focal, direcionando a propagação do sinal em um determinado sentido. Sendo normalmente utilizadas para aplicações em sistema de radiotelescópios, radares e comunicações via satélite. Tratando de uma antena que tem como uma de suas características diagrama de radiação direcional, assim com uma relação frente-costa elevado, consequentemente elevando o seu ganho e diretividade. Tendo diversas configurações tais como antena refletora com alimentação frontal demonstrada na Figura 5 (a) sendo a mais comum contendo um refletor parabólico que direciona todo o sinal recebido para o foco iluminador que segura a corneta corrugada, corneta corrugada que guia os sinais emitidos

pelo refletor até o dipolo e polo rotor que altera a polarização do dipolo entre vertical e horizontal. Outra configuração desse tipo de antena é a do tipo Cassegrain demonstrado na Figura 5 (b), que tendo como principal diferença a utilização de um sub-refletor, onde o sinal refletido duas vezes, sendo uma pelo refletor principal e outra pelo sub-refletor focando no guia de onda localizado atrás da antena, sendo esse ponto vazado para que possibilite a recepção do sinal (CARVALHO; BADINHAN, 2011).

Figura 5: Antena refletora: (a) Alimentação frontal, (b) Alimentação Cassegrain.



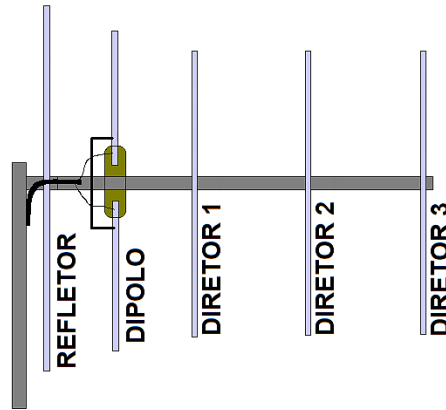
Fonte: Adaptado de CARVALHO; BADINHAN, 2011.

2.1.4. Arranjo de antenas

Com a finalidade de suprir determinadas características de radiação que não é possível com uso de somente um elemento, assim com diversos elementos radiantes ou não, se torna possível acrescentar alterar características de radiação, tais como diagrama de radiação, diretividade, relação frente-costas e ganho. O arranjo pode ser do tipo linear ou planar, com elementos radiantes ou parasitas. Um exemplo de arranjo linear de antenas com elementos parasitas é a Yagi-Uda que é constituída por um dipolo que é o elemento excitador, refletor e diretores, onde tem como finalidade alterar as características do dipolo, alterando seu diagrama

de radiação e elevando o seu ganho, na Figura 6 traz um exemplo de antena Yagi-Uda com todos os seus elementos (SOEIRO, 2012).

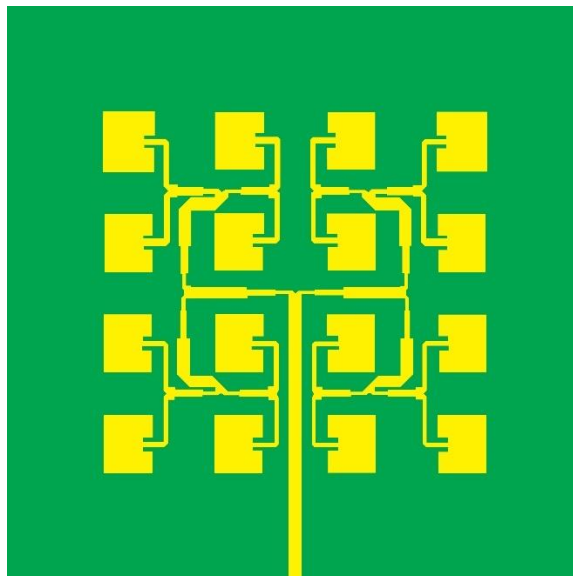
Figura 6: Antena Yagi-Uda.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Um exemplo de arranjo planar de antenas é a utilização de antenas microfita, onde se tem diversos elementos radiantes em um plano, que tem como finalidade uma interferência construtiva com o intuito de alterar características como ganho e diretividade. Na Figura 7 traz um exemplo de arranjo planar de antenas de microfita onde se tem arranjo 4x4, totalizando um total de 16 elementos radiantes. Com isso alterando o ganho e diretividade da antena (FILHO, 2010).

Figura 7: Arranjo planar 4x4 de microfita.

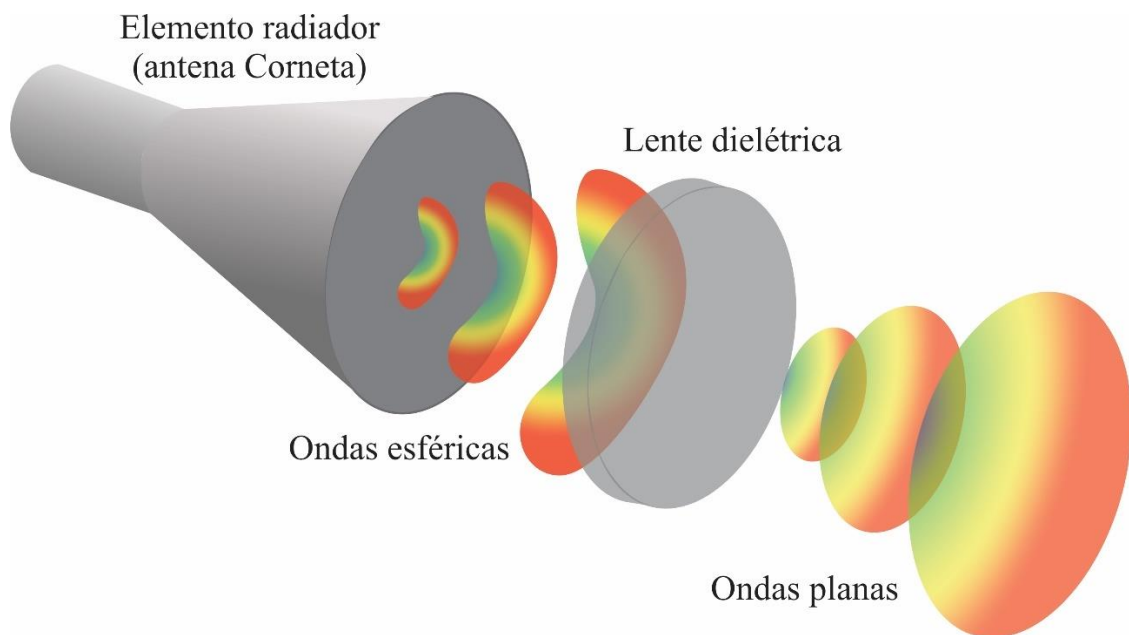


Fonte: Adaptado de AMITEC, 2015.

2.1.5. Antenas de lente

São antenas que contam com a inserção de uma lente em frente ao elemento radiador com a finalidade de gerar um feixe que concentra a energia irradiada em um feixe estreito, ou com a finalidade inversa que seria concentrar a energia recebida. Normalmente utilizadas como elemento radiador uma antena dipolo ou uma antena corneta, são aplicadas para frequências extremamente grandes, algo acima de 40 GHz. Seu funcionamento consiste na lente dielétrica que recebe ondas esféricas da antena e a transformam em ondas planas, por meio da Figura 8 é possível ver uma representação do conjunto antena lente, onde a lente recebe uma frente de onda esféricas do elemento radiador e as transforma em frentes de ondas planas (FRENZEL, 2013).

Figura 8: Funcionamento da antena com lente dielétrica.



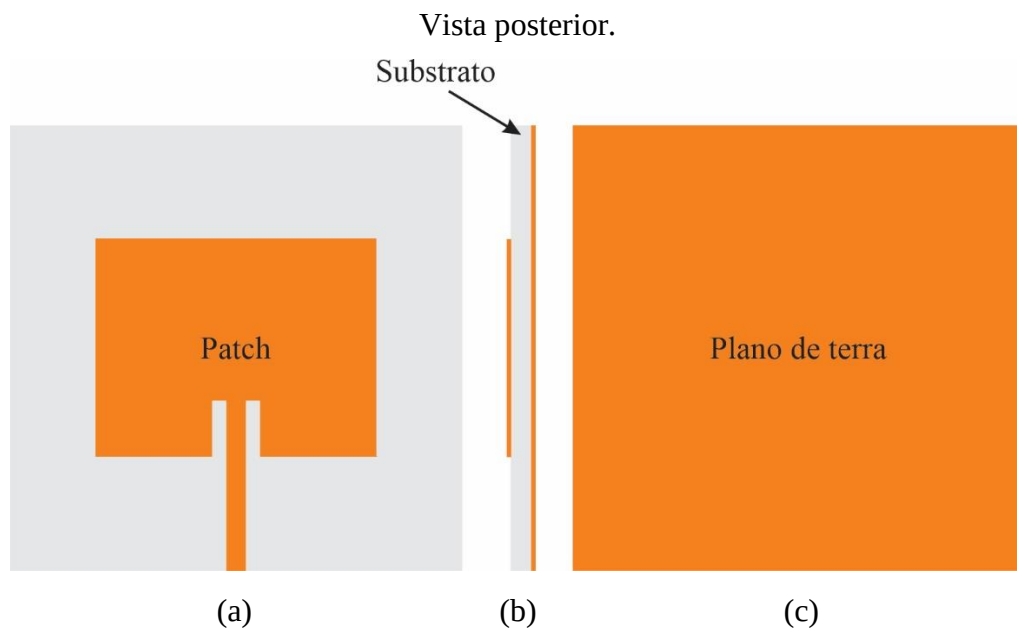
Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2016.

2.1.6. Antenas planares

Desenvolvido por Deschamps em 1953, consiste em um elemento radiante de metal, conhecido com *patch*, com as mais diversas formas sendo normalmente de cobre, porém, pode ser de qualquer outro material que seja um bom condutor, tem-se também na sua composição

um plano de terra também feito por um material condutor, comumente utilizado cobre e entre o *patch* e o plano de terra um substrato de material dielétrico. Possuindo diversas vantagens em comparação as antenas de micro-ondas convencionais, tais como, volume reduzido, leves, econômicas e com fabricação simples. Sua fabricação comumente é feita utilizando técnicas de impressão de circuito, fazendo uso de um CNC (*Computer Numeric Control*) ou pelo método da corrosão. Tornando o embarque em sistemas de comunicações tais como sistema de *GPS* (*Global Positioning System*), sistemas de sensoriamento remoto e de telemetria (MORAES, 2012). Demonstrado na Figura 9 uma antena de microfitas com *patch* retangular.

Figura 9: Antena de microfitas com *patch* retangular: (a) Vista de cima, (b) Vista lateral e (c)



Fonte: Autoria própria, 2020.

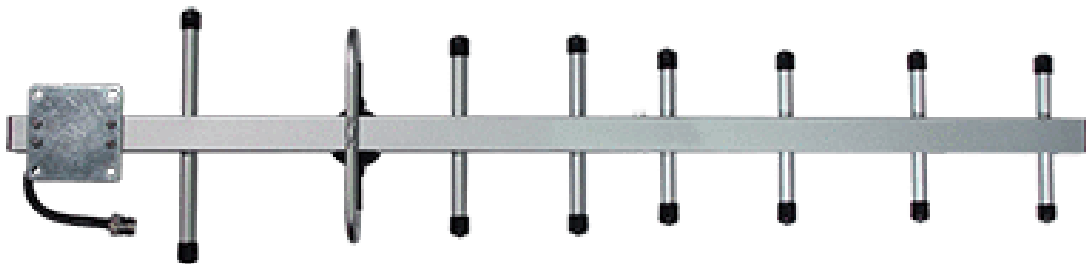
2.2. ANTENA YAGI-UDA

As antenas Yagi-Uda são comuns e conhecidas, utilizadas em grande escala em diversas aplicações, tendo como utilização mais difundida, o uso para recepção de sinal de televisão (CHENG; CHEN, 1973). Constituída por um conjunto de elementos que tem como base a antena dipolo, os elementos parasitas (passivos) que são os diretores e refletor tendo como função direcionar a radiação emitida pelo dipolo para uma determinada direção, alterando assim sua relação frente-costa (MA, 1993). Com isso é possível dividir a antena Yagi-Uda em

um elemento refletor que por sua vez é situado “atrás” do elemento radiante (ou no lado oposto que deseja se propagar o sinal) com um espaçamento $0,1\lambda$ a $0,25\lambda$ e comprimento 5% maior que o elemento irradiante (dipolo) que tem um comprimento entre $0,45\lambda$ a $0,49\lambda$, e um ou vários diretores que tem comprimento em torno de $0,4\lambda$ a $0,45\lambda$ e espaçamento não uniforme variando entre $0,3\lambda$ a $0,4\lambda$, esses valores são estimados da norma técnica NBS 688. A estrutura de uma antena Yagi-Uda pode ser visualizada por meio da Figura 10 (BALANIS, 2009) (CHAGAS, 2011).

Desenvolvida no século XX no Japão pelo professor Hidetsugu Yagi e assistente Shintaru Uda da Universidade Imperial Tohoku. A antena Yagi-Uda apareceu no meio acadêmico pela primeira vez em 1926 no artigo cujo título era Procedimentos do ERE (*Engineering Radio Experience*), porém só foi difundida no meio acadêmico após dois anos quando o artigo foi publicado em inglês (SOEIRO, 2012).

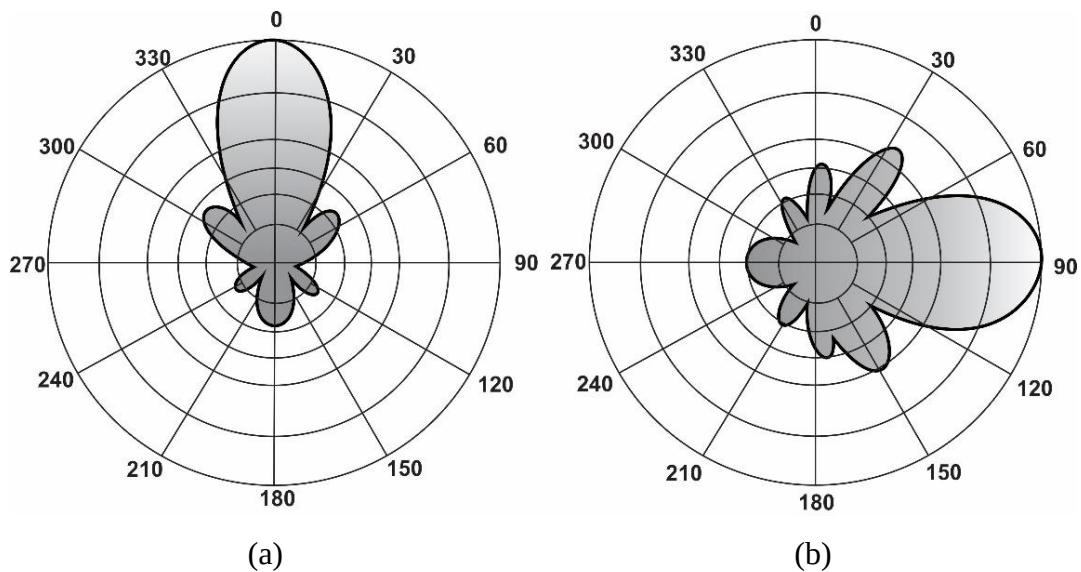
Figura 10: Antena Yagi-Uda.



Fonte: Adaptado de SIGNALBOOSTER ,2020.

Dentre suas características se destacam o seu alto ganho e diagrama de radiação com padrão direcional, como mostrado na Figura 11, esses parâmetros podem ser otimizados à custa dos outros parâmetros tais como impedância de entrada e largura de banda (BRIANEZE, 2008).

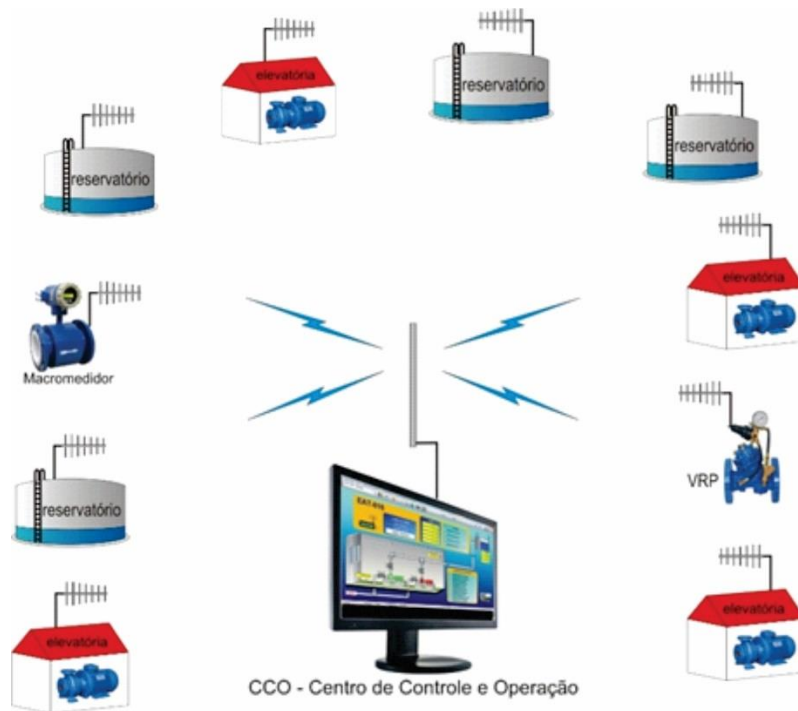
Figura 11: Diagrama de radiação de uma antena Yagi-Uda: (a) Diagrama Horizontal, (b) Diagrama Vertical.



Fonte: Adaptado de ORACOM, 2019.

Uma de suas principais aplicações são em sistemas de telemetria e supervisórios, obtém elevado alcance decorrente de suas características de alto ganho e diretividade. É utilizado comumente *in loco* onde se tem o sistema de sensores ou atuadores que irá transmitir os dados obtidos pelos sensores. Um exemplo desse tipo de sistema é visto na Figura 12, que mostra um diagrama de um sistema de telemetria comandado pelo centro de comando e operações. Esse exemplo específico se trata de um sistema de telemetria para um sistema de abastecimento de água, no qual é possível visualizar como seria a aplicação das antenas, as antenas Yagi-Uda aplicadas nos reservatórios e estações elevatórias, e a antena dipolo instalada no centro de comando e operações. Assim esse arranjo de uma antena central permitindo receber e transmitir em todas as direções e uma antena direcional de alto ganho pontual apontada para a central. Permitindo assim a comunicação, esse arranjo é bastante difundido aplicado também em sistema da rede elétrica (ALFACOMPBRASIL, 2019).

Figura 12: Diagrama geral do sistema de telemetria comandado pelo CCO.



Fonte: Adaptado de ALFACOMPBRASIL, 2019.

As antenas Yagi-Uda tem aparência simples, porém o projeto desse dispositivo não é tão simples quanto sua aparência, decorrente da existência de várias inter-relações entre as variáveis do projeto, em que qualquer variação no comprimento ou espaçamento em qualquer elemento altera as propriedades da antena. Um método bastante difundido para projeto de Yagi-Uda é o demonstrado pela norma técnica NBS 688, no qual já existe diversos trabalhos feitos com o foco de otimizar os parâmetros da antena Yagi-Uda por meio de métodos numéricos como Newton, Gauss-Newton, Algoritmo Genérico e *Particle Swarm Optimization (PSO)* que é um dos métodos mais recentes (CHAGAS, 2011).

2.2.1. Projeto de Yagi-Uda por meio da norma técnica NBS 688

Um dos métodos de projeto de antena Yagi-Uda, se baseia na norma NBS 688, originária de experimentos e medições detalhada por Peter P. Vezbicke para NBS (*National Bureau of Standards*). Consiste em resultados obtidos por meio de medições com o objetivo de relacionar o ganho ao dimensionamento da antena (NBS, 1976).

O primeiro passo é determinar os parâmetros base para a antena que são: a frequência de operação e o ganho relativo. Para isso se faz necessário a utilização da Tabela 1 que expõe comprimento e espaçamentos otimizados em função do comprimento de onda (λ), sendo escolhido o ganho desejado.

Tabela 1: Comprimentos otimizados de elementos parasitas para antenas yagi de seis diferentes comprimentos.

$d = 0,0085\lambda$ $S_{12} = 0,2 \lambda$		Comprimento da Yagi em comprimentos de onda					
		0,4	0,8	1,2	2,2	3,2	4,2
Comprimento do refletor, (L_1/λ)		0,482	0,482	0,482	0,482	0,482	0,475
Comprimento dos diretores, λ	1°	0,424	0,428	0,428	0,432	0,428	0,424
	2°		0,424	0,420	0,415	0,420	0,424
	3°		0,428	0,420	0,407	0,407	0,420
	4°			0,428	0,398	0,398	0,407
	5°				0,390	0,394	0,403
	6°				0,390	0,390	0,398
	7°				0,390	0,386	0,394
	8°				0,390	0,386	0,390
	9°				0,398	0,386	0,390
	10°				0,407	0,386	0,390
	11°					0,386	0,390
	12°					0,386	0,390
	13°					0,386	0,390
	14°					0,386	
	15°					0,386	
Espaçamento entre diretores, em λ		0,20	0,20	0,25	0,20	0,20	0,308
Ganho em relação ao dipolo de meia onda em dB		7,1	9,2	10,2	12,25	13,4	14,2
Curva de projeto		(A)	(B)	(B)	(C)	(B)	(D)

Fonte: Adaptado de NBS, 1976.

O próximo passo é definir a espessura dos elementos da antena e a espessura e material do suporte a ser utilizado, onde recomenda-se a utilização de materiais não metálicos afim de simplificar o projeto a exemplo a utilização de PVC (*Polyvinyl chloride*) devido o material não ter uma influência nos parâmetros da antena decorrente de seu material não metálico. Por meio da fórmula do comprimento de onda demonstrada na Equação 5.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

Em que:

λ : Comprimento de onda;

c : velocidade da luz;

f : frequência.

O passo seguinte é calcular a razão entre o diâmetro escolhidos para os elementos e o comprimento de onda como é demonstrado na Equação 6.

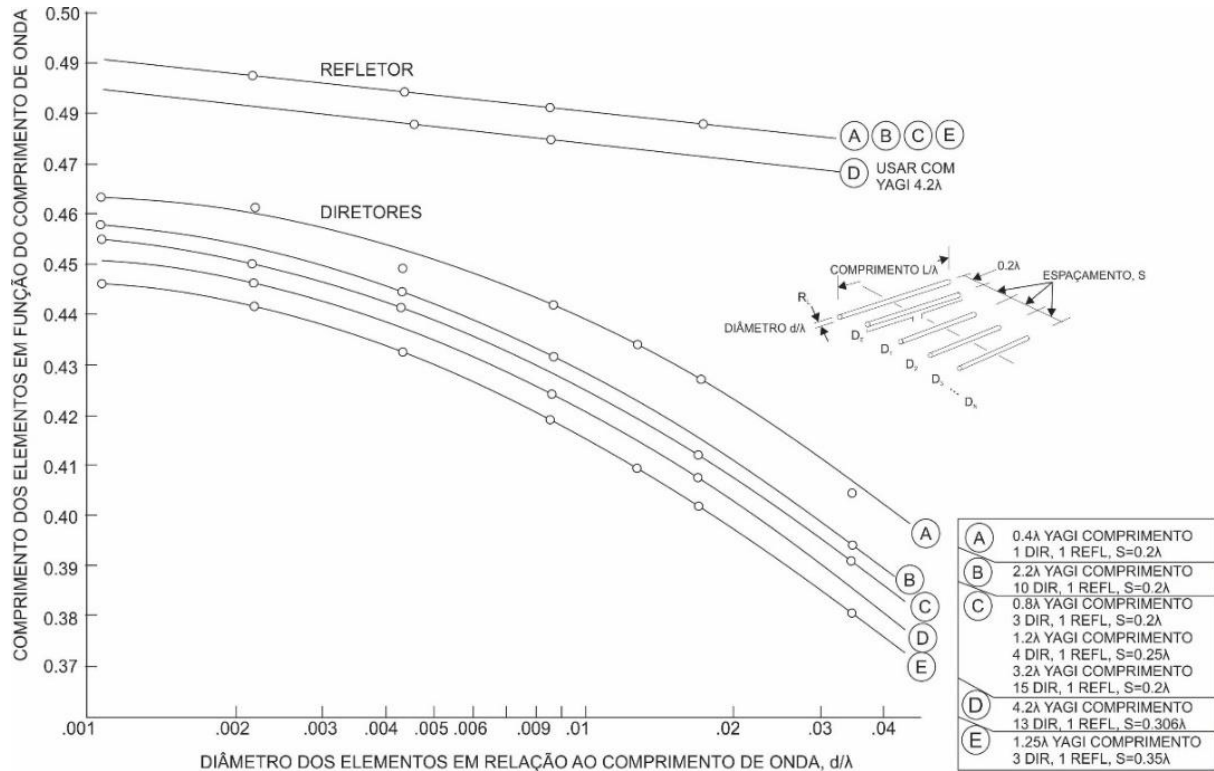
$$\frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

Em que:

d : espessura do elemento.

Quando razão entre o diâmetro dos elementos e o comprimento de onda estiver compreendido no intervalo de $0,001 \leq \frac{d}{\lambda} \leq 0,04$ não é necessário uma alteração, caso o contrário, seria necessário redefinir a frequência de projeto da antena ou alterar o diâmetro dos elementos. Se a relação em Equação (6) for diferente de 0,0085 então se faz necessário a correção dos comprimentos dos elementos. Para isso, é utilizado a Figura 13, que traz curvas de correção por meio da relação entre o comprimento dos elementos em função da razão do diâmetro dos elementos pelo comprimento de onda.

Figura 13: Curvas para correção do comprimento dos elementos parasitas da antena Yagi-Uda.



Fonte: Adaptado de NBS, 1976.

O último passo é definir o comprimento do elemento radiante, que normalmente tem o comprimento entre o do refletor e do primeiro diretor algo em torno de $0,45\lambda$ a $0,49\lambda$. O espaçamento entre o refletor e o elemento radiante é definido na Tabela 1, tal como o espaçamento entre o elemento radiante e o primeiro diretor.

2.2.2. Aplicações e Tendências com Yagi-Uda.

Para as antenas Yagi-Uda apresenta-se diversos trabalhos na literatura. Juntamente com diversos métodos de otimização propostas por autores que tem como principal finalidade melhorar o diagrama de radiação e o ganho.

Ao se utilizar do método *Particle Swarm Optimisation* (PSO), Khodier e Al-aqil (2010) propõe em seu trabalho a otimização da diretividade da antena Yagi-Uda, cujos parâmetros para a otimização são o comprimento dos elementos e o espaçamento. Fazendo um

comparativo com diversos outros métodos, o método PSO foi capaz de produzir uma diretividade maior com o mesmo número de elementos.

Aplicando o método de algoritmo genético (GA) nas antenas do tipo Yagi-Uda, Correia, Soares e Terada (1999), tem como objetivo melhorar o ganho, impedância de entrada e largura de banda da antena. Isso é possível pois o algoritmo genérico poder otimizar mais de um parâmetro ao mesmo tempo, conforme recomendação dos autores citados.

Outra vertente de trabalhos na literatura trata da conversão de antenas Yagi-Uda convencionais em antenas planares. Quian e Kaneda (1998) trazem uma configuração de Yagi-Uda Planar mostrando que a mesma mantém as características da antena Yagi-Uda convencional, tal como diretividade e ganho elevado em comparação a outras antenas impressas, resultados constatados por meio de simulações computacionais.

Corroborando o que Qian e Kaneda (1998) expuseram em seu trabalho Silva *et al.* (2017) traz no seu trabalho uma análise da influência dos diretores, construindo a antena Yagi-Uda planar projetada com o melhor resultado para aplicação a banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and medical*).

2.2.3. Yagi-Uda Planar

A antena Yagi-Uda planar tem a mesma estrutura básica de uma antena Yagi-Uda tradicional que foi apresentada pela primeira vez em 1928 (YAGI, 1928), constituída de um elemento excitador (dipolo), plano de terra truncado assumindo o papel de refletor e os diretores. Este tipo de antena faz a junção de características das antenas planares, tais como baixo perfil, fácil embarque em superfícies e estrutura simples, com as características da yagi-uda com diagrama de radiação direcional e ganho elevado em relação as outras antenas planares como por exemplo uma antena de microfitas com patch retangular (QIAN; KANEDA, 1998).

Na Figura 14 mostra o diagrama esquemático da antena Yagi-Uda planar alimentada por microfita elaborada por Quian e Kaneda em 1998.

A Figura 15 demonstra a representação de uma antena Yagi-Uda planar 3D, sendo possível notar seus elementos principais: a alimentação por meio de linha de microfita, o *balun* que tem como função defasar o sinal em 180°, linha *CPS* (*Coplanar Stripline*) cuja a finalidade é acoplar a energia do sinal defasada vinda do *balun* para o dipolo, e o plano de terra que atuara como refletor, excitador (dipolo) e diretor (LEONG; ITOH, 2007).

41

2.2.3.1. Alimentação por linha de microfita

A alimentação de uma antena por meio de uma linha de microfita baseia-se em uma fita condutora sobre o substrato conectada ao *patch* e a um conector, normalmente um conector *SMA* (*SubMiniature A*). A fita é projetada para ter uma impedância característica com o intuito de casar a impedância do conjunto *patch*, microfita e conector. Para iniciar o projeto de uma antena o primeiro passo seria encontrar qual as dimensões da linha de microfita que é determinada por meio de modelos clássicos (CAPOVILLA, 2004). As equações utilizadas para o projeto da linha de alimentação de microfita, são apresentadas a seguir:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0,25 \frac{W}{h} \right) & \text{para } \left(\frac{W}{h} \leq 1 \right) \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right]} & \text{para } \left(\frac{W}{h} > 1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

Em que:

$$\varepsilon_{eff} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0,041 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] & \text{para } \left(\frac{W}{h} \leq 1 \right) \\ \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} & \text{para } \left(\frac{W}{h} > 1 \right) \end{cases} \quad (9)$$

Os valores obtidos para Z_0 e ε_{eff} utilizando a Equação 10 são encontrados para um erro relativo máximo de perda de 1% acima das faixas w/h e E_r especificadas acima. A equação equivalente a Equação 10 é demonstrada na Equação 11, pode ser usada para síntese de uma única linha de microfita com a mesma precisão apresentada na Equação 10.

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} & \text{para } (A < 1,52) \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 \ln \left(2B - 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left[\ln \left(B - 1 + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right) \right] \right\} \quad \text{para } (A \geq 1,52) \quad (12)$$

Onde,

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right) + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right)} \quad (13)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (14)$$

Caso haja a necessidade de correção da espessura da linha devido a capacidade da linha por unidade de comprimento, pode-se utilizar a seguinte relação:

$$\Delta W = \frac{t}{\pi} (1 + \ln D) \quad (15)$$

Onde,

$$D = \begin{cases} \frac{4\pi W}{t} & \text{quando } \left(\frac{W}{h} \leq 1 \right) \end{cases} \quad (16)$$

$$\frac{2h}{t} \quad \text{quando } \left(\frac{W}{h} > 1 \right) \quad (17)$$

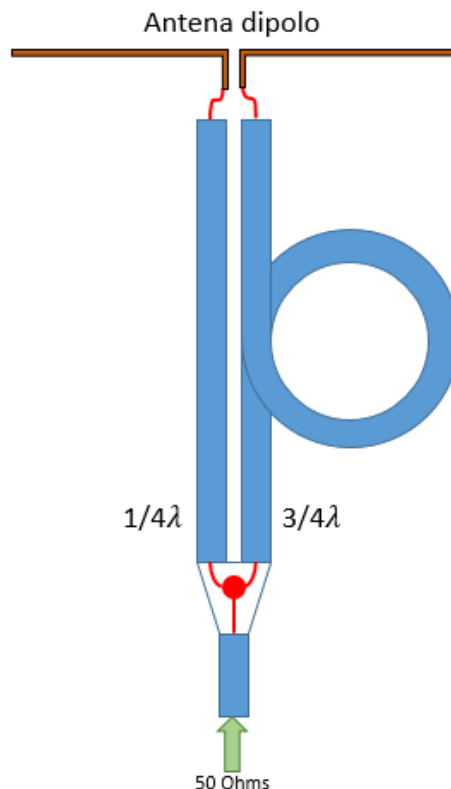
A Equação 15 é válida para $t < h$ e $t < W/2$. As Equações 7, 9, 11 e 12 podem ser utilizadas para uma linha com espessura diferente de zero, sendo necessário apenas substituir $W = w + \Delta w$.

2.2.3.2. Balun

O termo *Balun* vem da junção das palavras *Balanced* mais *Unbalanced*, podendo transformar uma linha desbalanceada em balanceada ou o inverso, os Baluns podem ser ativos

ou passivos esses os ativos são eletrônicos e necessitam de alimentação, já os passivos não necessitam de alimentação decorrente de serem produzidos com elementos passivos (ZAMPIER, 2018). Um exemplo de *balun* é representado pela Figura 16 que demonstra um *balun* sem núcleo feito por um cabo coaxial

Figura 16: Representação de *balun* sem núcleo, feito com cabo coaxial.



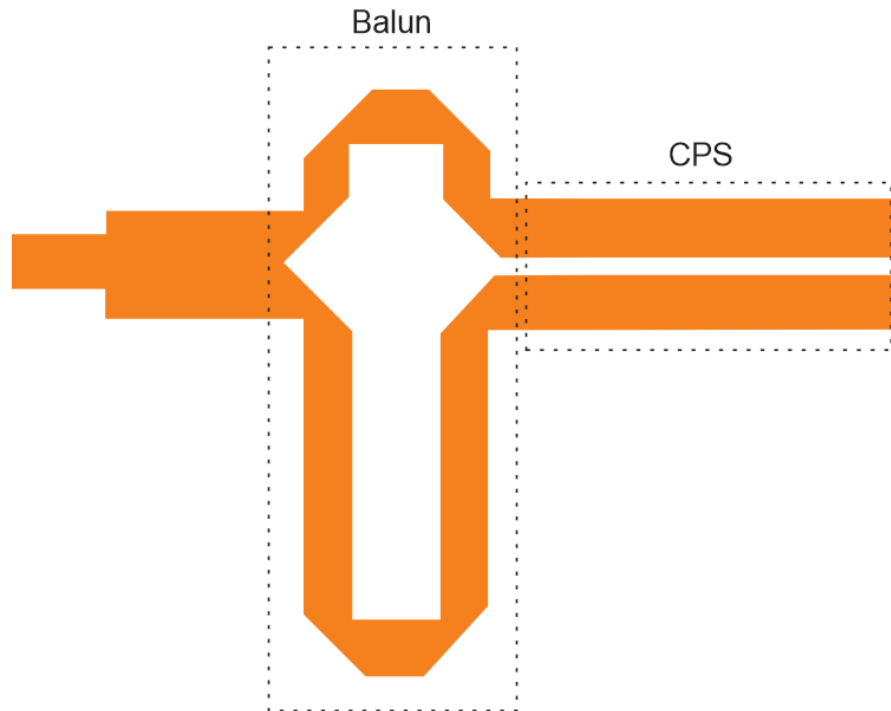
Fonte: ZAMPIER, 2018.

O *Balun* planar é feito de modo que uma das linhas tenha um comprimento maior de cerca de $\lambda_g/2$ que a outra, com o objetivo de criar uma defasagem de 180° . Após isso são feitos ajustes empíricos afim de otimizar por meio de *software* e algoritmos, o *balun* é conectado ao *CPS* (*Coplanar Stripline*) que tem como objetivo receber o sinal defasado e transferir para o radiador que no caso é um dipolo impresso, sendo que uma das tiras se comporta como referencial para a outra, com isso permitindo o desprendimento da onda eletromagnética (COSTA, 2006).

A Figura 17 traz uma representação do *balun* uni-planar e o *CPS*, sendo possível visualizar a diferença entre as duas linhas do *balun*. Ainda na Figura 17 é possível constatar a

semelhança entre o *balun* apresentado na Figura 16 feito de cabo coaxial e o uniplanar exposto na Figura 17.

Figura 17: *Balun* uniplanar e CPS



Fonte: Autoria própria, 2020.

2.3. PARÂMETROS DE ANTENAS

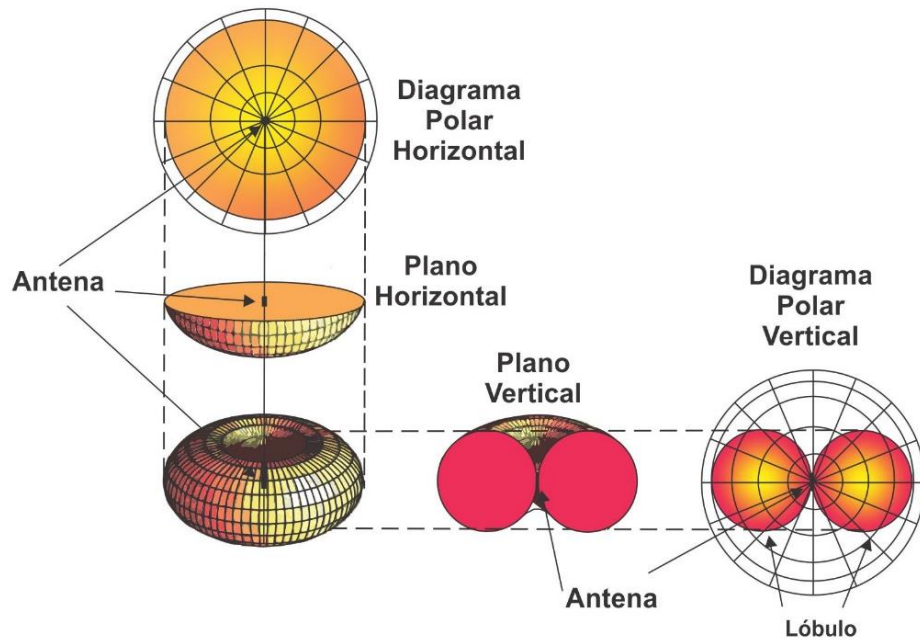
Nesta seção, serão detalhados os parâmetros das antenas, nos quais foram destacados: diagrama de radiação, relação frente-costa, diretividade, eficiência, ganho, largura de banda, perda de retorno, eficiência

2.3.1. Diagrama de Radiação

Definido como sendo a representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais. Mostra a intensidade da potência radiada, do campo magnético e elétrico (normalizados em função de seu máximo valor) em função dos ângulos ϕ e θ na região de campo distante (JASIK, 1993). Para um sistema de coordenadas esféricas, tem-

se o plano de elevação (plano vertical) e plano azimutal (plano horizontal), conforme mostrado na Figura 18.

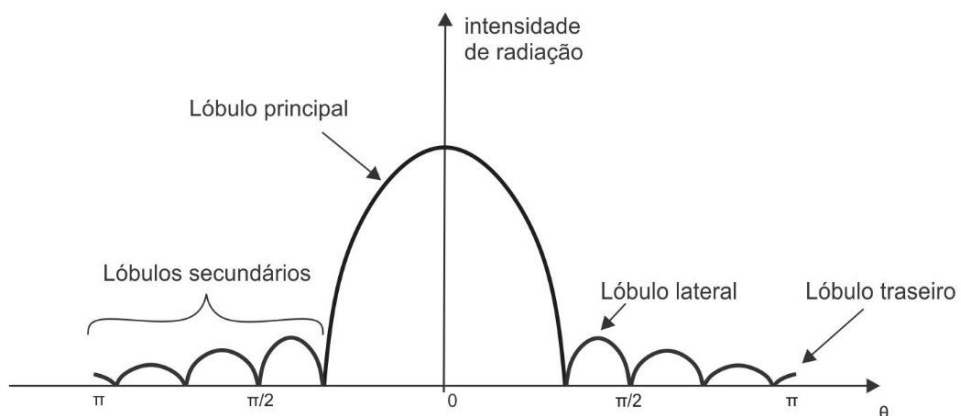
Figura 18: Diagrama de irradiação de um dipolo.



Fonte: Adaptado de DATM, 1956.

Para a obtenção do diagrama de radiação é considerado um ponto na região de campo distante, onde a distância é maior que $2D^2/\lambda$, sendo D a maior dimensão da antena (BALANIS, 2009). Outra forma de mostrar o diagrama de radiação é em sua forma retangular, como é visto na Figura 19.

Figura 19: Diagrama de radiação 2D em sua forma retangular e seus lóbulos.

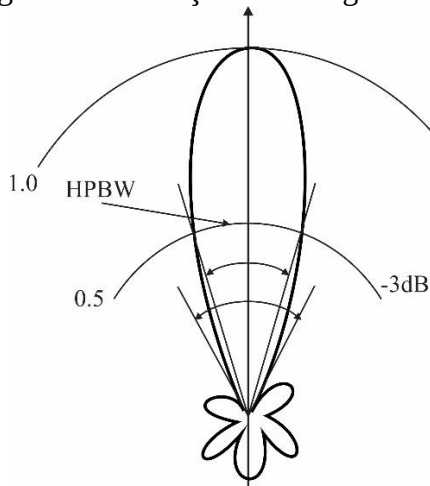


Fonte: Adaptado de Balanis, 2009.

Por meio da Figura 15, é possível extrair as informações sobre os lóbulos de radiação de uma antena. Os lóbulos podem ser divididos em lóbulo principal que contém a direção máxima de potência radiada e lóbulos secundários que é qualquer outro lóbulo (lateral ou traseiro) de radiação com exceção do principal (SILVA NETO, 2016).

Através do diagrama de radiação de uma antena é possível extrair a largura do feixe do lóbulo principal, o feixe mais utilizado é o HPBW (*Half Power Beam Width*) que trazendo para o português é a largura de feixe de meia potência, que é definida pelo ângulo entre os pontos de -3 dB, onde a potência radiada é a metade do valor máximo do feixe (KRAUS, 1997). A Figura 20 demonstra a largura de feixe de uma antena, sendo possível notar que a largura de feixe está associada diretamente com a diretividade de uma antena, visto que quanto mais estreito o feixe for, maior será a diretividade da antena e consequentemente maior será seu ganho.

Figura 20: Diagrama de radiação e seu ângulo de meia potência.

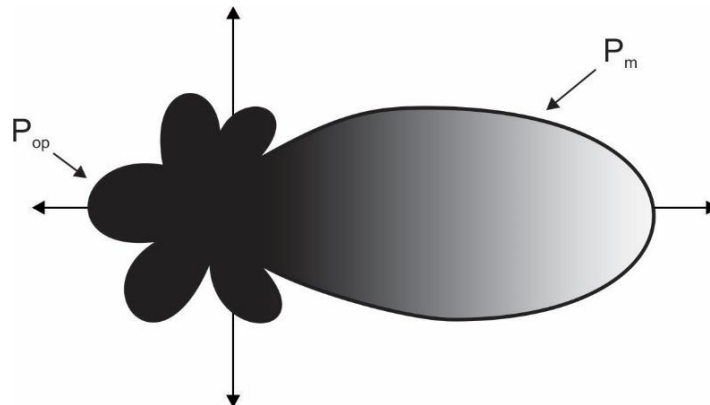


Fonte: Adaptado de Balanis, 2009.

2.3.2. Relação Frente-Costa

A relação frente-costa (RFC) é a relação do nível do sinal do lóbulo principal (P_m) com o nível do lóbulo posterior (P_{op}), conforme é mostrado na Figura 21. Para alguns casos a relação frente-costa é definido como sendo a razão entre as potências radiadas dentro do feixe delimitado por pontos do lóbulo principal de -3 dB e lóbulo oposto determinado por um ângulo θ (SILVA; BARRADAS, 1977).

Figura 21: Diagrama de radiação de uma antena e sua relação frente-costa.



Fonte: Autoria própria.

Com isso a relação frente-costa é a relação entre duas potências, sendo comumente expressa em com seus valores em dB (FERNANDES, 2016). Podendo ser encontrada por meio da Equação 18.

$$RFC (dB) = 10 \log \frac{P_m}{P_{op}} \quad (18)$$

Onde:

P_m : Energia máxima na direção de propagação;

P_{op} : Energia irradiada para trás.

2.3.3. Diretividade

Definida como sendo a capacidade de uma antena concentrar a energia em uma determinada direção (POZAR, 2012). A diretividade também pode ser definida como ganho diretivo, que é a razão entre a intensidade de radiação máxima e a intensidade de radiação media, sendo representada na Equação 19 (EIBERT; VOLAKIS, 2007).

$$D = \frac{U_{max}}{U_{med}} \quad (19)$$

2.3.4. Eficiência

Para se obter a eficiência de uma antena é levado em consideração as perdas nos terminais de entrada e na estrutura interna da antena, podendo ser vista na Equação 20.

$$\eta = \eta_{rad} \cdot \eta_{ref} \quad (20)$$

onde:

η : eficiência;

η_{rad} : eficiência de radiação;

η_{ref} : eficiência de reflexão.

A eficiência de radiação de uma antena descrita na Equação 21, está relacionada as perdas internas dos materiais dielétricos e metálicos, assim reduzindo a potência que seria radiada para o meio (KRAUS, 1997).

$$\eta_{rad} = \frac{P_E - P_P}{P_E} \quad (21)$$

onde:

P_E : Potência fornecida à antena;

P_P : Potência perdida nos materiais.

As perdas decorrentes ao descasamento de impedância, ocorre devido a diferença da impedância da linha de alimentação e a impedância equivalente da antena (BALANIS, 2009). A eficiência de reflexão é descrita por meio da Equação 22.

$$\eta_{ref} = 1 - |\Gamma|^2 \quad (22)$$

onde o coeficiente de reflexão da antena (Γ) pode ser obtido por meio da Equação 23.

$$\Gamma = \frac{Z_E - Z_0}{Z_E + Z_0} \quad (23)$$

Em que:

Z_E : Impedância da antena;

Z_0 : Impedância da linha de transmissão.

2.3.5. Ganho

O ganho está correlacionado com a diretividade, considerando as perdas na antena, onde em sua maioria são resistivas. Com isso o ganho expressa um comparativo entre as antenas em relação a transferência para o meio (MILLIGAN, 2005). A Equação 24 apresenta o ganho sendo o produto da diretividade com a eficiência da antena.

$$G = D \cdot \eta \quad (24)$$

2.3.6. Carta de Smith

O casamento de impedância ocorre quando a impedância equivalente é igual a impedância da linha de alimentação. A carta de Smith é definida como sendo a representação gráfica baseada no coeficiente de reflexão, com principal função a conversão de coeficientes de reflexão para impedância (ou admitâncias), com isso possibilitando a análise da impedância da linha de transmissão e coeficientes de reflexão (WENTWORTH, 2006). Utilizada para projeto de antenas onde é obtido a impedância da linha de transmissão para que seja possível utilizar, se necessário, compensadores para melhorar o casamento de impedância entre a antena e a alimentação.

Para que a carta de Smith atenda a qualquer impedância característica da linha de transmissão, se faz necessário a normalização da impedância da carga, com isso é descrita por meio da Equação 25 (POZAR, 2012).

$$\frac{Z_L}{Z_0} = r + jx \quad (25)$$

onde:

Z_L : Impedância da antena;

r : Resistência normalizada da antena;

x : Reatância normalizada da antena.

Com a substituição da Equação 25 na Equação 23 é obtido a relação de coeficiente de reflexão com a impedância normalizada, representada na Equação 26.

$$\Gamma_L = \Gamma_r + j\Gamma_i = \frac{r + jx - 1}{r + jx + 1} \quad (26)$$

Pela reorganização da Equação 26 é obtida equações separadas para a resistência e reatância normalizada, obtendo as Equações 27 e 28.

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (27)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (28)$$

Assim reorganizando as Equações 27 e 28, são obtidas novas relações, observadas nas Equações 29 e 30.

$$\left(\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right)^2 + \Gamma_i^2 = \left(\frac{1}{1+r}\right)^2 \quad (29)$$

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left(\Gamma_i - \frac{1}{x}\right)^2 = \left(\frac{1}{x}\right)^2 \quad (30)$$

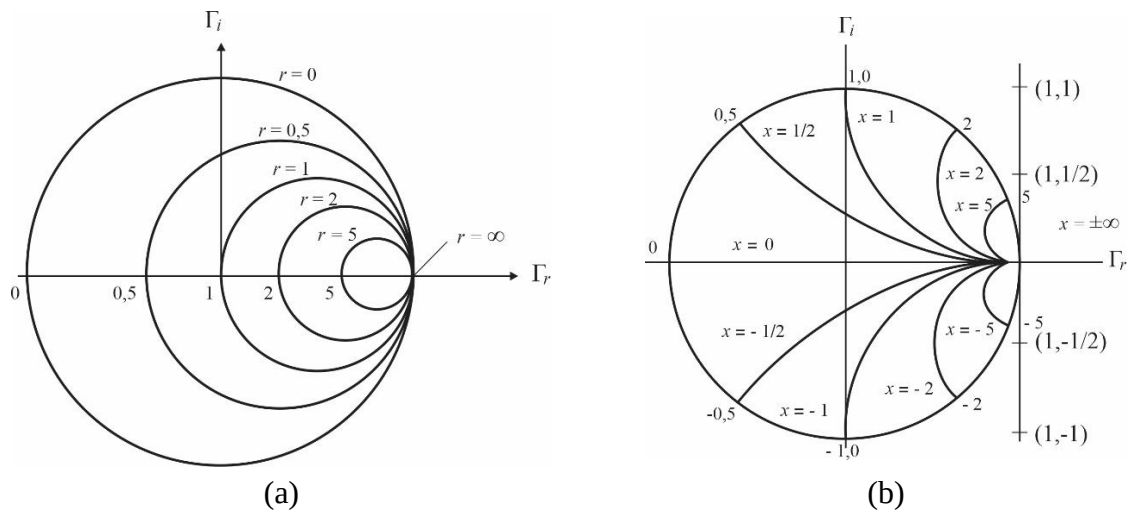
Nas Equações 29 e 30 é possível notar que são equivalentes a equação geral de uma circunferência, assim a Equação 29 representa os círculos resistivos e a Equação 30 para os círculos de reatância. Essas Equações têm centro e raio descritos nas Equações 31 e 32, respectivamente para os resistivos e de reatância (WENTWORTH,2006).

$$\text{Centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(\frac{1}{1+r}, 0\right) \text{ e raio } = \frac{1}{1+r} \quad (31)$$

$$\text{Centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(1, \frac{1}{1+r}\right) \text{ e raio } = \frac{1}{x} \quad (32)$$

Assim o resultado da solução das Equações 31 e 32 para diferentes valores de r e x é demonstrado por meio das Figuras 22 (a) e (b) que trazem o conjunto de círculos resistivos e o conjunto de círculos de reatância respectivamente.

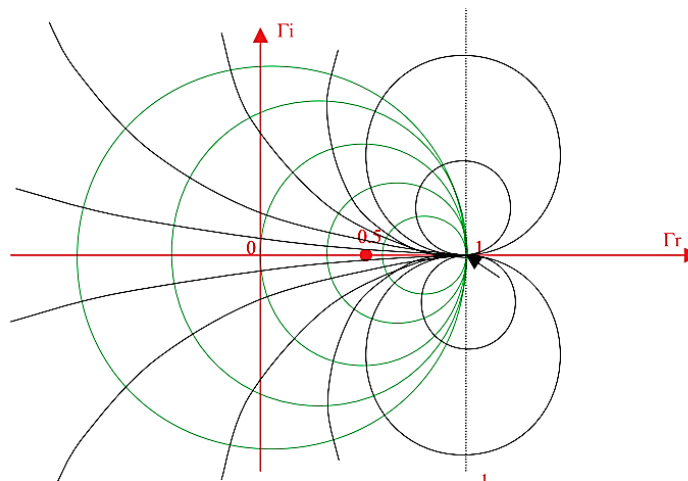
Figura 22: Conjunto de Círculos: (a) Resistivos e (b) Reatância.



Fonte: SADIKU, 2004.

Decorrente da sobreposição dos círculos resistivos e de reatância, é obtido a carta de Smith ilustrada na Figura 23.

Figura 23: Ilustração de uma Carta de Smith.



Fonte: CHAN e HARTER, 2000.

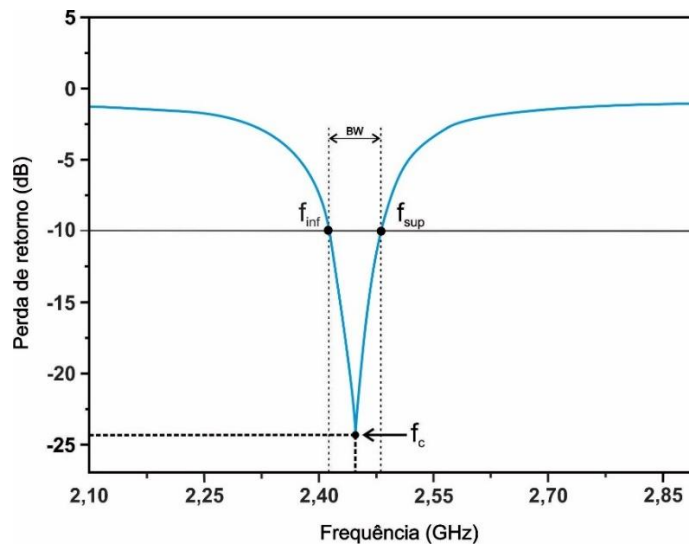
2.3.7. Perda de retorno e Largura de banda

Sendo uma razão logarítmica dada em dB a perda de retorno compara a potência refletida (P_r) com a potência entregue (P_i) a antena pela linha de transmissão. Calculada por meio do coeficiente de reflexão de potência (Γ), expressa na Equação 33, indicando a proporção da potência incidente que é refletida devido ao descasamento de impedância (POZAR, 2012).

$$RL(dB) = -20 \log|\Gamma| = -20 \log \sqrt{\frac{P_r}{P_i}} \quad (33)$$

A frequência de ressonância ou frequência central de operação é o valor da frequência no ponto onde se tem a menor perda de retorno, considerando partir de um valor inferior a -10 dB (BIRD, 2009). A Figura 24 mostra um exemplo de gráfico de perda de retorno, sendo possível visualizar a frequência central (f_c) e a frequência inferior (f_{inf}) e superior (f_{sup}) da largura de banda (BW).

Figura 24: Gráfico de perda de retorno em função da frequência.



Fonte: Autoria própria.

Definido como sendo a faixa de frequências ao redor de sua frequência de operação, tendo como referência dois pontos com perda de retorno igual a -10 dB, a largura de banda é expressa pela Equação 34. (JASIK, 1993).

$$BW = f_{sup} - f_{inf} \quad (34)$$

A forma mais usual de calcular a largura de banda é pela Equação 34 que mostra a largura de banda em sua forma percentual.

$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_c} \times 100\% \quad (35)$$

Sendo os valores obtidos da largura de banda na forma percentual é possível classificar as antenas da seguinte forma:

- Banda estreita, com $0\% < BW < 1\%$;
- Banda larga, com $1\% \leq BW \leq 20\%$;
- Banda ultra larga, com $BW > 20\%$.

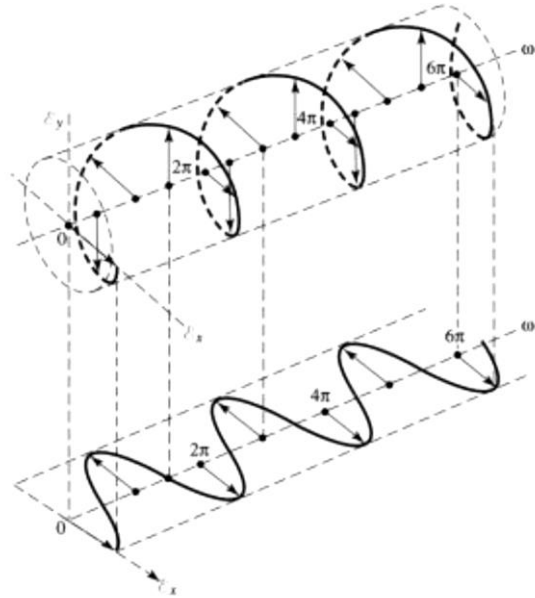
A necessidade de uma largura de banda otimizada vem das exigências do sistema em que a antena será aplicada. Para otimização da largura de banda exige técnicas que têm como finalidade aumentar a largura de banda de uma antena, um exemplo são as técnicas para as antenas de microfita, tais como aumento na espessura do substrato, material dielétrico de baixa permissividade e redução nas dimensões do plano de terra (FILHO, 2010).

2.3.6. Polarização

A definição de polarização pode ser definida como sendo a trajetória traçada pela extremidade do vetor campo elétrico, observado no decorrer de um sentido de propagação de uma onda eletromagnética em função do tempo (SANTOS, 2016). A polarização de uma antena é a polarização de ondas irradiada pela mesma. Quando nenhuma direção é especificada é admitida a polarização na direção de máximo ganho, com isso, é possível afirmar que a polarização varia de acordo a direção possuindo como origem o centro de uma antena. Deste modo é possível afirmar que se têm diferentes polarizações para diferentes partes do diagrama e a maior transferência de energia ocorre quando as antenas têm polarização iguais

(MEDEIROS, 2007). Uma representação de polarização circular é mostrada na Figura 25 que mostra a trajetória que o vetor campo elétrico em torno de um eixo.

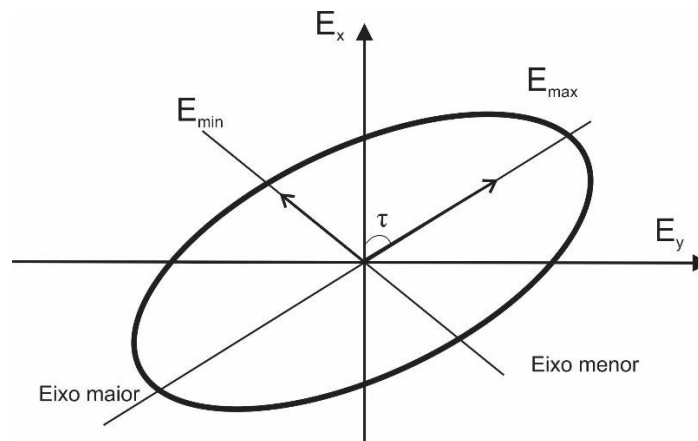
Figura 25: Onda plana circularmente polarizada.



Fonte: Balanis, 2005.

A polarização pode ser classificada em linear, circular ou elíptica. As polarizações lineares e circulares são casos especiais da polarização elíptica. Na Figura 26 é identificada, para uma onda de polarização elíptica, as orientações dos campos elétricos máximo ($E_{\max}$) e mínimo ($E_{\min}$) e seu ângulo de inclinação (τ).

Figura 26: Polarização elíptica.



Fonte: Autoria própria.

A caracterização da polarização é feita considerando que uma onda plana que se propaga na direção z tem seu campo elétrico representado da seguinte forma:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t)\hat{x} + \vec{E}_y(z, t)\hat{y} \quad (36)$$

As componentes que se propagam nas direções $\hat{x}$ e $\hat{y}$ podem ser decompostas em função de suas amplitudes máximas em cada direção, da frequência (ω), constante de propagação (β) e fase (ϕ).

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_x \cos(\omega t + \beta z + \phi_x) \quad (37)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \vec{E}_y \cos(\omega t + \beta z + \phi_y) \quad (38)$$

A polarização da onda é definida pela polarização das fases dos componentes vetoriais $\hat{x}$ e $\hat{y}$. Para uma onda ser linearmente polarizada considera-se a equação 39.

$$\phi_y - \phi_x = n\pi \quad (39)$$

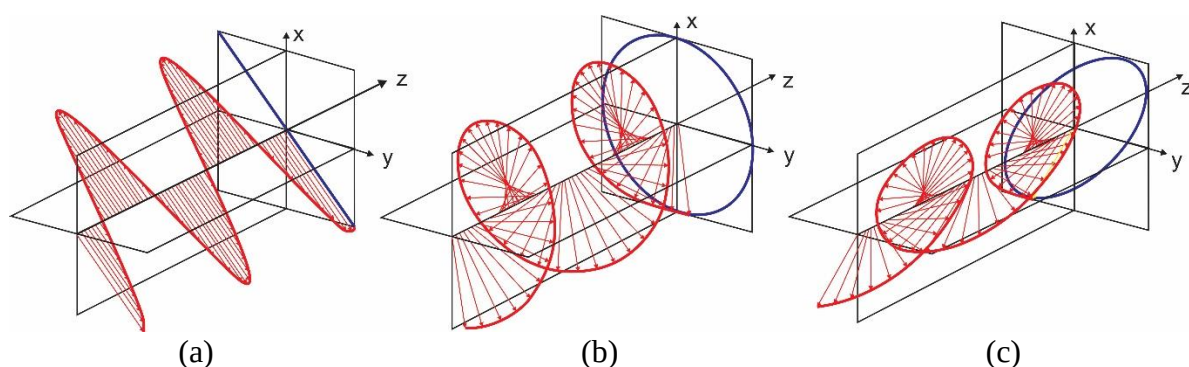
Na Equação 39, n é um número inteiro positivo. Já para a polarização circular, a magnitude dos componentes $\hat{x}$ e $\hat{y}$ devem ser iguais e a diferença de fase obrigatoriamente é um múltiplo ímpar de $\pi/2$. Na polarização circular, a resultante do campo elétrico pode assumir dois sentidos de rotação, à direita ou à esquerda. Se a fase de $\hat{y}$ estiver adiantada com relação a fase de $\hat{x}$ a resultante tem sentido à direita e a onda tem polarização circular à direita. No caso da fase de $\hat{x}$ estar adiantada com relação a fase de $\hat{y}$ a resultante tem sentido à esquerda e diz que a onda é polarizada à esquerda. Se a onda possuir magnitudes diferentes ou não atender a nenhum dos requisitos discutidos, a onda possui polarização elíptica (KUMAR, RAY, 2003).

O desempenho de uma antena quanto à polarização se dá por meio de sua razão axial (RA) que é definida entre o maior e menor eixo da elipse ilustrada na Figura 26. Logo, a razão axial é calculada conforme a Equação 40.

$$RA = \frac{\text{Eixo Maior}}{\text{Eixo Menor}} \quad (40)$$

Para facilitar o entendimento dos tipos de polarização, a Figura 27 demonstra os três tipos de polarização sendo (a) linear que razão axial é acima de 7 dB, a (b) circular onde a razão axial é um valor abaixo dos 3 dB e a (c) Elíptica onde se tem uma razão axial entre 3 dB e 7 dB (KUMAR, RAY, 2003).

Figura 27: Polarização: (a) Linear, (b) Circular e (c) Elíptica.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

2.3.7. Densidade de corrente

Quando submetidos a ação de um campo elétrico externo as cargas livres presentes em materiais condutores, acumulam-se na superfície do condutor, com isso surgindo uma corrente na superfície do condutor. A unidade da densidade de corrente é dada em A/m², definida como sendo a corrente que atravessa uma determinada área. Considerando a área unitária e normal a um determinado ponto a densidade de corrente pode ser expressar pela Equação 41 (POZAR, 2012).

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta S} = \rho_v u \quad (41)$$

Em que:

ρ_v : Densidade do fluxo de cargas;

u : Velocidade de deriva.

Essas grandezas podem ser calculadas através das Equações 42 e 43.

$$\rho_v = -ne \quad (42)$$

$$u = -\frac{e\tau}{m}E \quad (43)$$

Em que:

$-e$: Carga do elétron;

n : número de elétrons;

m : Massa do elétron;

τ : Intervalo de médio entre as colisões;

E : Campo elétrico.

Com isso a Equação 41 pode ser rescrita, para materiais condutores na forma pontual da lei de Ohm. (SADIKU, 2004).

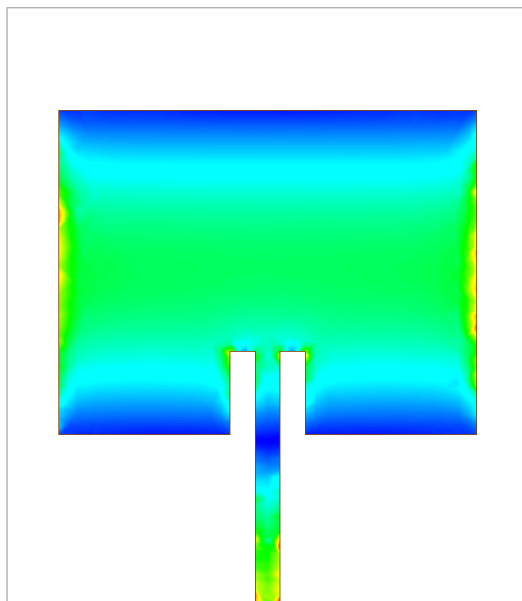
$$J = \frac{ne^2\tau}{m}E = \sigma E \quad (44)$$

Em que:

σ : condutividade do material.

Uma representação da distribuição da densidade de corrente sobre o *patch* retangular de uma antena de microfita é possível ser vista por meio da Figura 28, para esse caso específico é possível notar uma maior densidade de corrente na linha de microfita próximo a alimentação e em suas laterais.

Figura 28: Densidade de corrente em uma antena de microfita com *patch* retangular.

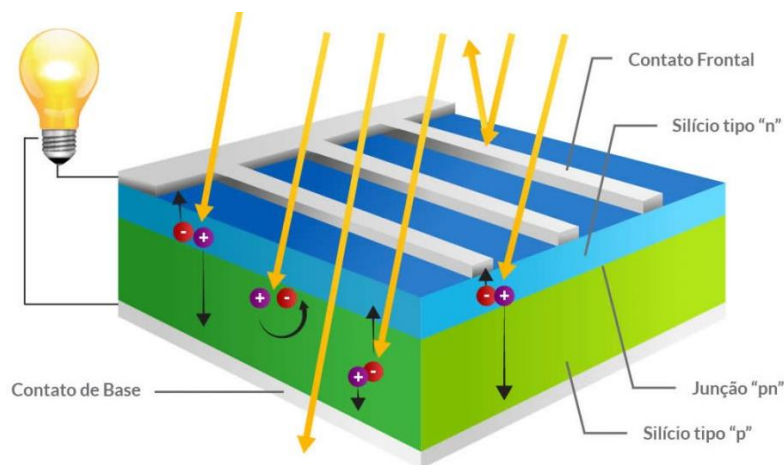


Fonte: Autoria própria, 2020.

3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A geração fotovoltaica tem como a base teórica o efeito fotovoltaico que foi observado pela primeira vez, por Edmond Becquerel em 1839, sendo observado por ele que quando uma placa, geralmente, metálica é incidida por luz, ocorre o surgimento de uma diferença de potencial devido a absorção da luz visível. No entanto, só houve avanço quando Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico no ano de 1905, a partir daí foi possível a aplicabilidade em produção de energia elétrica. Contudo, só em 1950 que a primeira célula solar foi produzida pelo químico Calvin Fuller, feita de uma barra de silício sendo dopada com gálio, formando uma camada de cargas do tipo p. Para se produzir uma camada do tipo n foi necessário um mergulho em lítio assim criando uma zona de elétrons livres. Tendo nos dias atuais diversas aplicações como em satélites e para produção descentralizadas de energia elétrica em residências (MATTOS, 2016). A representação do efeito fotoelétrico que ocorre em uma célula fotovoltaica pode ser vista na Figura 29. A incidência de luz sobre a célula carrega os elétrons, separando dos prótons, ficando na camada de silício tipo “n” e os prótons na camada de silício tipo “p”.

Figura 29: Representação do efeito fotoelétrico em uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.

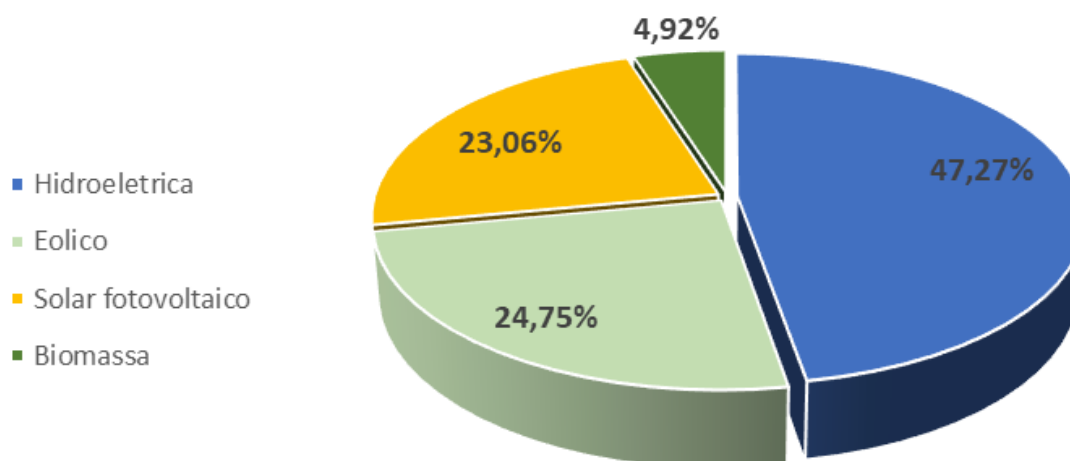


Fonte: MATTOS, 2016.

3.1. PANORAMA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO NO MUNDO

Desde a primeira discussão sobre as mudanças climáticas até o tratado de Quioto em 1997, onde um dos pontos do tratado era promover o uso de fontes energéticas renováveis (LOPEZ, 2002). Graças a isso e diversos outros fatores a expansão da utilização de fontes renováveis a nível mundial já é uma realidade factível, onde no período do tratado era considerado praticamente utópico e inviável. Dentre as fontes de energia renováveis está a hidroelétrica, eólica, solar fotovoltaica e biomassa, sendo a hidroelétrica com maior participação representando 47,27%, seguido pela eólica com 24,75%, solar fotovoltaica com 23,06 e por último a biomassa representando 4,92% da capacidade instalada de fontes renováveis no ano de 2019, como é demonstrado na Figura 30 (IRENA, 2020.)

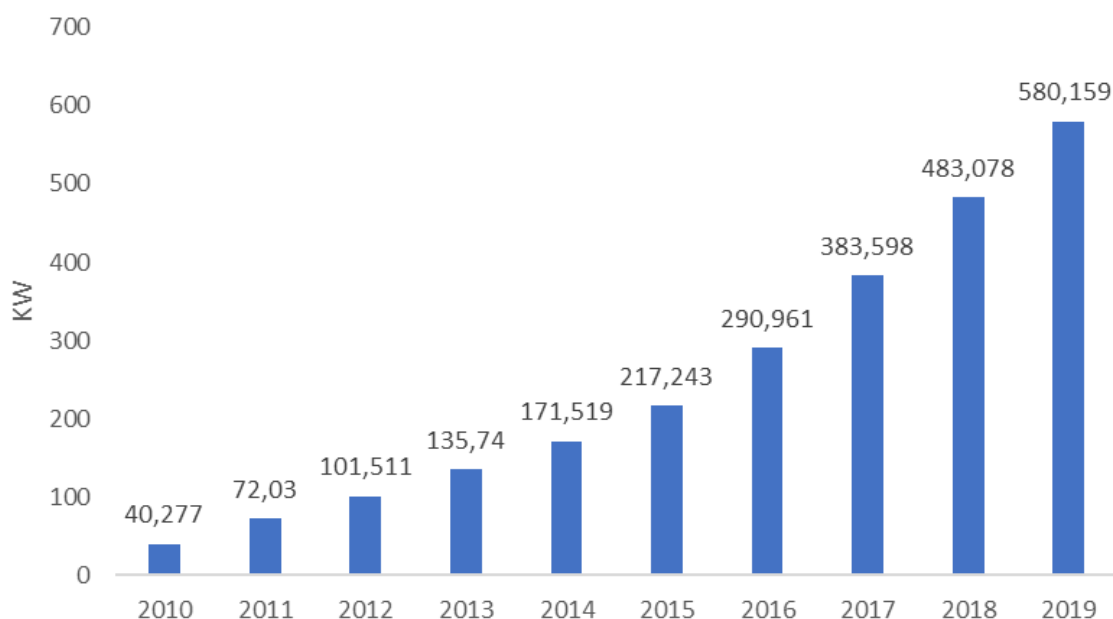
Figura 30: Capacidade instalada de energia renovável no mundo no ano de 2019.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2020.

Dando enfoque a capacidade instalada por meio de sistemas solares fotovoltaicos que demonstrou no decorrer dos anos um aumento expressivo, na Figura 31 explicita esse crescimento por meio de um gráfico que traz dados de 2010 até 2019, demonstrando a potência instalada em GW.

Figura 31: Potência instalada no mundo.

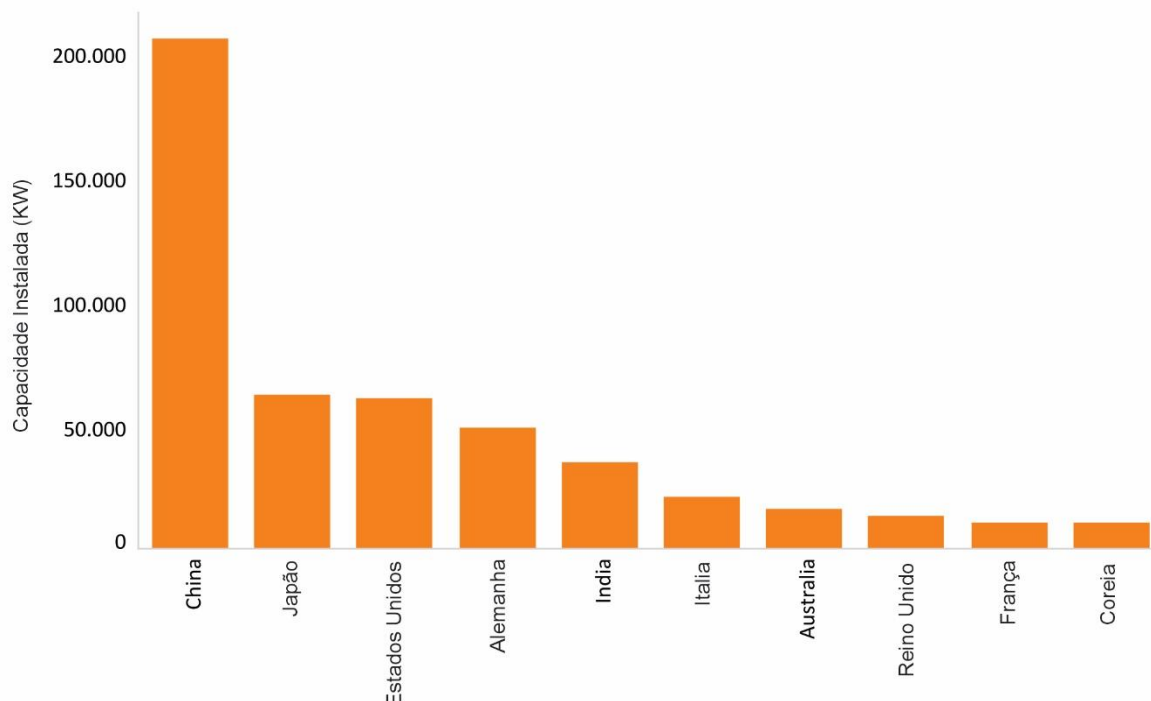


Fonte: Adaptado de IRENA, 2020.

Por meio da Figura 31 é possível constatar um comportamento de crescimento, observando que em 2010 se tinha uma potência instalada em todo o mundo de 40,277 GW e atingindo no ano de 2019 uma potência instalada de 580,159 GW, um crescimento de aproximadamente 539,882 GW ao longo de 10 anos. Esse crescimento se deve ao forte investimento que se teve e continua ocorrendo em determinados países que têm o objetivo de transformar sua matriz energética, reduzindo ou até eliminando as fontes de energia elétrica não renováveis, tais como fontes provenientes de petróleo e seus derivados, ou, carvão mineral.

Dentre esses países o destaque para potência instalada de sistemas solares fotovoltaicos vai para a China com a aproximadamente 205.072 MW de capacidade instalada em 2019, ficando em primeiro lugar no rank mundial, sendo que em 2000 tinha apenas 34 MW. Comparando com o Japão que no ano de 2000 era constatado 300 MW e era o país com maior capacidade instalada, já no ano de 2019 se tem 61.840 MW ficando em segundo lugar no rank mundial. Já o Brasil no ano de 2019 acumulou uma capacidade instalada de 2.485 MW. Diferentemente dos países como China e Japão que são grandes usuários de usinas solares fotovoltaicas, o Brasil não tinha nenhum sistema no ano de 2000, sendo instalada a primeira usina em meados do ano de 2007 (IRENA, 2020). Mostrado pela Figura 32 os principais usuários em energia solar fotovoltaica no mundo.

Figura 32: Países com maior capacidade instalada de sistemas solares fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de IRENA, 2020.

O Brasil no ano de 2020 conseguiu a marca de entrar para o *ranking* dos 20 países líderes em capacidade instalada solar fotovoltaico, ocupando a posição 16º no *ranking*. (IRENA, 2020).

3.1.1. Brasil

Em junho de 2007 a ANEEL registrava a primeira geração distribuída no Brasil, sendo um sistema fotovoltaico de 0,5 kW de potência instalada localizada na cidade de Campinas no Estado de São Paulo. Após resolução normativa 482/2012, que estabelecia condições gerais de acesso o número de unidades subiu para 14 totalizando 452 kW de potência instalada.

Até 2015 já eram 1.448 com uma potência instalada de 9.656,12 KW, no final de 2015 com a publicação da resolução normativa 687/2016 que tinha como foco redução dos custos e de tempo para a conexão e a compatibilização do sistema de compensação de energia. Os anos seguintes após a revisão da resolução houve um grande crescimento sendo em 2016

contabilizado 6.758 unidades, 2017 com 13.950 unidades chegando a marca de 35.110 unidades consumidoras com uma potência instalada 392.964,45 kW em 2018.

A geração distribuída por meio da energia fotovoltaica continua em um crescimento vertiginoso em 2019 atingiu a marca de já se tinham 118.895 novas unidades consumidoras com potência instalada de 1.461.190,01 kW, sendo aproximadamente mais de três vezes do valor da potência instalada atingido em 2018, significando uma expansão exponencial do setor no país, com consumidores buscando sistemas cada vez maiores e mais eficientes. A Tabela 2 demonstra a quantidade de unidades consumidoras com sistema de geração distribuídas e sua potência instalada em cada região do Brasil, é possível observar que a região que foi pioneira com a instalação da primeira unidade se manteve em primeiro lugar, tendo o Sudeste uma quantidade de unidades de 50.322 chegando a 510.714,96 kW de potência instalada. (BRASIL, 2019)

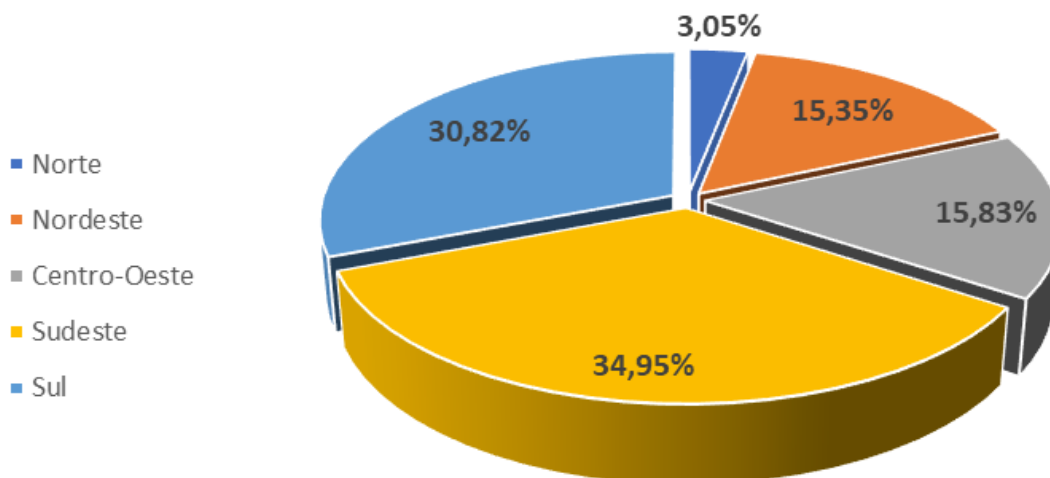
Tabela 2: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída e sua potência instalada por região.

Região	Quantidade	Potência Instalada (kW)
Norte	3.889	44.583,95
Nordeste	17.721	224.286,66
Centro-Oeste	15.912	231.248,43
Sudeste	50.322	510.714,96
Sul	31.051	450.356,01
Total	118.895	1.461.190,01

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2020.

Para uma melhor visualização da atuação de cada região se tem a Figura 33, que traz um gráfico, mostrando que a maior parte dos sistemas de geração distribuída de solar fotovoltaica estão instalados na região Sudeste que como foi mostrado antes, foi pioneira no tema, com o total de 42,32% da potência instalada no Brasil, seguida pela Região Sul com 26,12%, uma região que vale o destaque pelo seu potencial de geração é a região Nordeste que só em 2019 foi instalado 224.286,66 kW representando 14,9% do que foi instalado durante o ano no país, com isso sendo evidente o crescimento na geração distribuída por meio de sistemas solares fotovoltaicos (BRASIL, 2020).

Figura 33: Percentual da potência instalada de cada região.



Fonte: Adaptado de Brasil, 2020.

3.1.2. Energia Solar Fotovoltaica no Nordeste e Rio Grande do Norte

No Nordeste a primeira conexão à rede aconteceu na Bahia em 2012 com uma potência instalada de 403 kW, nesse momento foi dado início para inúmeros outros empreendimentos em todo Nordeste. Porém o crescimento nos primeiros anos ocorreu de forma lenta, igualmente ao que aconteceu no cenário nacional que se teve um crescimento considerável a partir de 2016, após a publicação da resolução normativa nº 687/2016.

As projeções de crescimento se mantem onde até o primeiro semestre de 2019, já ocorreram 4.023 novas instalações de sistemas solares conectados à rede com 56.624,80 kW instalados algo próximo do acontecido em todo de 2018 que atingiu 4.908 instalações com 70.241,67 kW. A geração distribuída por meio de sistemas solares fotovoltaicos no Nordeste vem somando um valor de 146.188,4 kW instalados distribuídos em 10.255 unidades consumidoras até junho de 2019. A Tabela 3 mostra a quantidade de sistemas interligados a rede e potência instalada por estado, através da mesma é possível notar que o estado com a maior quantidade sistemas instalados e com maior potência instalada é o Ceará, com 2.552 unidades e com 40.450,94 kW, correspondendo a 24,46%. Como é demonstrado na Figura 34, o estado com a menor quantidade de unidades e potência é o estado de Sergipe com 534 unidades somando um total de 6.219,39 kW, representado 3,76% da potência instalada no Nordeste (BRASIL, 2019).

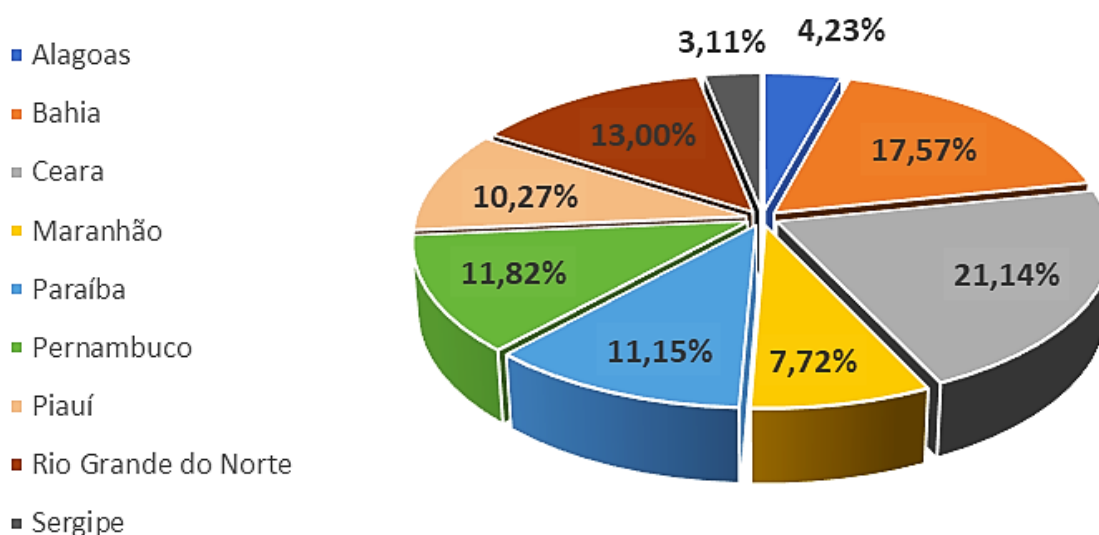
Tabela 3: Unidades consumidoras com geração distribuída e sua potência instalada por estado.

Estado	Quantidade	Potência Instalada (kW)
Alagoas	1.483	18.497,78
Bahia	7.675	76.887,79
Ceara	6.404	92.529,78
Maranhão	2.825	33.765,50
Paraíba	3.545	48.779,66
Pernambuco	3.465	51.723,55
Piauí	3.725	44.951,24
Rio Grande do Norte	3.679	56.888,51
Sergipe	1.227	13.594,54
Total	34.028	437.618,35

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2020.

Na Figura 34 é possível observar que os três estados com a maior capacidade instalada é o Ceará com 21,14%, Bahia com 17,57% e 13,00% do Rio Grande do Norte, que representam mais de 50% da capacidade instalada no Nordeste.

Figura 34: Percentual da potência instalada de cada estado.

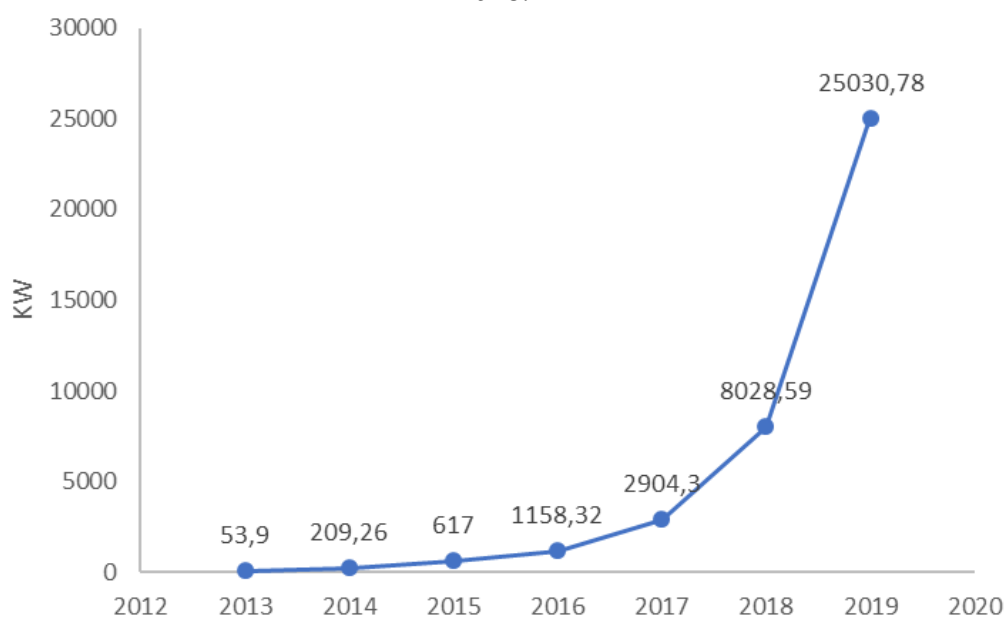


Fonte: Adaptado de BRASIL, 2019.

Seguindo o padrão ocorrido em âmbito nacional, o estado do Rio Grande do Norte tem acontecido um crescimento no número de instalações conectadas a rede, na Figura 35 demonstra

esse crescimento por meio de um gráfico onde é nítido o avanço da geração distribuída por meio de energia solar. Ainda por meio da Figura 35 é possível ver que as primeiras instalações ocorreram em 2013. A curva aponta um crescimento considerável entre os anos de 2018 e para o ano de 2019 tendo em 2018 uma marca de 8.055,82 kW já em 2019 esse valor cresceu mais de três vezes atingindo o valor de 25.030,78 kW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos no estado do Rio Grande do Norte (BRASIL, 2020).

Figura 35: Potência instalada de sistemas fotovoltaicos no Rio Grande do Norte em função do ano.



Fonte: Adaptado de BRASIL, 2019.

No ano de 2019 o estado do Rio Grande do Norte totalizava 56.888,51 kW instalados, distribuídos em um total de 3.679 unidades conectadas a rede. A distribuição dos sistemas fotovoltaicos conectado à rede é demonstrada na Figura 36, por meio dela é possível notar uma centralização nas regiões metropolitanas, tendo como Natal a cidade com maior quantidade de sistemas com 949 unidades com 13.584,81 kW, seguida por Mossoró com 744 unidades e 9.446,30 kW de potência instalada e 607 unidades somando 5.966,13 kW em Parnamirim, sendo essas as três maiores cidades quando o assunto é geração distribuída por meio de energia solar. Porém ainda por meio da Figura 36 é possível notar uma distribuição em todo estado, mesmo com menos quantidade todas regiões do estado se têm sistemas solares (BRASIL, 2020).

Tabela 4: Usinas solares fotovoltaicas da UFERSA.

Usina	Tipo	Local	Potência (kWp)
MOSSORÓ I	De solo	CITED – Campus Leste – Mossoró	3,43
MOSSORÓ II	De solo	Campus Leste Mossoró	150,8
MOSSORÓ III	Telhado	Laboratório de Engenharia I – Campus Leste – Mossoró	15,6
MOSSORÓ IV	Telhado	Laboratório de Engenharia II – Campus Leste – Mossoró	147,0
ANGICOS	De solo	Campus Angicos	62,7
CARÚBAS	De solo	Campus Caraúbas	62,7
PAU DOS FERROS	De solo	Campus Pau dos Ferros	62,7
TOTAL			504,33

Fonte: Adaptado de UFERSA, 2019.

3.2.1. A usina de estudo (Mossoró II)

Como dito anteriormente a usina Mossoró II foi a primeira usina solar com finalidade de geração de energia elétrica sendo instalada em 2017, como é descrito na Tabela 5 é instalada no solo, com potência instalada de 150 kWp, com isso se encaixando na categoria de minigeração segundo a resolução normativa da ANEEL N° 687/2015, potência essa provenientes de 580 painéis do modelo de CSI CS6P-260P da fabricante Canadian Solar com potência nominal por placa de 260 W, com uma área de painéis de 933 m², gerando em torno de 18.000 kWh/mês que representa 5% do consumo total do campus Mossoró. (UFERSA,2019).

Tabela 5: Características gerais da usina solar Mossoró II.

Local	Campus de Mossoró (Leste)
Latitude	05°12'38" S
Longitude	37°18'54" W
Número de módulos	580
Fabricante e modelo dos módulos	Canadian Solar CS6P-260P-SD
Potência do modulo (Wp)	260
Potência instalada da usina (kWp)	150,8
Área do arranjo (m ²)	933
Ângulo de inclinação	10°
Tipo de instalação	Em solo

Fonte: UFERSA, 2019.

Uma imagem aérea da usina Mossoró II pode ser visualizada na Figura 37, sendo possível observar toda a área que compreende a usina desde a cerca limitando o acesso até a cabine de inversores que protejo os mesmos.

Figura 37: Imagem aérea da usina Mossoró II.



Fonte: UFERSA, 2019.

3.3. PARÂMETROS INFLUENCIADORES NA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICO

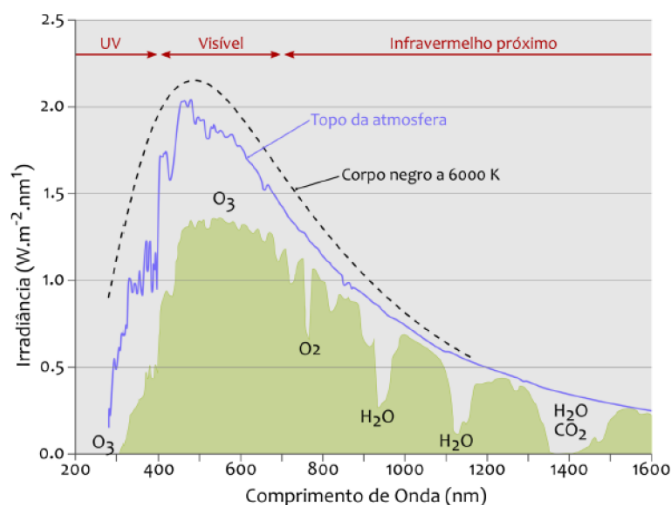
Os parâmetros que influenciam a geração solar fotovoltaica podem ser divididos em dois tipos: os que influenciam diretamente e os que influenciam indiretamente. Dentre os que tem interferência direta se tem a radiação solar e temperatura de operação, os que tem interferência indireta são a temperatura ambiente que influencia na temperatura de operação e a umidade relativa do ar que quanto maior a umidade, maior a interferência (CANTOR, 2017). Posteriormente será demonstrado de maneiras mais explícita como esses fatores influenciam na geração solar fotovoltaico.

3.3.1. Radiação Solar

A energia solar é considerada uma das grandes fontes de energia capazes de suprir as demandas presentes e futuras da humanidade, pois a energia gerada pelo Sol poderia cobrir estas demandas. A energia do Sol é transmitida ao nosso planeta através do espaço na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação é composta por ondas eletromagnéticas com diferentes valores de energia, pois a energia transmitida está associada a sua frequência (CANTOR, 2017).

Na Figura 38 é demonstrada a distribuição do espectro da luz do sol, mostrando que quanto maior o comprimento de onda, menor é a energia do fóton e que a maior densidade de energia está na faixa visível do espectro.

Figura 38: Distribuição espectral da radiação solar.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017.

Apenas uma parte dessa energia que chega as camadas mais externas da terra atinge a superfície, decorrente da interação da luz com a atmosfera, absorvendo e refletindo, com isso tem-se três tipos de radiação:

- Radiação direta: é a radiação que chega diretamente a superfície do solo e a interferência da atmosfera é mínima. Dada pela Equação 45.

$$E_n = \frac{S}{R^2} t \quad (45)$$

Para:

S= constante solar;

R²= fator de correção da distância da terra-sol;

t= transmitância atmosférica.

- Radiação difusa: é a radiação que por meio da atmosfera influência nos raios solares atenuando através de nuvens, nevoeiros e partículas de poeira. A expressão empírica para estimativa da radiação difusa é representada pela Equação 46 (CANTOR, 2017).

$$Ed = 4,99579 + 95,9177 \times (1 - 0,0111 \times e^{0,05Z}) \quad (46)$$

Para Z = Ângulo zenital

- Radiação Global: é toda radiação que chega à superfície contando com a radiação direta e difusa a melhor maneira de quantificar a radiação global é através de instrumentos de medição chamado de piranômetro. Porém há formas matemáticas de se estimar a radiação global. Conforme mostrado na Equação 47.

$$Eg = E_n \cos Z + Ed \quad (47)$$

Onde:

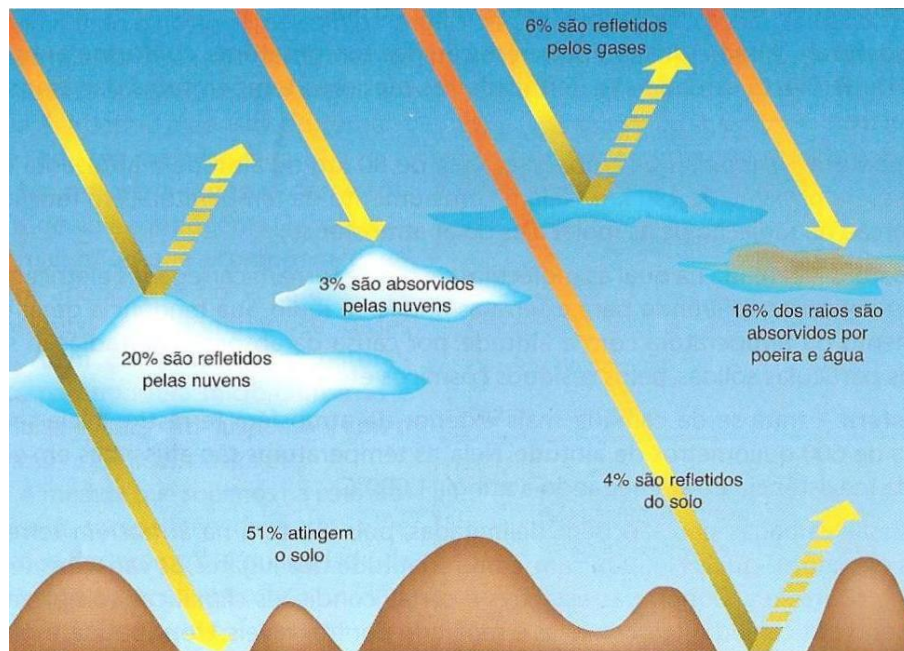
Ed=Radiação difusa

En=Radiação direta

Z = Ângulo zenital

Na Figura 39 tem-se uma melhor visualização desses tipos de radiação, podendo ver também algumas estimativas de valores que são absorvidos e refletidos por gases atmosféricos, poeira e água, nuvens e solos, chegando à estimativa que apenas 51% atinge o solo.

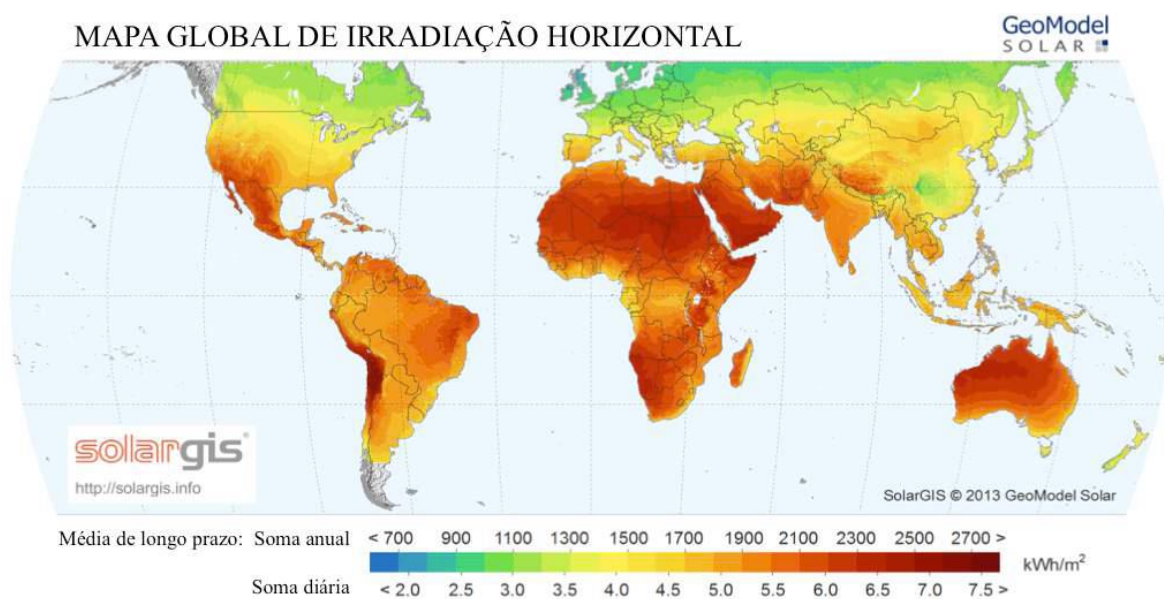
Figura 39: Absorção e reflexão da irradiância na atmosfera da Terra.



Fonte: MOURA, 2009.

Diferentes locais na Terra recebem diferentes médias mensais de radiação dependendo da latitude. Em algumas regiões situadas perto da linha equatorial, podem exceder 2.300 kWh/m² por ano, enquanto no sul da Europa não excede os 1.900 kWh/m² por ano, como mostra a Figura 40.

Figura 40: Irradiação horizontal global anual e diária em diferentes zonas do planeta Terra.



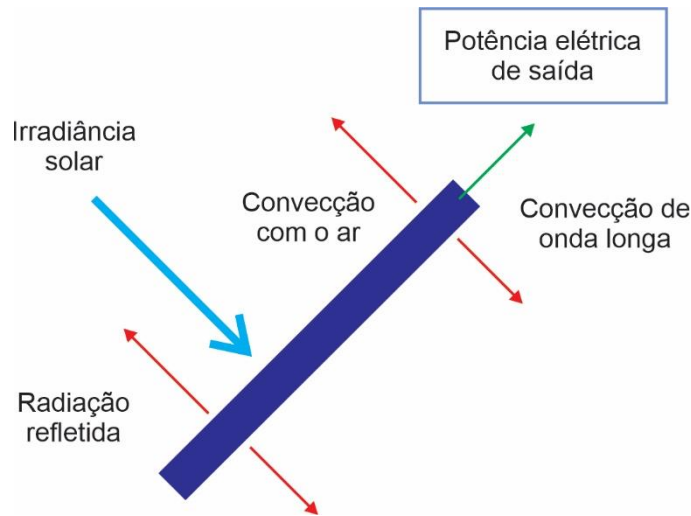
Fonte: SolarGIS, 2013.

3.3.2. Temperatura de operação de placas solares fotovoltaicos

As placas fotovoltaicas são suscetíveis as alterações de temperatura, devido aos materiais semicondutores (silício) que constituem as células fotovoltaicas. Com o aumento da temperatura tem-se um aumento no número de elétrons e buracos, devido ao aumento de energia térmica, assim excitando mais os elétrons da camada de valência para a banda de condução. A amplitude da mobilidade dos elétrons e dos buracos diminuem levemente, tendo como resultante um espalhamento melhor de elétrons e buracos devido as vibrações térmicas, resumidamente um aumento na temperatura de um semicondutor resulta em um aumento na condutividade (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Decorrente do aumento de temperatura acontece uma diminuição na resistividade das células fotovoltaicas, com isso ocorre a redução da tensão e consequentemente a potência de saída da placa será menor, outro efeito de menor impacto é que a corrente da placa sofre uma pequena elevação (BELTRÃO, 2008). O sistema fotovoltaico mostra-se como um diagrama de entradas e saídas, de modo que se deve conservar a energia conforme a Figura 41.

Figura 41: Transferência de calor do sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de JONES e UNDERWOOD, 2000.

Dados como coeficiente de temperatura e temperatura de operação são encontrados no *datasheet* das placas a exemplo a placa solar fotovoltaica CSI CS6P-260P do fabricante Canadian Solar. Através da Tabela 6 é observado os dados referentes as características térmicas do painel, dados como coeficiente de temperatura para a potência máxima e a temperatura nominal de operação.

Tabela 6: Características de temperatura.

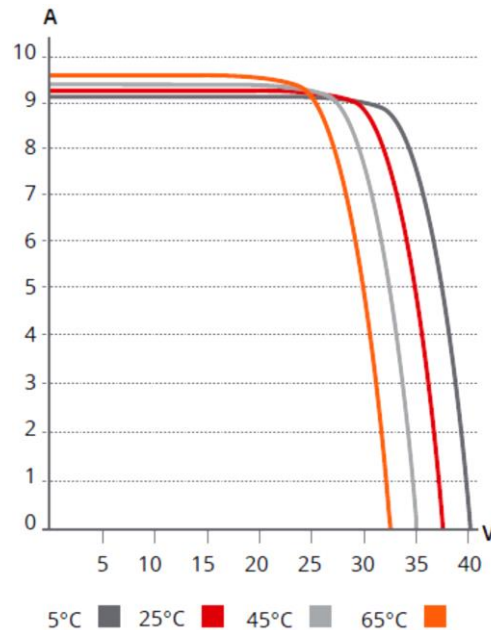
Especificação	Dados
Coeficiente de temperatura (P_{max})	$-0.41\% / ^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura (V_{oc})	$-0.31\% / ^\circ\text{C}$
Coeficiente de temperatura (I_{sc})	$0.053\% / ^\circ\text{C}$
Temperatura nominal de operação	$45 \pm 2^\circ\text{C}$

Fonte: CANADIAN SOLAR INC, 2016.

É demonstrado que para esse modelo tem-se uma temperatura nominal de operação de 45°C com uma variação de 2°C para mais ou menos, após esses valores a placa em relação a potência máxima (P_{max}) uma perda de 0,41% por cada grau Celsius acima de sua temperatura de operação o mesmo acontecendo para a tensão de circuito aberto (V_{oc}) com uma perda de 0,31% por grau Celsius, para a corrente de curto circuito (I_{sc}) a um pequeno incremento de 0,053 % por grau Celsius.

Para uma melhor visualização do efeito da temperatura sob a corrente e a tensão da placa na Figura 42 se tem a curva característica da placa sob as temperaturas de 5°C, 25°C, 45°C e 65°C. Com isso é constatado uma a variação da tensão e da corrente em função da temperatura, onde para esse modelo se tem a temperatura de operação em torno dos 45°C

Figura 42: Efeito da temperatura na curva característica da placa.



Fonte: CANADIAN SOLAR INC, 2016.

3.4. SISTEMAS CLÁSSICOS DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS SOLARES

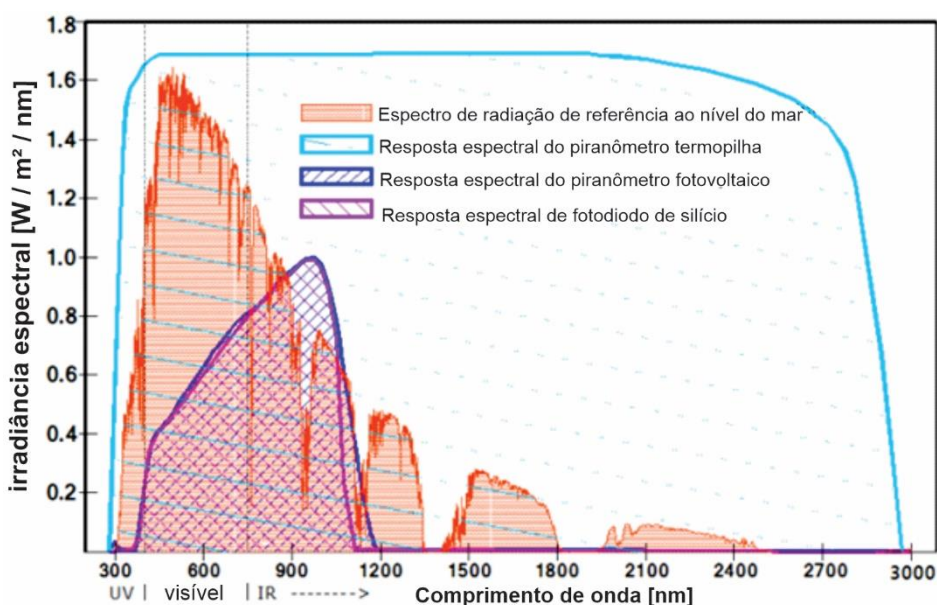
Para a produção de energia elétrica a partir da energia solar é de suma importância que se tenha dados da quantidade de radiação que abrange determinadas regiões, pois com esses dados é possível saber se instalação de uma usina solar em determinado local é viável e onde se terá uma maior produção de energia elétrica (CRESESB, 2006).

Para a obtenção dos dados como radiação global, radiação direta e horas de insolação, há alguns instrumentos que fazem essa coleta como: Actinógrafo, Heliógrafo, Pireliômetro e Piranômetro.

3.4.1. Piranômetro

O piranômetro é um instrumento de medição de dados meteorológico tendo como informação obtida dados de radiação global, com isso tem que apresentar algum componente sensível a luz, esse componente tem que alterar suas características de acordo com a variação da radiação solar o modelo mais difundido no mercado é o que o utiliza termopilha, porém decorrente de pesquisas na área foi desenvolvido um piranômetro que faz uso de componentes semicondutores a exemplo piranômetro de fotodiodos. Na atualidade se tem diversos modelos de piranômetro, dentre os mais diversos modelos se destacam por sua precisão os modelos que utilizam termopilha e semicondutores. Na Figura 43 é mostrado o comportamento da irradiância solar e a resposta de diferentes piranômetro, sendo possível notar que o piranômetro de termo pilha consegue atingir uma faixa espectral que comporta toda a frequência da luz solar, já o piranômetro de fotodiodo tem um comportamento similar ao comportamento de uma célula solar, isso se deve por sua composição e se tratar de ambos serem semicondutores.

Figura 43: Espectro da irradiância e Espectro resposta.



Fonte: Adaptado de USSOLAR INSTITUTE, 2020.

No piranômetro de termopilha, o responsável por captar a energia solar é a termopilha que converte a energia térmica em um pulso de energia elétrica. A termopilha consegue simular um corpo negro, assim a energia irradiada pelo sol é praticamente que totalmente absorvida por ela e transformada em calor, que é transformado em uma diferença de potencial (DDP). Sendo considerado atualmente o instrumento para medição de radiação global com a maior precisão com

desvios menores que 1%, essa alta precisão é devido a sua faixa espectral de 300 a 3000 nm e uma boa resposta para ângulos próximos a 180° (BOLZAN, 2014). Por meio da Figura 44 se tem o modelo LP02 da marca HUKSEFLUX, é mostrado sua estrutura que é composto pelo sensor, dois domos de vidro para isolamento térmico, estrutura metálica para proteção e uma base para fixação.

Figura 44: Piranômetro LP02 da HUKSEFLUX.



Fonte: HUKSEFLUX, 2018.

Com a mesma finalidade do piranômetro de termopilha o piranômetro de fotodiodo mede a radiação global, fazendo a substituição da termopilha por uma célula semicondutora que varia sua resistência de acordo com a quantidade de iluminação emitida sobre ela, e assim convertendo a radiação solar em uma corrente elétrica proporcional à radiação, que varia seu nível de tensão. Decorrente de sua não linearidade no espectro se tem menor precisão do que o piranômetro de termopilha e decorrente de ser um equipamento totalmente elétrico é mais sensível, assim sendo mais suscetível a ruídos.

É aplicado para o levantamentos de potencial de energia solar fotovoltaica para suas etapas exploratórios ou onde não se faz necessário uma alta precisão esse equipamento se torna ideal, pois apresenta boa robustez, menor custo e uma maior portabilidade, pois a existência de equipamentos desse tipo portáteis (PEREIRA et al., 2017). Um exemplo de piranômetro de fotodiodo bastante utilizado para estações fixa é o LI-200R da LI-COR que pode ser visto na Figura 45.

Figura 45:Piranômetro LI-200R da LI-COR.



Fonte: LI-COR, 2018.

3.4.2. Termômetro Infravermelho com Termovisor

O termovisor é uma câmera que tem a capacidade de visão térmica microprocessada, sendo bem difundida na identificação de falhas por aquecimento dos componentes, principalmente em sistemas elétricos, auxilia na manutenção preventiva e corretiva de máquinas e equipamentos.

Sua precisão é dada como sendo aproximadamente a porcentagem da leitura mais o número de dígitos, levando em consideração uma temperatura de 23°C e uma umidade relativa do ar de aproximadamente 90% (FLUKE, 2018). Na Figura 46 se tem o termovisor da FLUKE TI9, como exemplo desse equipamento, que tem diversos modelos de inúmeros fabricantes.

Figura 46: Termovisor FLUKE TI9.



Fonte: FLUKE, 2018.

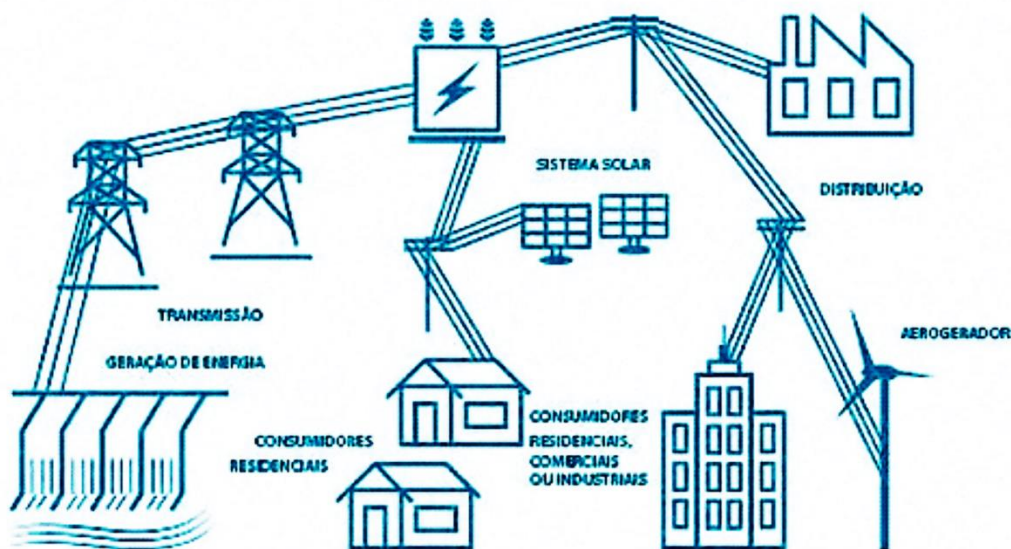
3.5. SISTEMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICO

A geração elétrica feita próximo as unidades consumidoras, descentralizando a produção de energia elétrica, independente da potência instalada é definida como Geração elétrica distribuída. A instalação de pequenos sistemas de geração em sua maioria, trazem benefícios para o sistema elétrico, tais como a diminuição da ampliação de linhas de transmissão e distribuição e diversificação da matriz energética. Porém com essa descentralização, faz com que o sistema elétrico se torne mais complexo, dificultando a operação e proteção da rede.

A geração distribuída foi descrita pela primeira vez em 2004 por meio do decreto de Lei nº 5.163/2004, que tratava a regulamentação sobre a comercialização de energia elétrica decorrente disso várias outras resoluções abordaram o tema de geração distribuída. Porém somente com a resolução normativa da ANEEL nº 482/2012 que entrou em vigor em 17/04/2012, dizendo, que qualquer cidadão brasileiro pode gerar sua energia elétrica a partir de fontes renováveis ou de cogeração, fornecendo o excedente para a rede, sendo convertido em crédito para ser debitado em contas futuras, a norma determinava dois tipos de geração distribuída definidas por faixas de geração, onde até 100 kW era determinado microgeração e outra faixa de 100 kW a 1 MW como minigeração.

Havendo uma atualização sobre o tema em 2016 por meio da resolução normativa para a nº 687/2015, que determina uma nova faixa de geração como microgeração que vai até 75 kW de potência instalada e minigeração como acima de 75 kW até 5 MW, conectadas a redes da concessionária de energia. Outro ponto chave nessa atualização é a redução de tempo e custos ao consumidor que deseja gerar sua própria energia. Na Figura 47 é visualizada uma representação de sistema de geração distribuída, observando as fontes geradoras próximos aos consumidores (ENERCONS, 2018.)

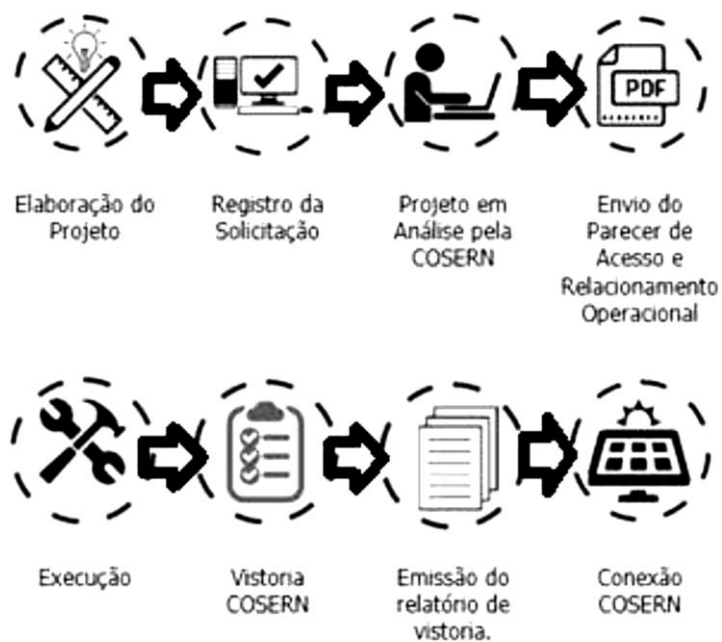
Figura 47: Sistema de geração distribuída.



Fonte: ENERCONS, 2018.

Para interligar a rede de potência de uma concessionária de energia é preciso passar por um processo onde serão feitos alguns procedimentos com a finalidade de formalizar a adesão ao sistema de compensação de energia elétrica. Tendo como o primeiro passo a necessidade de elaboração de um projeto feito por um engenheiro eletricista, após a elaboração respeitando as normas internas da concessionária, o próximo passo é o registro da solicitação onde o projeto é analisado pela equipe interna de análise de projetos desse tipo, projeto esse analisado no período de 15 dias para sistemas de microgeração e 30 dias para sistemas de minigeração, após esse prazo é enviado o parecer de acesso e o contrato entre o cliente e concessionária, após isso é feita a execução e uma vistoria com a finalidade de comparar o que foi descrito no projeto, emitindo um relatório da vistoria e por último, se foi atendido todas as exigências, vem a conexão junto a concessionaria (COSERN, 2018). Na Figura 48 demonstra todo o processo requerido.

Figura 48: Processo para a participação dos sistemas de mini e microgeração distribuída.



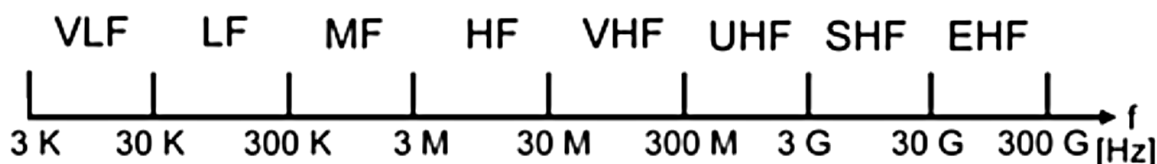
Fonte: Adaptado de COSERN, 2018

4. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

A cronologia da comunicação sem fio segue juntamente com o estudo do eletromagnetismo de Maxwell (1873), a comprovação das ondas eletromagnéticas pelo experimento de Hertz (1887) e a primeira transmissão transatlântica feita por Guglielmo Marconi em 12 de dezembro de 1901, onde o experimento consistia do envio de um sinal do Reino Unido para o Canadá. O termo comunicação sem fio teve duas definições na história da comunicação com dois significados diferentes. Inicialmente o termo foi utilizado para definir o sistema que depois passou a ser chamado de rádio transmissor em meados de 1920. Em torno de 1980 o termo ressurgiu sendo utilizado para qualquer tipo de tecnologia que fizesse comunicações sem utilizar fios (ROCHOL, 2018).

Os canais em sistemas de rádio frequência são separados e compreendidos no espectro de frequência que é definido pela Anatel como sendo um recurso limitado e público. Sendo assim para que não ocorra interferência causada pelo acúmulo de transmissão em uma mesma faixa de frequência, se faz necessário a existência de órgãos responsáveis pela regulação e administração deste espectro (ANATEL, 2020). A Figura 49 mostra a divisão do espectro de frequência e suas faixas que são compreendidas entre 3 kHz até 300 GHz.

Figura 49: Divisão do Espectro do Rádio



Fonte: Adaptado de MAIA, 2015

Assim como visto na Figura 49, as faixas de frequências, tem as seguintes características e significados:

- VLF (Frequência muito baixa), com ondas miriâtricas equivalente a 10.000 metros. Abrange as frequências de 3 kHz a 30 kHz, utilizadas em sistemas de rádio para grandes distâncias;
- LF (Baixa frequência), compreende as frequências de 30 kHz a 300 kHz, tem ondas quilométricas, usada em navegação marítima e aérea;
- MF (Média frequência), abrange frequências de 300 kHz a 3.000 kHz, tem ondas hectométricas (0,1 a 1 Km), aplicadas em radiodifusão;

- HF (Alta frequência), faixa de 3 MHz até 30 MHz, com comprimento de onda de 10 a 100 metros (ondas decamétricas), utilizadas em comunicações de longa distância;
- VHF (Frequência muito alta), com ondas métricas que vão de 1 a 10 metros na faixa de frequência de 30 MHz a 300 MHz, aplicadas em sistemas de Televisão e rádio FM;
- UHF (Frequência ultraelevada), tem ondas decimétricas na faixa de frequência de 300 MHz a 3.000 MHz, ondas de 10 a 100 centímetros, aplicadas em radares, navegação aérea e televisão;
- SHF (Frequência super alta), compreende as frequências da faixa de 3 GHz a 30 GHz, com comprimento de ondas de 1 a 10 centímetros, por isso o nome de ondas centimétricas, principal utilização é em enlaces de rádio e radares.
- EHF (Frequência extremamente elevada), engloba as frequências entre 30 GHz a 300 GHz suas ondas são milimétricas indo de 1 a 10 milímetros (MORÃES, 2001).

Dentro de cada faixa de frequência, tem suas devidas atribuições, sendo no Brasil determinadas pela ANATEL, onde podem ser aplicadas para fins militares, serviços de telecomunicações, serviços de radiodifusão, serviços de emergência e de segurança pública dentre outras atividades de telecomunicações.

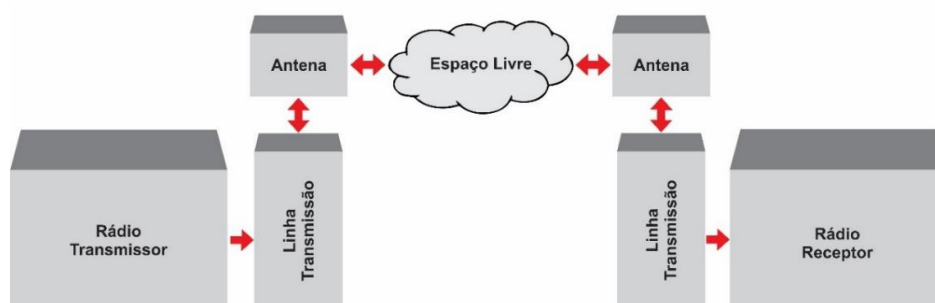
Atualmente há algumas tecnologias sem fio mais difundidas e utilizadas, se destacando das demais, são as tecnologias: *LTE*, *LTE-Advanced*, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, dentre outras. O mundo contemporâneo utiliza as comunicações sem fio em uma grande diversidade de dispositivos e contextos. Entre esses usos podemos citar a rede sem fio, o telemóvel (telefone celular), o Assistente Pessoal Digital (PDA), o dispositivo GPS, o controle automático de porta comum ou de porta de garagem, o mouse sem fio, o teclado sem fio, o headset de computador, a televisão por satélite artificial e o telefone sem fio. (RAPPAPORT, 2009)

4.1. SISTEMA DE RÁDIO ENLACE

Consiste na comunicação entre dois rádios, um na função de transmissão e o outro com a função de recepção, utilizando ondas de rádio frequência para a transmissão de dados. Sendo que para se ter a transmissão de dados este sistema tem que atender os requisitos para que seja possível a comunicação. Os requisitos são uma potência mínima para a transmissão, níveis mínimos de distorção na propagação do sinal e integridade dos dados transmitidos, para isso os requisitos anteriores tem que ser mantidos dentro de uma faixa de tolerância, pois decorrente

de alterações dos parâmetros do sistema ou no espaço livre, esses dados podem chegar ao receptor faltando dados assim perdendo a completude. Com isso afirma-se que o rádio enlace é constituído por um conjunto de equipamentos que consiga estabelecer uma comunicação de rádio entre dois pontos ou mais, sendo os elementos básicos para que isso seja possível: rádio transmissor, linha de transmissão da transmissora, antena transmissora, meio de propagação, antena receptora, linha de transmissão da receptora, rádio receptor (GOMES, 2013). Na Figura 51 demonstra por uma ilustração de como é a organização básica de um sistema de rádio enlace ponto-a-ponto.

Figura 50: Componentes básicos de um rádio enlace ponto-a-ponto.



Fonte: Adaptado de GOMES, 2013.

O sistema de rádio possui forte emprego por prover o alcance a regiões distantes e de difícil acesso, ou quando há necessidade de assegurar uma ligação de forma rápida, flexível, assim se sobressaindo para as localidades, sendo geralmente metrópoles superpopulosas, no qual lançar um cabo de fibra ótica pode se tornar inviável devido, as leis de zoneamento municipal, demandar muito tempo e um custo elevado.

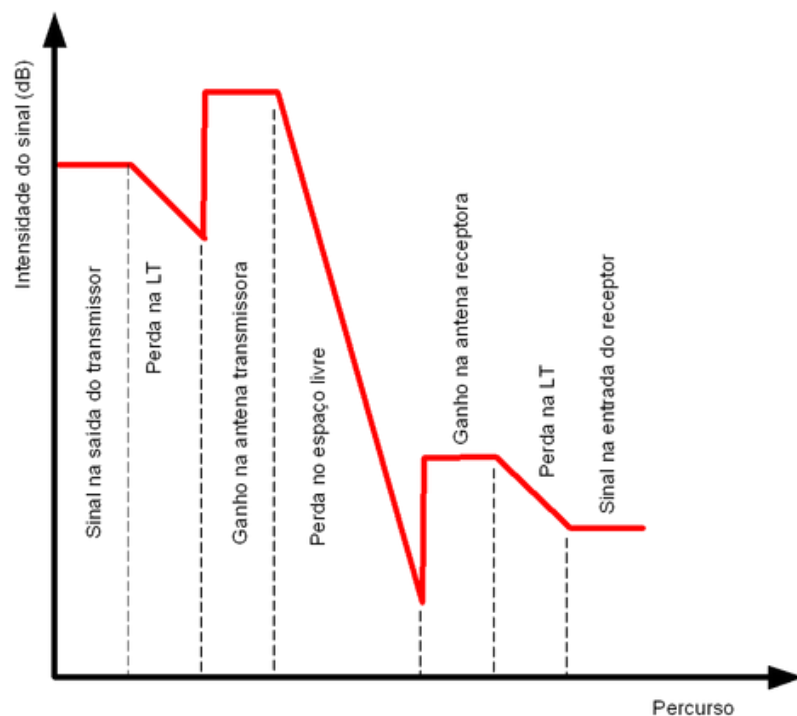
As principais aplicações para os rádios enlaces, em conjunto com outros meios de acesso são:

- Redes de transporte das operadoras de telefonia regionais e de longa distância são utilizadas para os *backbones*, que são as redes principais, para os entroncamentos secundários, de longa distância ou para redes metropolitanas;
- Redes Corporativas com a finalidade de interligação de suas unidades com a unidade central, localizadas em metrópoles, outras cidades ou estados;
- Rede de transporte das operadoras de sistemas celulares fixos ou móveis – utilizado para a conexão entre as Estações Rádio Bases (ERB) e a Central de Comutação e Controle (CCC) chamados de *backhails* e entre as CCCs e as operadoras das redes fixas, principalmente nas regiões metropolitanas;

- Rede de distribuição de sinais de televisão onde as operadoras de televisão regionais distribuem seus sinais, desde as centrais de geração até os pontos de difusão ou as unidades móveis de reportagem, para transmissões ao vivo, realizando links moveis;
- Rede privada das operadoras de sistemas de utilidade pública utilizada para prover a comunicação de sinais de voz ou de dados de comando entre as subestações;
- Rede de distribuição dos provedores Internet – para interligarem seus assinantes de forma rápida e personalizada, ou para efetuarem a conexão de seus equipamentos centrais com seus provedores (SILVA, 2016).

Pela Figura 51 tem-se uma representação do comportamento do sinal na saída do transmissor até o receptor e por meio da mesma é visualizado as atenuações e ganhos do sinal. Sendo possível observar que após a saída do sinal do transmissor, ocorrer perda na linha de transmissão, quando o sinal é recebido na antena, o sinal é amplificado decorrente do ganho da antena transmissora, propagando-se no espaço livre, ocorrendo uma atenuação considerável decorrente da estabilidade do espaço livre, o sinal captado pela antena é amplificado decorrente do ganho da antena receptora, havendo novamente perda de sinal na linha de transmissão e por fim o sinal chega ao receptor após as diversas variações no seu percurso.

Figura 51: Comportamento do sinal ao longo do percurso.



Fonte: ALFACOMP, 2018.

É determinado a viabilidade de um enlace quando a intensidade calculada do sinal recebido é maior do que o nível de sensibilidade do receptor, guardada a margem de segurança (ALFACOMP, 2018). O cálculo da intensidade de sinal recebido é dado pela Equação 48.

$$R_x = T_x - P_t + G_t - A_0 + G_r - P_r \quad (48)$$

Para que:

R_x – Sinal recebido (dBm).

T_x – Potência de saída do rádio transmissor (dBm);

P_t – Perda por atenuação no cabo da antena transmissora (dB);

G_t – Ganho na antena transmissora (dBi);

A_0 – Atenuação no espaço livre (dB);

G_r – Ganho da antena receptora (dBi);

P_r – Perda por atenuação no cabo da antena receptora (dB);

4.2. SISTEMAS DE VISADA DIRETA

No momento em que uma onda eletromagnética se propaga pelo espaço livre de um ponto para outro, alguns fenômenos acontecem, conhecidos como fenômenos de propagação. Esses fenômenos são:

- Desvanecimento – Representa alterações observadas na onda eletromagnética em atenuações, reforço e distorções no sinal ao transpassar o espaço livre e atingir o sistema de recepção;
- Difração – ocorrendo na existência de um bloqueio da onda eletromagnética, pela existência de um obstáculo opaco com dimensões bem maiores que o comprimento de onda do sinal de rádio, acontecendo comumente na borda do obstáculo onde as ondas são espalhadas. Sendo uma alternativa quando não se tem a visada direta, permitindo a recepção do sinal em ambientes mais distantes.
- Reflexão – no instante que uma onda eletromagnética colide com um obstáculo com dimensões maior que o comprimento de onda irradiada. A onda refletida pode ter intensidade maior que a intensidade que chega no receptor, assim podendo haver instabilidade no sinal.

- Dispersão ou espalhamento – sendo considerado o fenômeno de menor previsibilidade, devido ao espalhamento em diversas direções da onda eletromagnética, esse fenômeno é parecido com a difração e decorre da existência de algum bloqueio por um obstáculo que tem as dimensões equiparadas ao comprimento de onda da frequência de operação do sistema de rádio enlace.

- Refração – Ocorre quando a propagação das ondas eletromagnéticas não acontece em linha reta, se inclinando em relação ao vetor normal, decorrente da instabilidade do índice de refração da atmosfera. Com isso o alcance de cobertura de um transmissor pode ser maior que o teórico, porém existirá flutuações no nível da intensidade do sinal recebido em função das variações nos parâmetros atmosféricos (PIAU, 2013).

Por meio da Figura 52 é demonstradas as propagações das ondas eletromagnética através de diferentes percursos entre o transmissor e o receptor, têm-se os seguintes percursos de propagação:

A – Refração das camadas Ionosféricas.

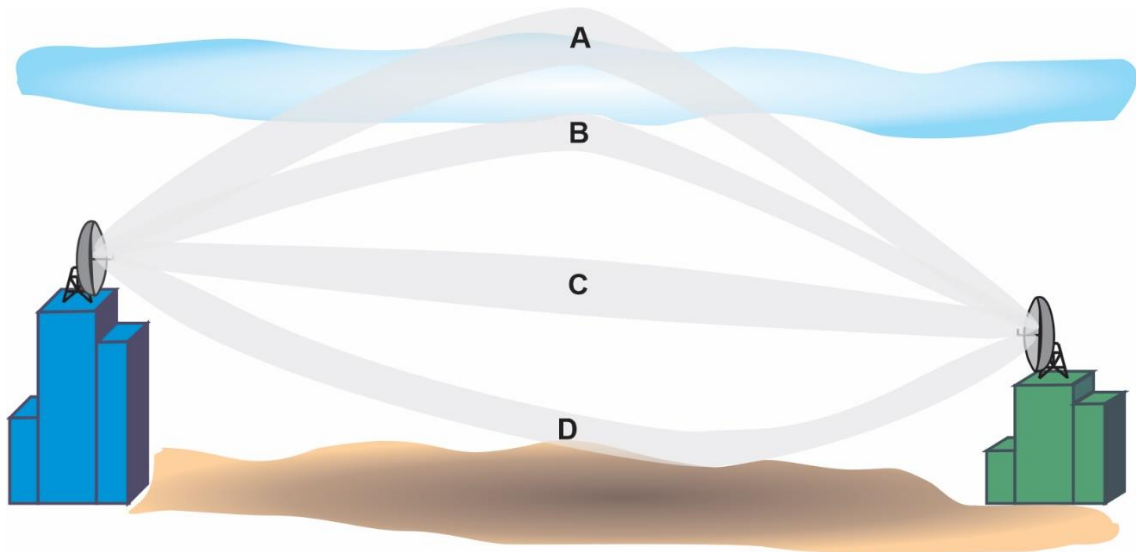
B – Refração das camadas Troposféricas.

C – Linha de visada.

D - Reflexões do terreno.

Fazendo uma análise da Figura 52, é constatado que o trajeto C é o que leva o menor tempo para propagação entre as duas antenas, decorrente da distância que a onda se propaga ser menor. Os outros percursos que a onda pode se propagar são por meios das reflexões fixas ocasionados pelo perfil topográfico do terreno em D. No trajeto B são as reflexões ocasionadas pelas mudanças nas camadas troposféricas e nuvens, ou, nas camadas ionosféricas em A. Quando as ondas eletromagnéticas atingem a antena, os fenômenos citados anteriormente são somados, e o resultado final prejudica o sinal originalmente transmitido. Cada um dos dois tipos de perturbação pode ter uma diferença no tempo em relação ao trajeto direto, resultando em soma ou subtração entre eles, dependente ou não da frequência (FELICE, 2005).

Figura 52: Principais mecanismos de propagação: (A) Refração das camadas Ionosféricas, (B) Refração das camadas Troposféricas, (C) Linha de visada e (D) Reflexões do terreno.



Fonte: Adaptado de Felice, 2005.

Como constatado na Figura 52, a situação mais simples de transmissão de um sinal entre um transmissor e um receptor é por visada direta, possível na teoria no qual se tem um ambiente completamente desobstruído (DIAS et al., 2016). Por meio da Equação 49, é possível calcular a perda no espaço livre.

$$A_0 = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (49)$$

Onde:

A_0 – Atenuação no espaço livre;

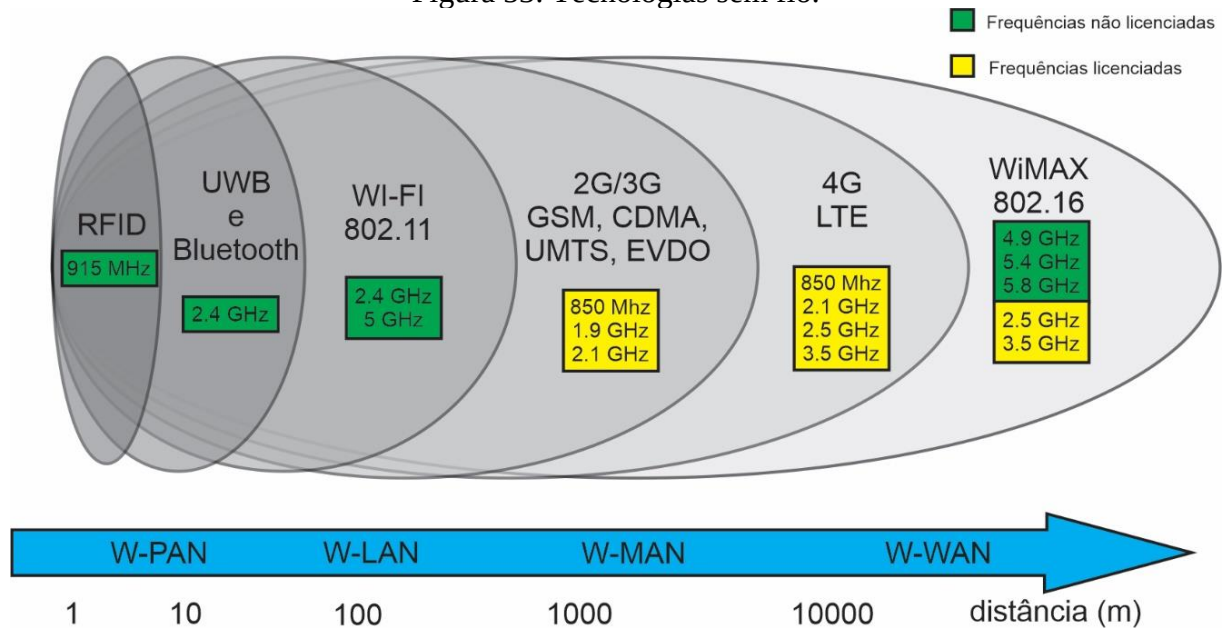
f_{MHz} – Frequência utilizada no *link*;

d_{km} – distancia entre os dois pontos do link.

4.3.TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO

Diferentes tecnologias na comunicação foram desenvolvidas no decorrer tempo, com a finalidade de suprir as novas demandas das tecnologias que surgem a cada instante (BEZERRA, 2019). Por meio da Figura 53 é visualizado algumas tecnologias atuais de comunicação sem fio, com suas frequências de operações e escala de alcance.

Figura 53: Tecnologias sem fio.



A tecnologia RFID (*Radio-Frequency IDentification*) que utiliza frequência não licenciada de 915 MHz tem aplicação voltada para identificação, rastreamento, controle de acesso e estoque, uma de suas características é o curto alcance, limitado a poucos metros.

Aplicado em interconexão de periféricos e transferência de voz, áudio e dados, as UWB (802.15.3) e *Bluetooth* (802.15.1) fazem uso da frequência 2,4 GHz, sendo uma frequência não licenciada, tem como características baixa velocidade de transferência e curto alcance.

O sistema de comunicação sem fio Wi-Fi (802.11) opera em duas frequências 2,4 GHz e 5 GHz, sendo as frequências compartilhadas no espectro com outras tecnologias, é aplicado a comunicação de dados em LANs e *VoiP* (*Voice over Internet Protocol*), utilizado em sistemas de comunicação *indoor*.

Voltados principalmente para serviços de telefonia móvel e com acesso rápido à internet, as tecnologias 2G/3G *GSM*, *UMTS* e *EVDO* usa as frequências licenciadas 850 MHz, 1,9 GHz e 2,1 GHz, já o 4G LTE faz uso das frequências 850 MHz, 2,1 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz sendo essas frequências licenciadas. A tecnologia 4G LTE possui uma taxa de dados maior que as outras tecnologias, possibilitando vídeo chamada pelo telefone móvel.

Utilizando as frequências licenciadas 2,5 GHz e 3,5 GHz e também frequências não licenciadas 4,9 GHz, 5,4 GHz e 5,8 GHz, o WiMAX (802.16) é aplicada em *backbond*,

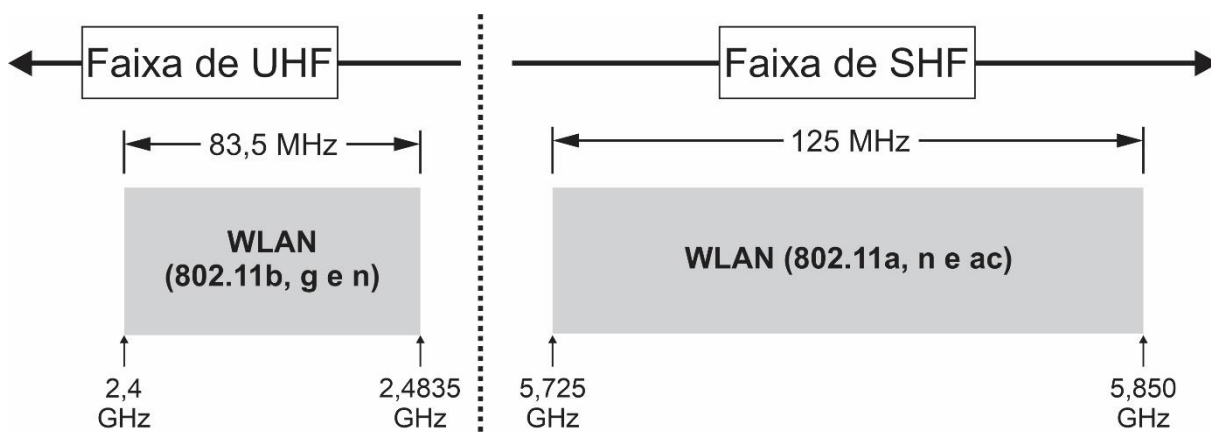
backhaul. Assim empregado a multisserviços e comunicações a longa distâncias, as desvantagens dessa tecnologia são o alto custo e a baixa mobilidade (JAMHOUR, 2017).

4.3.1. Rede Sem Fio – WLAN

A tecnologia está entre as mais adequada para automação de processos é a WLAN (*Wireless Local Area Network*), que pode ser entendida como a Ethernet sem fio. Esta foi a primeira designação deste tipo de tecnologia. Tem como principal objetivo a aplicação em ambientes interno, alcançando um raio de 100 metros. Conhecido também como WiFi (*Wireless Fidelity*) o padrão mais disseminado é o IEEE 802.11 (BRANQUINHO; REGGIANI; ANDREOLLO, 2011).

A rede WLAN utiliza as faixas de frequências de 2,4 GHz e 5 GHz da banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que são faixas de frequências não licenciadas voltadas para utilização e pesquisas aplicadas a indústria, ciência e aplicações médicas. As faixas utilizadas pela rede WLAN estão contidas nas faixas UHF e SHF, sendo a faixa de 2,4 GHz e a faixa de 5 GHz, respectivamente. A faixa de 2,4 GHz tem uma largura de banda de 83,5 MHz iniciando em 2,4 GHz e indo até 2,4835, aplicadas para os protocolos 802.11b, g e n, já a faixa de 5 GHz é aplicado aos protocolos 802.11a, n e ac, com uma largura de banda de 125 MHz, dentre as faixas de frequência de 5 GHz da ISM a utilizada é a que se inicia em 5,725 GHz a 5,85 GHz (ROCHOLL, 2018). Por meio da Figura 54 é possibilitado uma melhor visualização das bandas de frequência utilizadas pela rede WLAN (IEEE 802.11).

Figura 54: Bandas de frequência ISM utilizadas em redes WLAN (IEEE 802.11).



Fonte: Adaptado de ROCHOL,2018.

Fazendo uso da radiofrequência para a transmissão de dados, por meio de três técnicas conhecidas como *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), as escolhas entre essas técnicas dependerão de fatores relacionados com a aplicação dos usuários e o ambiente onde a rede operará. Essas técnicas utilizam diversos canais disponíveis nas frequências diferentemente de outras técnicas que faz uso de apenas um canal, permitindo assim uma transmissão simultânea de vários quadros.

A técnica de transmissão DSSS emprega um método designado Sequência de Barker para o espalhamento do sinal por meio de apenas um canal sem modificar as frequências. Opera na faixa de frequência de 2,4 GHz da banda ISM, podendo chegar a taxas de 11 MB/s. O FHSS faz o espalhamento do espectro dividindo a banda total em diversos canais com largura de aproximadamente de 1 MHz, operando também na banda ISM de 2,4 GHz, essa técnica de transmissão atinge taxas inferiores quando comparadas com a técnica DSSS, atingindo no máximo 2 MB/s. Com transmissões realizadas em distintas frequências simultaneamente por sub portadores moduladas a técnica de transmissão OFDM pode alcançar velocidades de até 54 MB/s, em suma a técnica fraciona uma única transmissão em diversos sinais com menor ocupação espectral (MIGUEL, 2015).

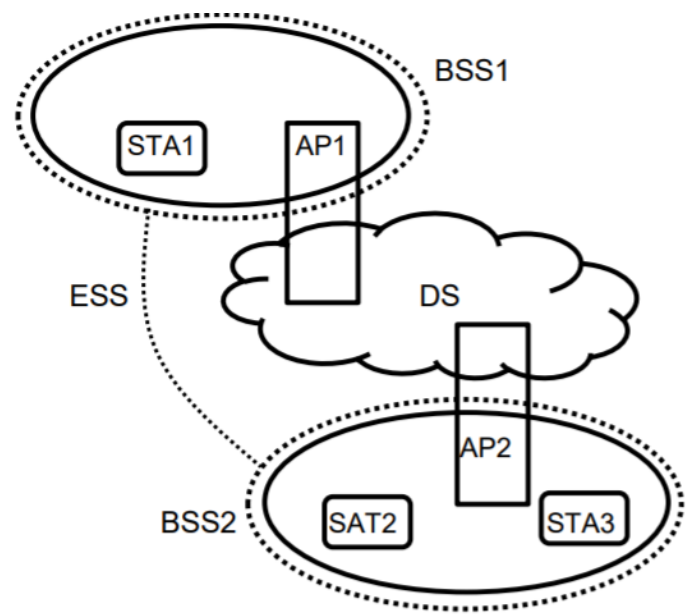
4.3.2. PADRÃO IEEE 802.11

Tem como base uma arquitetura do tipo célula, com arquitetura similar a aplicada ao sistema de telefonia móvel. Sendo o padrão 802.11 um conjunto de normas, padrões e tecnologias para transmissão em redes sem fio. A primeira versão do padrão surgiu em 1997 e seguiu sendo difundida em diversos ambientes, no qual se faz necessário a comunicação sem fio. A evolução do padrão 802.11 surgiu naturalmente com a necessidade de fornecer taxas de transmissão mais alta decorrente das evoluções nos sistemas de telecomunicação, tais como telefones celulares modernos com acesso a internet e laptops demandando cada vez mais velocidade e estabilidade do sinal (BUTLER et al., 2013)

A estrutura e arquitetura do padrão 802.11 consiste em diversos componentes sendo formada por um grupo de estações (STAs) tendo como entrada o *Access Point* (AP), tornado esse conjunto um *Basic Service Set* (BSS) de uma rede 802.11. Permitindo conectar diversos e diferentes BSS de uma rede 802.11 através de seus respectivos APs utilizando um sistema

denominado de *Distribution System* (DS) que é basicamente um *backbone*, sendo que o DS não faz parte da padronização do IEEE 802.11, podendo ser qualquer rede local proveniente de qualquer protocolo IEEE 802.x ou internet. (MORAES, 2010). A Figura 55 ilustra os componentes da arquitetura.

Figura 55: Componentes da arquitetura da rede.



Fonte: Adaptado de IEEE standard 802.11, 2012.

Com diversas atualizações foram surgindo diferentes variações do protocolo 802.11 com algumas frequências, larguras de banda e velocidades transferências distintas, por meio da Tabela 7 é demonstrado as diferenças em cada uma de suas variações.

Tabela 7: Protocolos IEEE 802.11.

Protocolo	Frequência (GHz)	Largura de Banda por canal (MHz)	Numero de canais	Velocidade máxima de transferência (MB/s)
802.11	2,4	5	14	2
802.11b	2,4	20	11	11
802.11a	5	20	23	54
802.11g	2,4	20	3	54
802.11n	2,4 ou 5	20 ou 40	26	500
802.11ac	5	80 ou 160	6 ou 2	6900

Fonte: Adaptado de MIGUEL, 2015.

Como visto na Tabela 7, os padrões IEEE 802.11 trazem algumas variações e melhoramento nas taxas de velocidade, mais informações sobre as variações do padrão podem ser vistas a seguir:

- 802.11 – Desenvolvida em 1997 utilizando a técnica de transmissão FHSS, transmitindo na faixa de frequência de 2,4 GHz da banda ISM, contendo 14 canais com uma largura de banda de 20 MHz e atingindo uma taxa de transferência máxima de 2 MB/s (BUTLER et al., 2013).

- 802.11b – Sendo a primeira atualização desde do surgimento do padrão 802.11, foi o primeiro padrão *wireless* difundido em maior escala, com isso popularizando a tecnologia, com isso reduzir os valores de custos decorrente do aumento da demanda e concorrência. Utiliza a técnica DSSS transmitindo na banda ISM de 2,4 GHz dentro dessa faixa de frequência comportando 11 canais com defasagem de aproximadamente de 5 MHz e uma largura de banda de 20 e atingindo uma velocidade máxima de transmissão de até 11 MB/s (MAZZER, 2016).

- 802.11a – Homologada no final de 1999, sua principal característica é a possibilidade de transmitir dados a uma taxa de 54 MB/s, sendo alterada a frequência de operação para a ISM de 5 GHz, fazendo o uso da técnica OFDM. Seus 23 canais têm uma largura de banda de 20 MHz (MENDES, 2011)

- 802.11g – Esse padrão foi disponibilizado em 2003 é considerado a junção entre 802.11b e 801.11a pois utiliza característica de ambos protocolos, operando na frequência de 2,4 GHz e fazendo uso do DSSS e OFDM, utilizando 3 canais que não se sobre põe com largura de banda de 20 MHz e atingindo taxas de transmissão de até 54 MB/s (MIGUEL, 2015).

- 802.11n – Sucedendo o 802.11g foi homologado no final de 2009, faz uso do *Multiple Input, Multiple Out* (MIMO-OFDM) com isso se tem um aumento considerável na taxa de transmissão podendo chegar a 500 MB/s, opera na banda ISM de 2,4 GHz e 5,8 GHz a largura de banda de seus canais podem variar de 20 MHz e 40 MHz, contendo 26 canais (MENDES, 2011)

- 802.11ac – Foi desenvolvida em 2014 com o objetivo de substituir as redes cabeada, pois tem como principal objetivo de transmitir dados a uma velocidade superior a 1 GB/s, decorrente disso é conhecida como “*Gigabit Wifi*”. Opera na faixa de frequência de 5 GHz, a taxa de velocidade máxima é de 6,9 GB/s, como tem duas larguras de bandas de 80 MHz e 160 MHz, se tem também duas variações de quantidades de canais sendo para a largura de banda de 80 MHz seis canais e para a de 160MHz dois canais (VAVER, 2017).

5. PLATAFORMA, SENSORES / ATUADORES UTILIZADOS PARA TELEMETRIA

Tendo como objetivo mensurar e medir parâmetros, a telemetria na atualidade tem papel fundamental no desenvolvimento da engenharia nos mais diversos ramos, decorrente da evolução nos modos de aquisição de dados das grandezas físicas tais como temperatura, velocidade e iluminação (WEBSTER, 1999). A composição básica para um sistema de telemetria é:

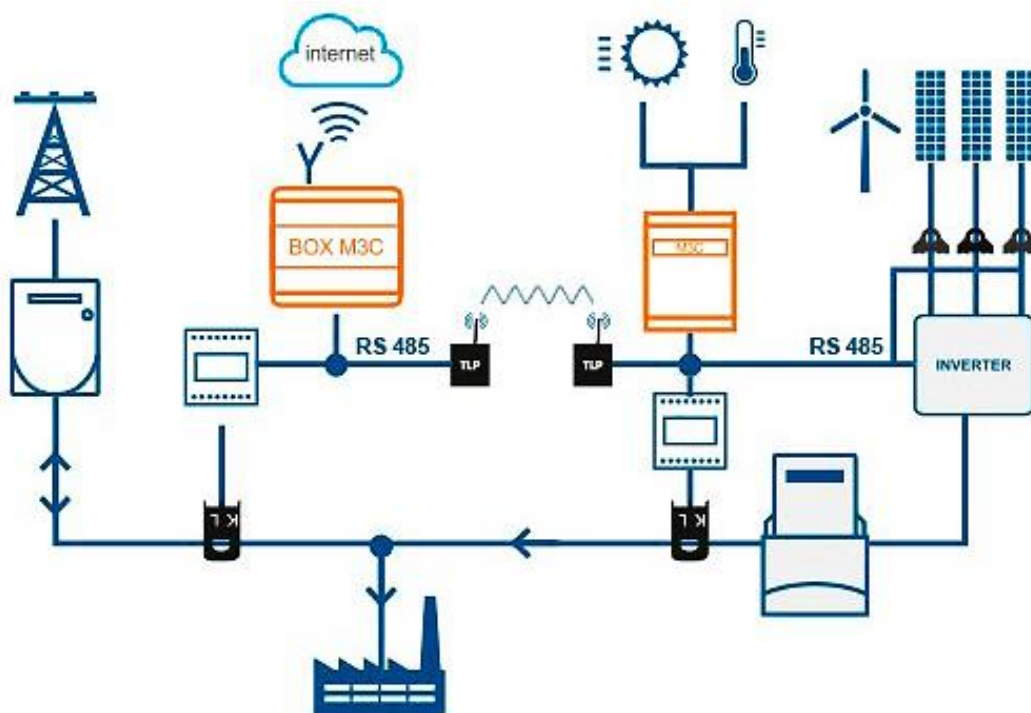
- *Hardware*: responsável pela aquisição e processamentos dos dados, por meio de sensores e microcontroladores. É a parte física do sistema onde se é conectado seus periféricos como os sensores e atuadores.
- Sistema de transmissão de dados: tendo como função o envio dos dados obtidos pelo *hardware* para o usuário que irá realizar o monitoramento. O envio de dados pode ser feito por meio de cabos para sistemas que a aquisição dos dados a exposição dos dados são em pequenas distâncias, a exemplo em plantas industriais, ou por meio *wireless* (sem fio) utilizado anteriormente somente para longas distância, porém com a evolução e popularização das tecnologias sem fio esse tipo de transmissão tem sido utilizado até a curtas distâncias. Uma tecnologia usual para a transmissão dos dados oriundos de telemetria é por meio GSM (*Global System for Mobile Communications*) decorrente de toda infraestrutura, por se tratar de uma tecnologia utilizada para a telefonia. Atualmente, outras tecnologias estão sendo implementadas nos sistemas de telemetria, como por exemplo a comunicação LoRa.
- *Software* para supervisão: este sistema é responsável pela interação entre o usuário que irá realizar o monitoramento e o sistema monitorado em si (STAVARENGO, 2006).

Como apresentado previamente, um exemplo de ambiente que se faz uso de sistemas de telemetria cabeados é o ambiente industrial. Na indústria, a telemetria tem sido aplicada no monitoramento e na realização de ações relacionadas a parâmetros lidos de uma determinada máquina. Outro exemplo são usinas hidroelétrica, que por exemplo, um operador pode monitorar a vazão de água que passa pela barragem e, caso necessário, abrir uma comporta para que se aumente essa vazão. Ambas as ações de monitoramento e de uma possível abertura de comporta - podem ser tomadas a muitos metros de distância de onde elas de fato irão acontecer.

A Figura 56 demonstra um esquema de sistema de telemetria, nesse caso aplicado ao um sistema de potência de geração de energia elétrica, sendo possível visualizar como funciona esse sistema de telemetria que por meio de sensores de corrente capta a geração e envia para

central a quantidade de gerada para a concessionaria que recebe o sinal por meio de sistema sem fio.

Figura 56: Sistema de telemetria aplicado a sistemas de geração de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de SHT TELEMETRIA, 2020.

5.1. FERRAMENTAS DE PROTOTIPAGEM – ARDUINO

O Arduino é uma plataforma de prototipagem de *hardware* livre e *software* adaptável de fácil compreensão, possibilitando o controle das entradas e saídas do dispositivo ou de componentes conectados a ele. A funcionalidade do arduino é ampla, podendo servir para simples tarefas como acionamentos pré-programados ou mais complexos como micro servidores, coletando dados através de sensores e armazenando ou enviando via internet. Com projeto iniciado em 2005 na Itália por Massimo Benzi, tendo como foco inicial desenvolver projetos simples a educação básica, com custos reduzidos para que com isso fosse possível introduzir a robótica nas camadas mais baixas da educação (MCROBERTS, 2011).

O conceito do que seria um *hardware* livre é análogo ao o que seria *software* livre, que seria basicamente um programa de código aberto, onde qualquer indivíduo teria acesso ao seu código fonte, com isso possibilitando modificações decorrentes as necessidades do

programador. Com isso o entendimento do que seria *hardware* livre, são basicamente circuitos eletrônicos que podem ser utilizados e alterados sem restrições ou necessidade de se pagar pela utilização do bem intelectual, sendo disponibilizado pelo desenvolvedor para que o projeto dele evolua, um exemplo dentre muitos é o arduino contando com diversas variações e inúmeras melhorias, para as mais diversas aplicações (FONSECA, 2017). Na Figura 57 têm-se algumas versões do arduino, UNO, Leonardo, Mega 2560, LilyPad, nano, dentre outros.

Figura 57: Tipos de arduino.

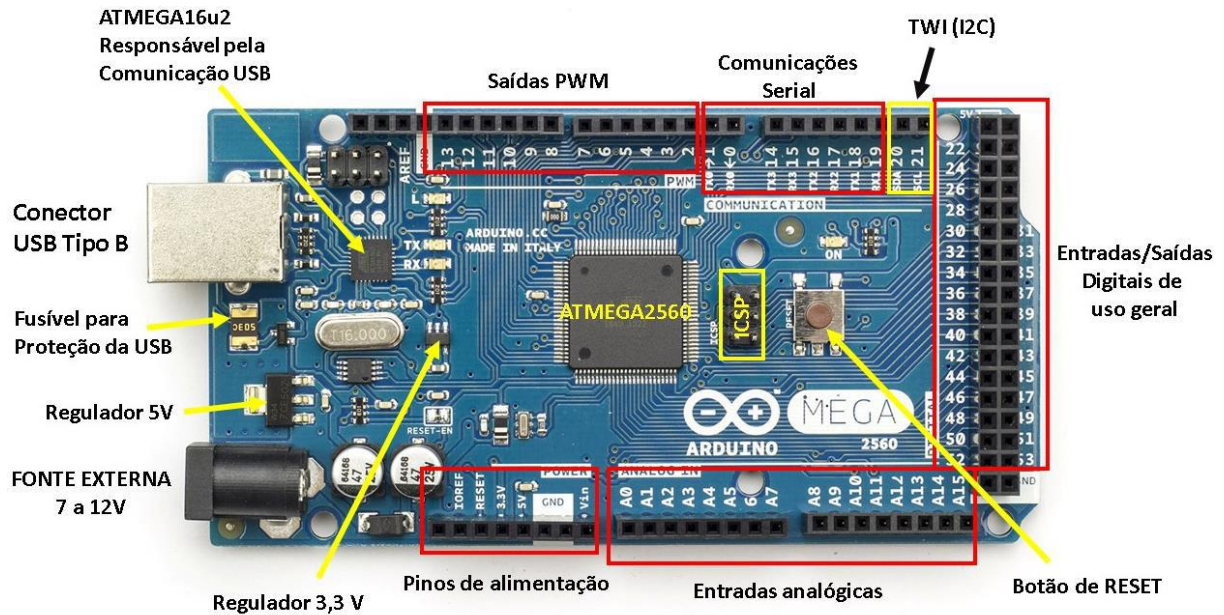


Fonte: ELECTRONICS, 2016.

5.1.1. Hardware

O *hardware* em comum do arduino está dividido em partes que compreendem um circuito destinada a alimentação com entrada e saída de alimentação, a comunicação com o computador via interface USB e o microcontrolador que é responsável pelo processamento dos comandos, leitura e controle das ações programadas em si (NÚÑEZ, 2012). A Figura 58 demonstra a imagem do Arduino MEGA 2560.

Figura 58: Arduino MEGA2560.



Fonte: SOUZA, 2018.

A alimentação do arduino ocorre através da USB ou pelo conector Jack. Quando é utilizado a alimentação externa feita pelo conector Jack, é recomendado que o nível de tensão fique na faixa de 7 V a 12 V (BLUM, 2016). Os pinos responsáveis pela alimentação de módulos externos ou *Shields* são: IOREF, 3,3 V, 5 V, GND e V_{in} (BANZI, 2011).

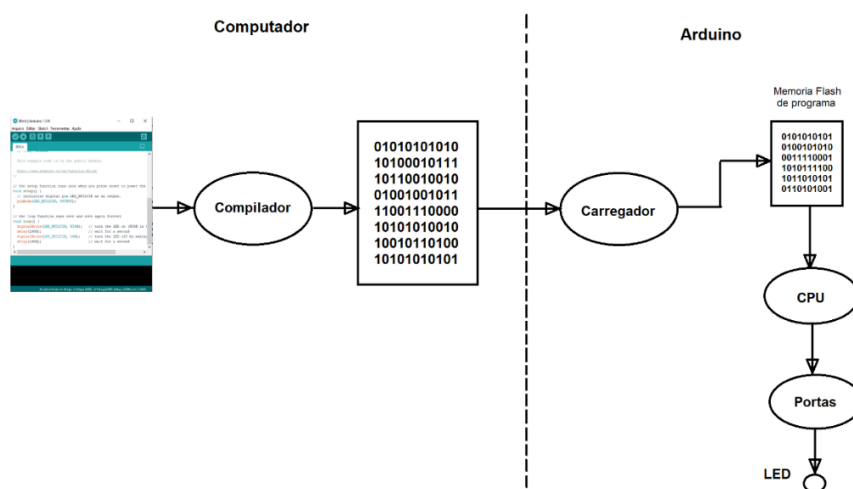
A comunicação USB é feita por meio do microcontrolador ATMEGA16U2 da fabricante ATMEL, permitindo uma comunicação fluida dos *uploads* dos programas escrito pelo usuário. Para indicação do sentido do fluxo de dados, dois *LEDS* um TX para envio e um RX para recepção de dados do microcontrolador para o computador.

No Arduino o microcontrolador mais potente implementado é o ATmega2560 que é um microcontrolador de 8 bits de arquitetura RISC, com 256 KB de Flash, 4 KB de EEPROM e 8KB de memória RAM. Com conexões de entrada e saída permite aumentar as possibilidades de aplicações do Arduino, dentre suas conexões vale destacar quatro canais de comunicação serial, 15 saídas PWM, 16 entradas analógicas e 6 portas que permitem interrupções externas (MICROCHIP, 2019).

5.1.2. Software

Os microcontroladores utilizados pelo arduino são programados na linguagem de programação C por meio do IDE (*Integrated Development Environment*) que é baseado em *processing* que é uma linguagem de programação de código aberto. Para *upload* dos projetos para o arduino se faz necessário estarem conectados ao computador por meio da USB (MONK, 2013). Um breve resumo dos processos ocorridos desde da elaboração programa até sua execução por meio do Arduino é demonstrada na Figura 59, processos esses que são o desenvolvimento da lógica e escrita do programa em C por meio da IDE que analisa se o programa está correto em relação a sua linguagem se todos os comandos estão corretos. Após a constatação que o programa está correto é enviado para o compilador que converte o programa para forma binária, que é como o microcontrolador consegue interpretar, sendo enviado para o carregador no Arduino e armazenado na memória *flash* da CPU, que posteriormente executara a ação determinada no programa desenvolvido (MONK, 2013).

Figura 59: Do IDE para a execução.



Fonte: Adaptado de MONK, 2013

Igualmente ao *hardware* do Arduino, o *software* utilizado pelo Arduino é um *software* livre, sendo adquirido facilmente no site oficial da Arduino e de fácil instalação, com a versão atual 1.8.12, tem disponibilidade para diversos sistemas operacionais de computadores, como Windows, Mac Os e Linux, com isso possibilitando abranger todos usuários interessados em programar e desenvolver em Arduino. O *Software* tem as ferramentas básicas para desenvolver os programas, dentre eles a ferramenta de verificação de código, que tem como função uma

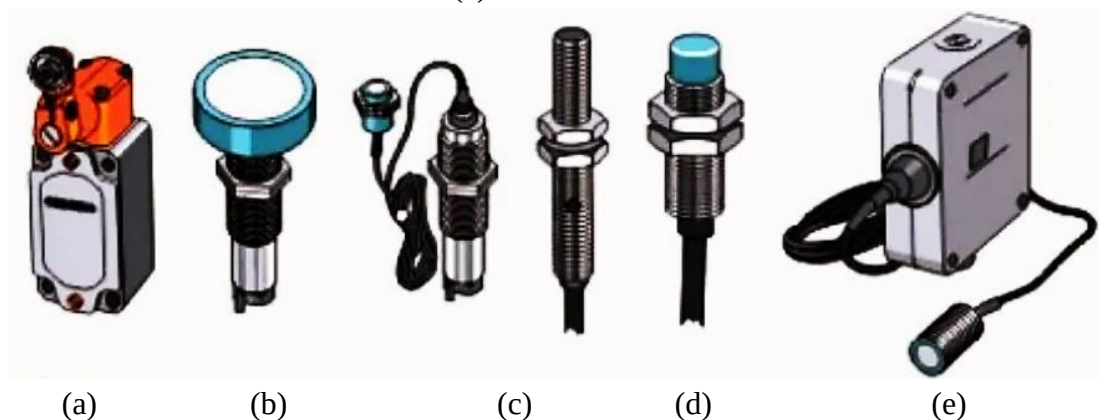
análise prévia do programa que está em desenvolvimento, não permitindo o *upload* para o microcontrolador, outra funcionalidade do *software* utilizado pelo o Arduino é o monitor serial, que por meio dele é possibilitado a interação com o Arduino e observar, por exemplo, dados recebidos pelo o Arduino quando conectado via interface USB. (BLUM, 2016).

5.2. SENSORES E ATUADORES

O termo sensor pode ser empregado para definir dispositivos que de alguma forma é sensível a algum tipo de energia, podendo ser térmica, cinética ou luminosa que está relacionada a uma grandeza que precisa ser mensurada, tais como: temperatura, velocidade e radiação. Com isso é possível afirmar que sensores são dispositivos com a capacidade de transformar grandezas físicas em grandezas elétricas, assim sensores tem como finalidade a aquisição de uma grandeza física convertida em pulso elétrico para que possibilite o monitoramento dessa grandeza (WEBSTER, 1999).

Aplicados para os mais diversos tipos de sistemas, a exemplo sistemas de automação industrial e residencial, com essa diversidade de aplicações se faz necessário uma variedade de sensores para que possibilite suprir essa diversidade. Os sensores podem ser divididos como sensores analógicos que são baseados em sinais analógicos, variando entre diferentes níveis de tensão e sensores digitais que utilizam valores definidos de tensão, assim tendo apenas dois estados o nível de tensão alto (1) e nível de tensão baixo (0). Com uma grande diversidade de tipos de sensores a Figura 60 traz alguns tipos de sensores, como sensores mecânicos, ultrassônicos, indutivos, capacitivos e fotoelétricos. (TECNOCLIP, 2020)

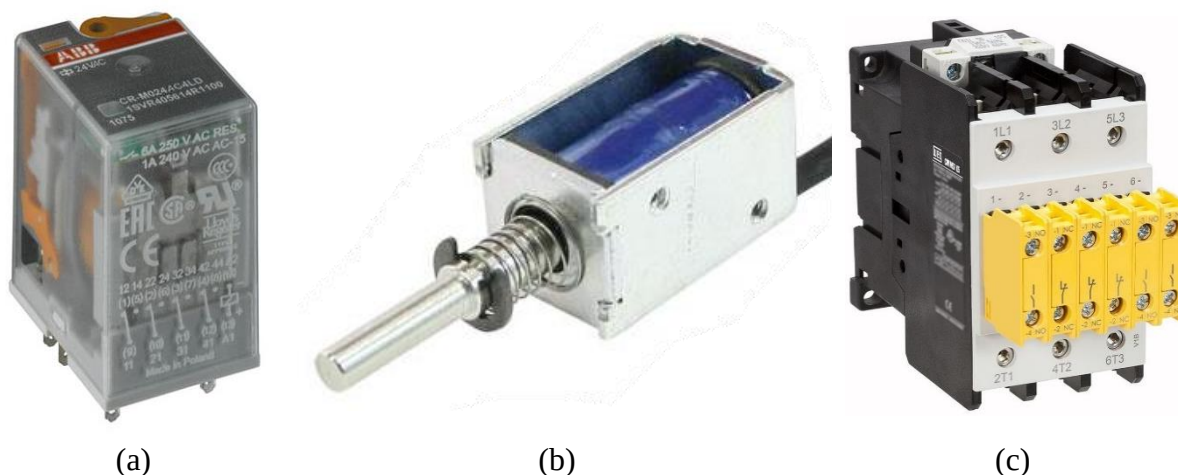
Figura 60: Tipos de Sensores: (a) Mecânicos, (b) Ultrassônico, (c) Indutivos, (d) Capacitivos, (e) Fotoelétricos.



Fonte: Adaptado de TECNOCLIP, 2020.

Os atuadores são os elementos físicos mais próximos dos equipamentos a serem operados, sendo necessários para que as funções ordenadas pelo microcontrolador sejam transformadas em ações. Esses dispositivos são basicamente interruptores e motores eletromecânicos que com o pulso enviado pelo microcontrolador mudando o estado dos atuadores ligando ou desligando. Aplicados em diversos sistemas de automação como industrial ou residencial, em sistemas residenciais podem ser aplicados para acionar cortinas, portões elétricos e a iluminação, dentre os diversos tipos de atuadores temos: relé, solenoides e contadores. A Figura 61 mostra alguns tipos de atuadores (STAVARENGO, 2006).

Figura 61: Atuadores: (a) Relé, (b) solenoide e (c) Contadores.



Fonte: Adaptado de SAKAGUCHI, 2014.

5.2.1. Radiação Solar

Dentre os componentes com a capacidade de variar seus parâmetros por influência da luz, que são os *Light Dependent Resistor* (LDR), fototransistores e fotodiodos para a captação da radiação solar, foram feitos estudos, analisando alguns modelos desses componentes sensíveis a luz, após esse estudo foi constatado que um dos melhores componentes disponível no mercado é o BPW34. A Figura 62 traz o BPW34 sendo possível visualizar sua estrutura e seu encapsulamento.

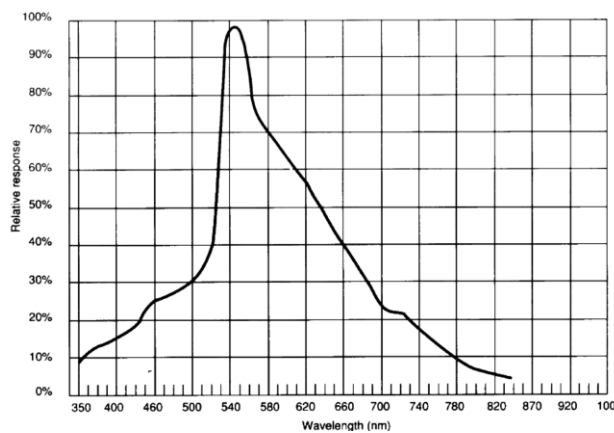
Figura 62: Fotodiodo BPW34



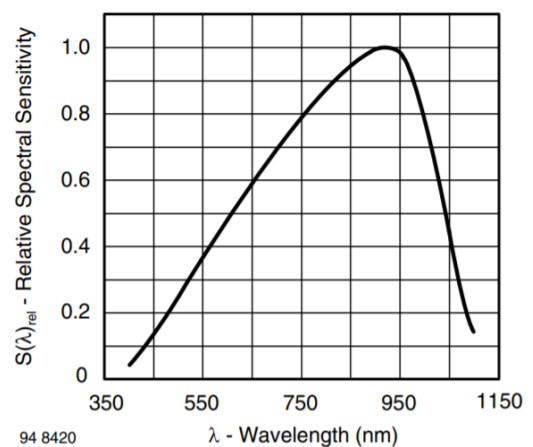
Fonte: UK.RS-ONLINE, 2018.

Sua faixa espectral de captação de luz vai de 430 a 1100 nm e com uma sensibilidade alta para a maior parte de seu espectro, comparando com o LDR (*Light Dependent Resistor*), que tem uma faixa espectral de 350 a 845 nm e uma sensibilidade considerável apenas entre 520 a 580 nm (LAGHROUCHE; ATTAF; ZIANI; AMEUR, 2010). Sendo possível visualizar pela Figura 63, os gráficos de respostas espectral do LDR e do fotodiodo BPW34.

Figura 63: Resposta espectral: (a) LDR e (b) fotodiodo.



(a)



(b)

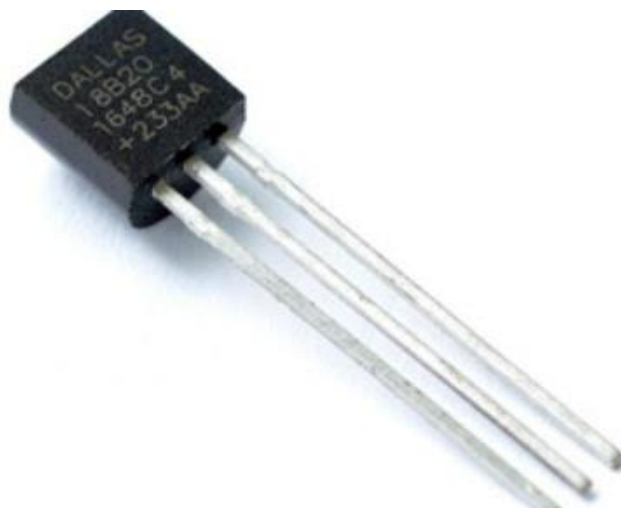
Fonte: Adaptado de LAGHROUCHE; ATTAF; ZIANI; AMEUR, 2010

5.2.2. Temperatura

O sensor *DALLAS ds18b20* produzido pela *Dallas Instruments*, que após um levantamento dos sensores compatíveis com o arduino e de baixo custo disponíveis no mercado, foi constatado que atende as necessidades do projeto, devido a sua precisão que é de aproximadamente $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para a faixa de -10°C a 85°C , porém sua faixa de operação que vai de -55°C até 125°C . O seu encapsulamento o TO-92 permite ficar instaladas na parte posterior dos painéis solares sem causar danos ao mesmo e permitindo uma boa condutividade térmica.

O sensor disponibiliza a temperatura em grau celsius, outra característica que foi relevante para a escolha desse sensor é que ele faz uso de apenas uma porta digital reduzindo a quantidade e portas necessárias (MAXIM INTEGRATED, 2020). Para que isso seja possível o Dallas ds18b20 faz uso do protocolo de comunicação *one wire*, que consiste em cada sensor possuir um endereço serial de 64 bits, possibilitando o uso de diversos sensores por meio de uma porta. O Dallas ds18b20 pode ser visto na Figura 64.

Figura 64: Dallas ds18b20.



Fonte: MAXIM INTEGRATED, 2020.

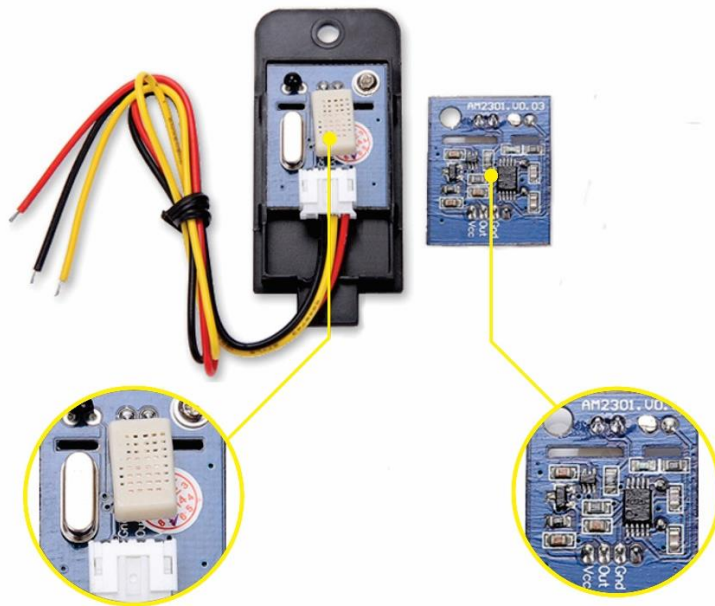
5.2.3. Umidade e Temperatura Ambiente

O sensor que tem como função a obtenção dos dados de umidade e temperatura ambiente é o AM2301 produzida pela empresa Guangzhou Aosong Electronics Co., o mesmo

possui um termopar capaz de medir temperatura e um sensor capacitivo de umidade conectados a um microcontrolador de 8 bits com a finalidade de manter a calibração do sensor e converter o sinal de analógico do sensor resistivos e capacitivos em um sinal digital, Os dados são fornecidos através de sua saída digital tornando os resultados medidos ainda mais precisos.

O sensor tem uma faixa de alimentação de 3,3 V a 5,2 V sendo recomendado pelo fabricante para manter os níveis de precisão uma tensão de 5,0 V com um consumo durante a medição de 500 μ A demonstrando assim seu baixo consumo de energia. A faixa de temperatura medida vai de -40°C a 85°C com uma precisão de 0,5°C a faixa de umidade medida pelo sensor é de 0 %UR a 99 %UR com um precisão de 3 %UR sob a condição de uma temperatura de 25°C essa mesma condição vale para a precisão da temperatura (AOSONG ELECTRONICS CO, 2020). A Figura 65 demonstra o sensor por dentro do encapsulamento, assim possibilitando a visualização do circuito lógico responsável pela calibração e conversão do sinal analógico em digital, também possível observar os componentes que são sensibilizados pela temperatura e umidade.

Figura 65: Sensor de umidade e temperatura ambiente AM2301



Fonte: Adaptado de AOSONG ELECTRONICS CO, 2020.

5.3. ANTENAS PARA TELEMETRIA

Como definido anteriormente, a telemetria pode ser feita por meio de cabos ou sem fio, nos sistemas de telemetria sem fio, se faz necessário uso de antenas para que possibilite a comunicação do sistema de aquisição com o servidor responsável pelo recebimento e tratamento de dados. Como visto no Capítulo 2, há diversos tipos de antenas, com as mais diversas características, fazendo assim necessário analisar as particularidades de cada sistema de telemetria, para que com isso seja definido qual a antena que supre as necessidades de comunicação.

Para sistemas de telemetria de maior porte, com diversos pontos de aquisição de dados se faz necessário uma central responsável pelo recebimento de todos os dados das mais diferentes direções, para que isso seja possível se faz necessário uma antena que tenha como característica o diagrama de radiação omnidirecional, possibilitando a captação de sinal em todas as direções, possibilitando a comunicação e assim recebendo os dados dos sistemas locais de aquisição de dados. A exemplo desse tipo de antena se tem a antena dipolo que tem como uma de suas características o diagrama de radiação omnidirecional, que na Figura 66 traz esse tipo de antena no modelo *HyperLink* HG24 12U-PRO da marca CONECTWI, elaborada para banda ISM 2,4 GHz.

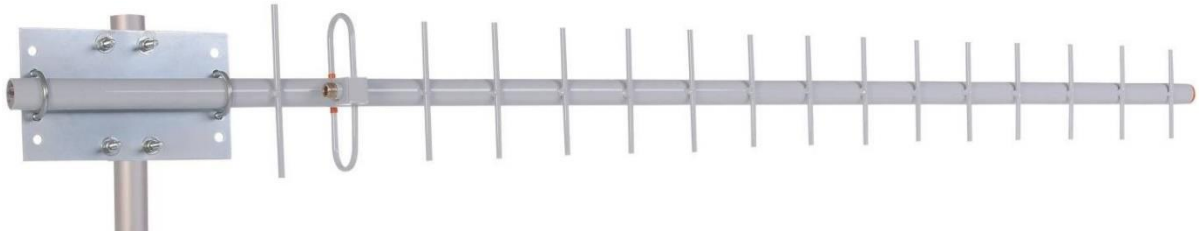
Figura 66: Antena HyperLink HG24 12U-PRO.



Fonte: CONECTWI, 2020.

Diferentemente da antena aplicada a central de recebimento de dados, a antena aplicada a estação responsável pela aquisição de dados, se faz necessário ter características direcionais, pois com o objetivo de enviar dados ao único ponto que é a central, não se faz necessário propagar em diversas direções, com isso, focando em apenas um feixe a antena direcional consegue se comunicar a distâncias maiores decorrente de seu ganho. A exemplo a antena Yagi-Uda CF917 da Alfacom, que foi projetada para operar na frequência de 900 MHz a 960 MHz, com um ganho de 17 dBi, sendo visualizada por meio da Figura 68.

Figura 67: Antena Yagi-Uda CF917.



Fonte: ALFACOMPBRASIL, 2020.

5.3.1. Antena comercial

A antena utilizada foi uma antena do modelo Yagi-Uda da marca ANENG, que como visto anteriormente tem como característica diagrama de radiação direcional e polarização linear, com ganho de aproximadamente 20 dBi, para a faixa de frequência de operação vai de 2,4 GHz a 2,5 GHz, a antena é alimentada por um conector SMA e cabo de cobre do tipo rg-58 que tem impedância de entrada de 50 ohms, com isso possibilitando um casamento de impedância com diversos transmissores (ANENG, 2020). A Figura 68 mostra a antena comercial Yagi-Uda utilizada.

Figura 68: Antena Yagi-Uda comercial.



Fonte: ANENG, 2020.

Construído em alumínio com as dimensões da antena são de aproximadamente de 49,5 cm de comprimento, 6,8 cm de largura e 1,6 cm de espessura, possui um suporte para fixação, a antena é constituída por um refletor, um dipolo que é protegido por uma caixa de polimérica e treze diretores.

5.4. FONTE DE ENERGIA

Os sistemas de telemetria, são alimentados comumente por fontes de corrente contínua, essa fonte pode ser externa ou interna no equipamento, podem fazer uso de sistema de armazenamento de energia por meio de baterias ou não, mas são normalmente utilizadas com sistemas de baterias para imprevistos, como faltas de energia não programadas, com isso sendo alimentada por meio das baterias até a regularização da energia. As fontes têm baixos níveis de tensões decorrente de padronização, facilidade de manuseio e afim de evitar variações que ‘venham a danificar o sistema no qual é alimento, um exemplo de fonte destinada a telemetria é visto na Figura 69 onde é observado que a fonte de alimentação que faz o uso de baterias para armazenamento, tem saídas de 12 V e 24 V, com 1,5A e 2 A respectivamente e

tem uma bateria de 7 Ah dotando o sistema uma autonomia de funcionamento (ALFACOMPBRASIL, 2020).

Figura 69: Fonte de alimenta 12 V/24 V com bateria.



Fonte: ALFACOMPBRASIL, 2020.

Para sistemas externos em campo, onde não é possível uma alimentação por meio de uma conexão à rede, se faz necessário sistemas de micro geração isoladas para que seja possível a alimentação do sistema de telemetria. Esse sistema de alimentação também faz uso de sistemas de armazenamento, o funcionamento dele é basicamente um sistema de microgeração que por meio de um controlador de carga faz o chaveamento para qual carga a energia irá alimentar, assim alimentando por hora o banco de baterias ou diretamente o sistema de telemetria. As baterias têm como função alimentar o sistema em momentos atípicos, comumente essa geração se dá pela utilização de painéis solares. A Figura 70 mostra um sistema de alimentação de uma estação meteorológica, sendo possível observar o painel solar responsável pela captação e conversão da energia, uma caixa hermética com a finalidade de armazenar o circuito do sistema e a bateria (SIGMA SENSORS, 2020).

Figura 70: Sistema de alimentação por baterias e painéis solares.



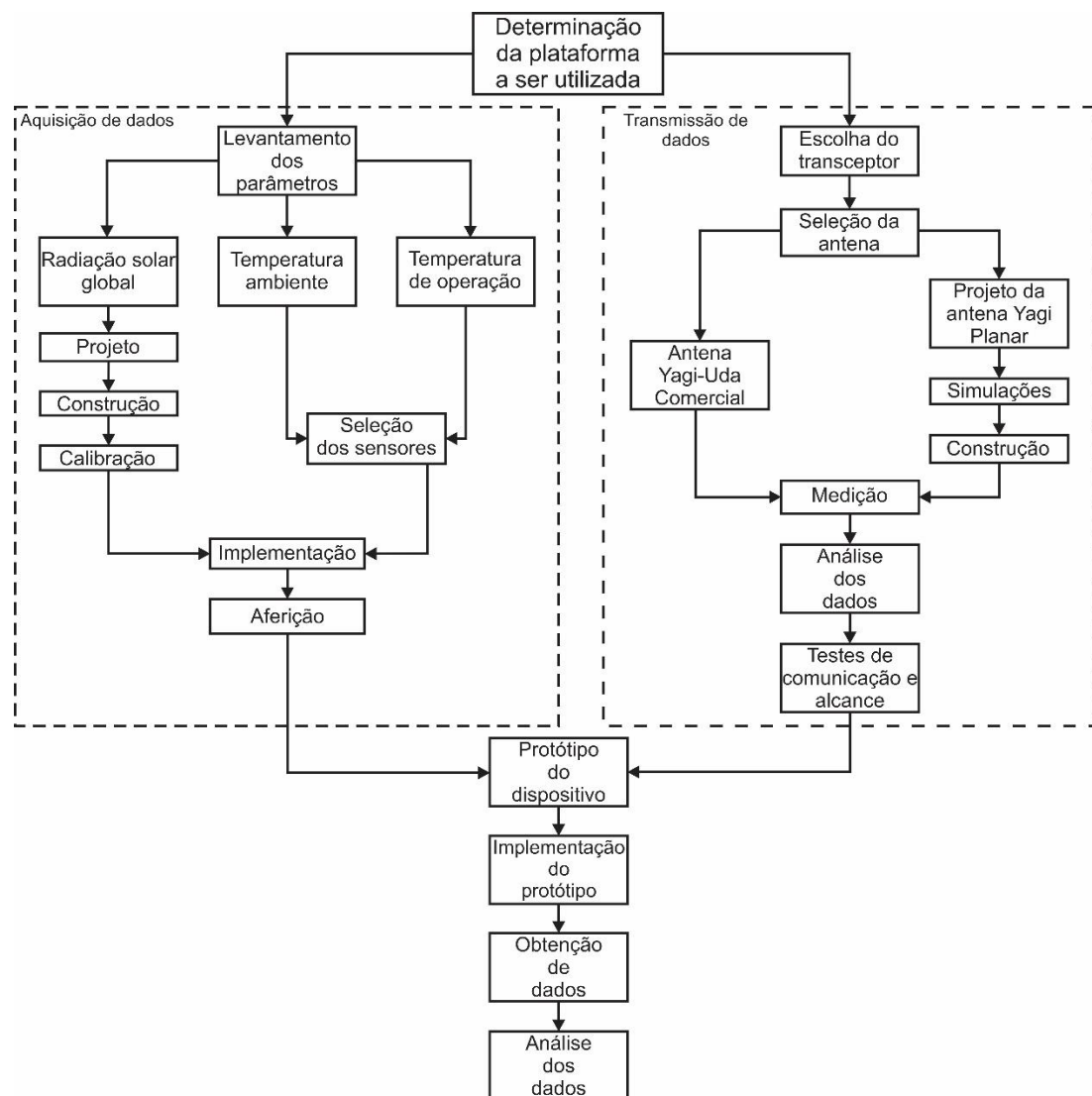
Fonte: Adaptado de SIGMA SENSORS, 2020.

6. METODOLOGIA

Este trabalho possui natureza aplicada e adotada como procedimento técnico do tipo pesquisa experimental com objetivo exploratório e abordagem de pesquisa qualitativa.

Nesse capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para a realização desse trabalho desde da etapa da escolha da plataforma microcontrolada, escolha e elaboração de sensores a serem utilizados para captação dos parâmetros influenciadores em um sistema solar fotovoltaico, determinação de transceptor compatível com a plataforma microcontrolada escolhida, a antena compatível com o mesmo, testes em campo e implementação do protótipo do sistema. A Figura 71 ilustra de modo sucinto a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 71: Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A plataforma microcontrolada escolhida foi o Arduino em sua versão MEGA 2560, foi escolhido o Arduino como a plataforma para esse sistema decorrente de sua versatilidade e compatibilidade com diversos dispositivos, possibilitando assim uma gama maior de soluções, a versão MEGA 2560 foi selecionada dentre as diversas outras versões por ter um microcontrolador que atende em relação a capacidade de processamento, quantidade de portas e memória. Outro ponto crucial para a escolha do mesmo foi o seu custo reduzido e o fácil acesso no mercado por se tratar de um modelo já consolidado.

Em seguida foi feito o levantamento dos parâmetros que influênciam na geração de energia elétrica por meio da energia solar fotovoltaica, com isso foram definidos os sensores que captariam esses parâmetros. Em paralelo, foi determinado qual seria o transceptor que seria implementado no Arduino, com os parâmetros do transceptor foi escolhido qual seria o tipo da antena aplicada ao mesmo e a sua faixa de frequência, após a determinação foi adquirido um antena comercial e projetado outra com algumas características da comercial, posterior a isso foram feitas medições e de posse dos dados oriundo dessas medições, foram feitas análises e comparações para atestar as características da antena projetada. Em seguida foram feitos testes práticos com as antenas, testando o funcionamento e o alcance dos transceptores com as mesmas.

Feito isso os próximos passos foram elaborar o protótipo, determinar a localização aonde o protótipo será implementado, após a implementação fazer uma coleta de dados por meio do sistema de telemetria final e analisar os dados recebidos pelo o mesmo.

6.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

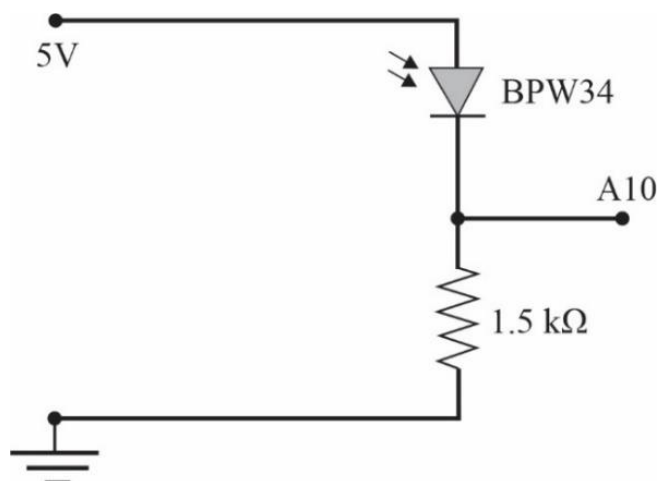
Como visto os parâmetros influenciadores na geração fotovoltaica são radiação solar, umidade, temperatura ambiente e temperatura de operação dos painéis solares, tendo isso em mente. A seção da aquisição de dados é constituída pelos sensores responsáveis pela captação de radiação solar global, temperatura ambiente e umidade do relativa do ar e temperatura de operação das placas solares. Levando em consideração a compatibilidade com a plataforma definida anteriormente.

6.1.1. Radiação Solar Global

Após escolhido o BPW34, foi montado um circuito com o fotodiodo em série com um resistor, sendo esse resistor responsável por fazer a divisão de tensão com o fotodiodo, com isso alterando a resistência de saída no ponto A10, assim possibilitando uma variação do nível de tensão de acordo com a variação de radiação solar.

Para esse sistema foi utilizado um resistor de $1,5\text{ k}\Omega$, pois foi constatado, que se colocar um resistor, a exemplo, de $10\text{ k}\Omega$ o sensor fica com alta sensibilidade a luz, algo indesejável, pois assim atinge o limite máximo que o mesmo consegue medir, e se for colocado um resistor $480\text{ }\Omega$ a sensibilidade do sensor fica baixa demais e o sensor não fica responsivo a pequenas variações de radiação algo também indesejado. Na Figura 72 mostra o esquema do circuito elétrico visualizando o divisor de tensão, onde será lido pela porta analógica 10 (A10).

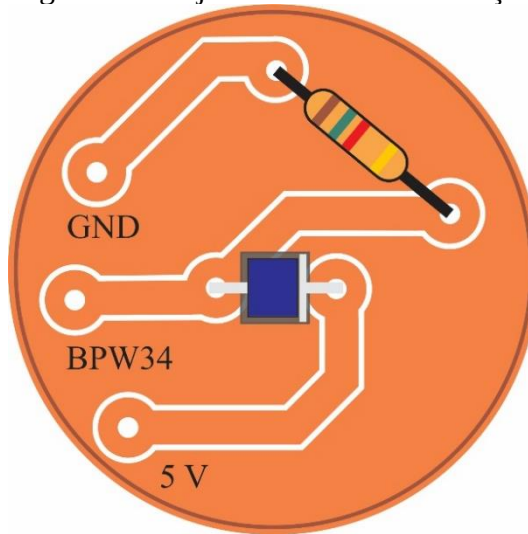
Figura 72: Circuito esquemático do piranômetro de fotodiodo.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a construção do sensor de radiação foi projetado uma PCI para interligação dos componentes, com a finalidade de uma melhor organização, conforme apresentado na Figura 73.

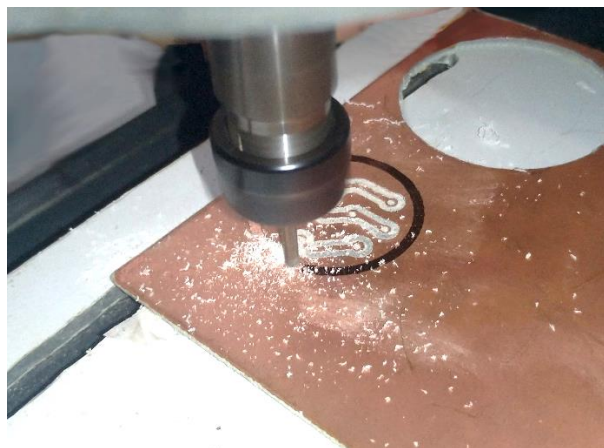
Figura 73: Projeto do Sensor de radiação



Fonte: Autoria própria, 2020.

Sua fabricação foi feita por meio do método de usinagem onde foi utilizado uma máquina de usinagem CNC, cujo o modelo utilizado foi a Mini cnc 2020B. O material escolhido para a construção do circuito foi uma placa de fenolite, na Figura 74 é observado o processo de fabricação da PCI, fazendo o uso do Autocad para desenhar o circuito, um programa de vetorização de imagem e USB CNC controler para conexão com a mini CNC.

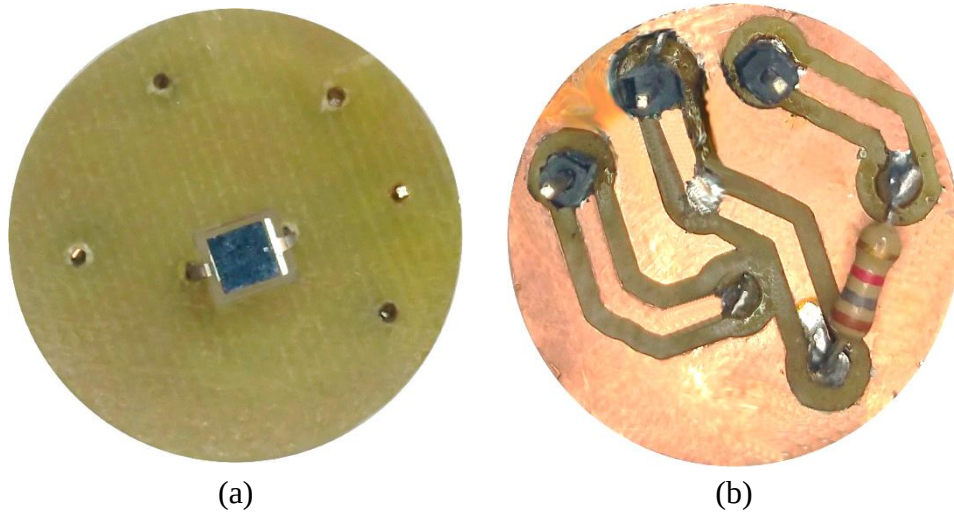
Figura 74: Usinagem da PCI.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Após a usinagem foram colocados os componentes e soldados na PCI, como pode ser visto na Figura 75, onde é constatado a disposição dos componentes, as trilhas que interligam aos pinos que será conectado ao arduino por meios de cabos.

Figura 75: Circuito do piranômetro de fotodiodo: (a) Frontal, (b) Posterior.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Com isso foi construído um encapsulamento de polímero para o circuito, com a preocupação de manter uma abertura para que a radiação solar chegue ao BPW34 com a mínima interferência, para isso foi utilizado um domo de acrílico, também foi levado em consideração que o mesmo será instalado ao tempo, com isso ficando exposto aos intempéries climáticas, tais como chuvas e altas temperaturas. Foi utilizado uma base de alumínio para possibilitar a fixação. O sensor construído pode ser visto por meio da Figura 76.

Figura 76: Sensor de radiação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Após a construção do sensor de radiação foi feita sua a calibração, que consiste em relacionar a quantidade de bits que por sua vez está associada a um nível de tensão a uma quantidade de radiação. Para medir a quantidade de radiação foi utilizado um piranômetro de fotodiodo modelo MES-100 da marca Instrutherm, demonstrado na Figura 77.

Figura 77: Piranômetro MES-100



Fonte: INSTRUTHERM, 2020.

Por meio das medições foi obtido diversos pontos obtendo valores de bits e de radiação com isso foi elaborado um gráfico de dispersão, possibilitando a observação da relação entre a quantidade de bits por W/m², por meio de uma regressão linear foi encontrado a equação que rege essa relação.

O aferimento do sistema teve como finalidade validar os valores obtidos pelo o sistema de telemetria montado. A metodologia utilizada foi a medição por meio do protótipo e do equipamento do MES-100 fabricado pela Instrutherm. Foi feita a amostragem do dia 02/07/2020 na localidade da usina solar Mossoró II da UFERSA, coletando dados no intervalo de 5 minutos, tendo início a partir das 05:30 da manhã e finalizando 17:30 da tarde, após isso foi comparado os resultados obtidos e encontrado o erro percentual do sistema em relação ao equipamento profissional. O erro percentual pode ser encontrado através da Equação 50.

$$E_{\%} = \frac{Valor_{MES-100} - Valor_{prototipo}}{Valor_{MES-100}} \times 100 \quad (50)$$

Onde:

$Valor_{MES-100}$ = valor médio obtido pelo medidor comercial;

$Valor_{prototipo}$ = valor médio obtido pelo protótipo.

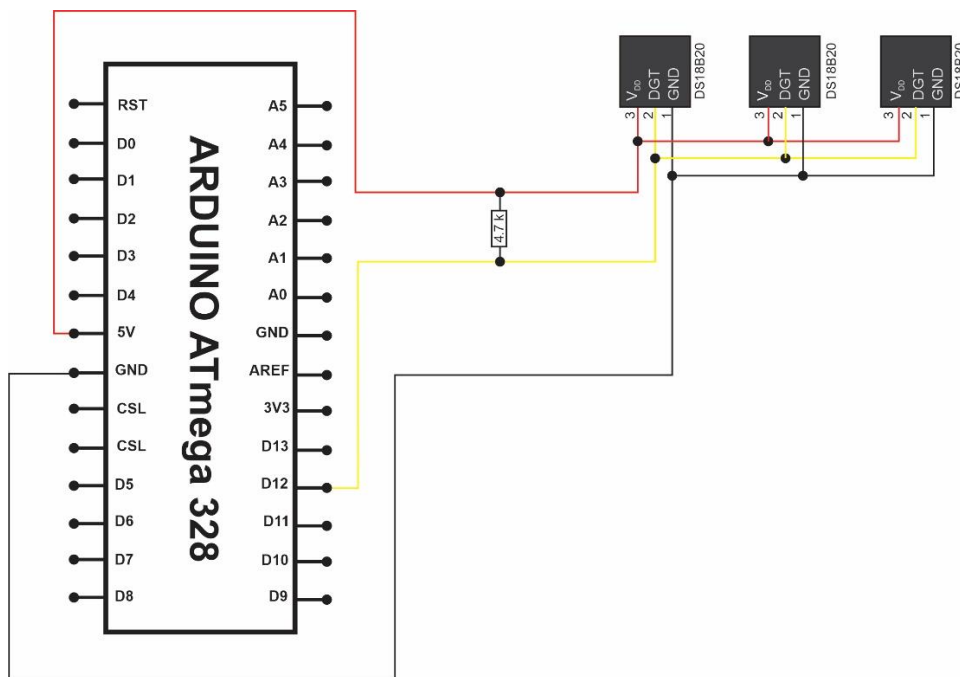
6.1.2. Temperatura Ambiente e umidade relativa do ar

O sensor responsável pela aquisição dos dados de temperatura é o AM2301 como descrito no tópico 5.2.3. é constituído por um sensor capacitivo para aquisição de dados de umidade relativa do ar e um termopar que se trata de um sensor de temperatura resistivo. Por se tratar de um sensor comercial e que já tem embutido nele um conversor de analógico para digital, a instalação dele é simples, contando apenas com três fios para conexão sendo uma para alimentação de 5 V, o terra e o cabo de dados que é responsável pela comunicação com o arduino, sendo assim necessário a interligação desse fio em uma porta digital do arduino, o próximo passo é somente a nível de *software*.

6.1.3. Temperatura de operação dos painéis solares

Igualmente o sensor AM2301 o Dallas DS18B20 faz uso de um conversor digital interno onde converte um sinal analógico para digital com isso possibilitando o uso de portas digitais do microcontrolador, conforme mostrado na Figura 78, que traz o esquemático da ligação do Dallas, onde também é visualizado que entre as porta de 5 V e o pino digital é colocado um resistor de 4,7 k Ω com a finalidade de trazer mais estabilidade no envio dos dados.

Figura 78: Esquemático da ligação do Dallas DS18B20.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O DS18B20 tem uma particularidade que é a possibilidade do uso de apenas uma porta digital isso é possível decorrente a cada DS18B20 ter um endereçamento, onde esse endereçamento é feito através de um código hexadecimal, na Tabela 8 é possível visualizar o endereçamento do Dallas utilizado.

Tabela 8: Endereçamento do Dallas DS18B20.

Sensor	Código em Hexadecimal							
	01	02	03	04	05	06	07	08
01	0x28	0x0D	0x2D	0x79	0xA2	0x15	0x03	0x33
02	0x28	0x15	0x21	0x79	0xA2	0x16	0x03	0xBD
03	0x28	0x60	0x4D	0x79	0xA2	0x16	0x03	0xFE
04	0x28	0x57	0x6D	0x79	0xA2	0x15	0x03	0x3B
05	0x28	0xC2	0x38	0x79	0xA2	0x15	0x03	0x26
06	0x28	0x4B	0x52	0x79	0xA2	0x16	0x03	0xA3
07	0x28	0x5B	0x6E	0x79	0xA2	0x15	0x03	0x08

Fonte: Autoria própria, 2020.

6.2. TRANSMISSÃO DE DADOS

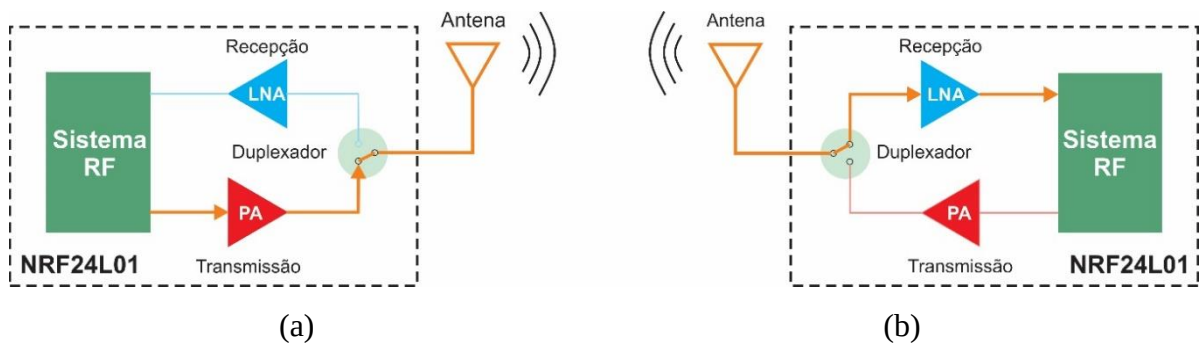
Essa seção tem como finalidade enviar os parâmetros obtidos pelos sensores e processados pelo microcontrolador, através do espaço livre por meio de um sinal modulado enviado por um transceptor e antena que possibilite a visualização desses parâmetros a distância. Todos os componentes escolhidos tem como finalidade de atender todas necessidades do trabalho.

6.2.1. O transceptor NRF24L01

O transceptor escolhido foi o NRF24L01, decorrente de sua compatibilidade com o Arduino e baixo custo ele é produzido pela *NORDIC semiconductor*. Tem aplicações voltadas para projetos em plataformas microcontroladas em que seja necessário utilizar comunicação sem fio.

Sendo genericamente constituído por um sintetizador de frequência, amplificador de potência, oscilador, modulador e demodulador, as configurações de protocolo são facilmente programáveis devido a interface SPI (*Serial Peripheral Interface*) sendo o protocolo que possibilita a comunicação do microcontrolador com diversos outros componentes (WRIGHT, 2017). Opera na banda ISM de 2,4 GHz – 2,524 GHz e sua modulação *GMSK* (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Tendo como uma das principais características o baixo consumo de energia sendo necessário apenas uma corrente de 11,3 mA no modo de transmissão e 12,3 mA no modo de recepção, em relação a potência de transmissão consegue atingir aproximadamente 20 dBm e quando no modo de recepção tem uma sensibilidade de -95 dBm, o modelo escolhido vem com *PA* (*power amplifier*) um amplificador de potência de 20 dB que amplifica o sinal a ser transmitido e o *LNA* (*low noise amplifier*) um amplificador de baixo ruído de 10 dB com a finalidade de amplificar o sinal recebido com potência muito baixa sem alterar consideravelmente a relação sinal-ruído, com isso permitindo elevar o alcance do transceptor e chegar a distâncias de aproximadamente 1100 m. Na Figura 79 ilustra um sinal enviado pelo sistema de RF passando pelo *PA* no qual o sinal é amplificado e enviado para a antena que no espaço livre que sofre degradação, o sinal recebido pela antena com ruído passa pelo *LNA* que amplifica o sinal com isso permitindo um alcance maior de comunicação.

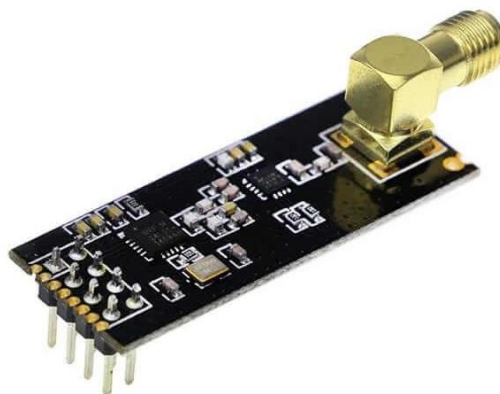
Figura 79: Esquemático do funcionamento do NRF24L01 com PA e LNA: (a) Transmissor e (b) Receptor



Fonte: Autoria própria, 2020.

Por meio da Figura 80 é visualizado modelo de NRF24L01 que será utilizado que como foi explicado anteriormente vem com PA e LNA conseguindo atingir longas distâncias.

Figura 80: NRF24L01 com PA e LNA.



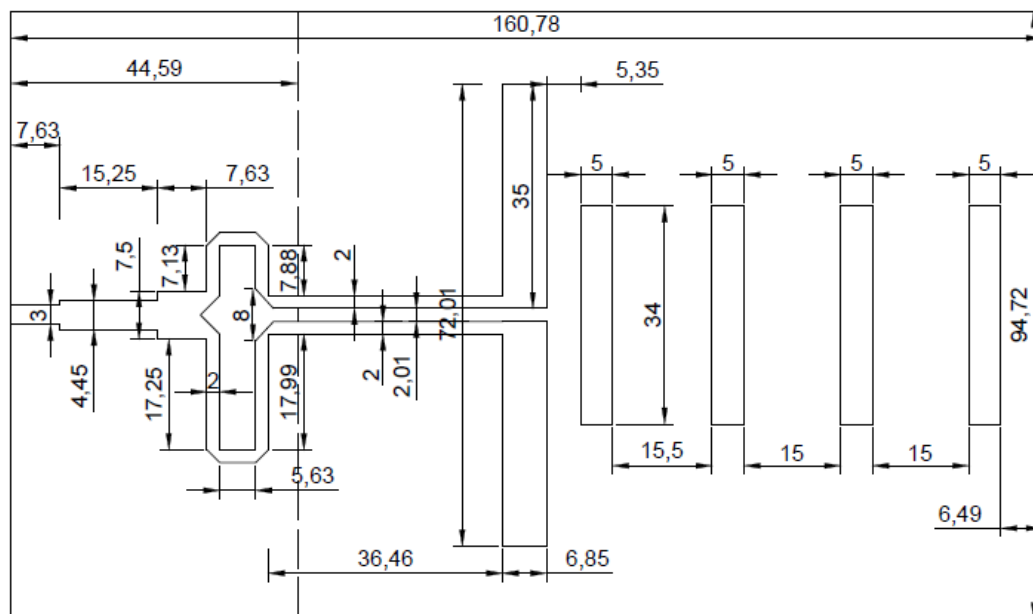
Fonte: Autoria própria, 2020.

6.2.2. Antena Yagi-Uda Planar

A antena escolhida para esse projeto foi a antena Yagi-Uda planar, que como foi demonstrado anteriormente traz consigo características de uma antena Yagi-Uda convencional como o diagrama de radiação diretivo e ganho elevado e características de antena planar como baixo custo, fácil construção, baixo perfil e peso reduzido.

Essa antena é uma adaptação da antena Yagi-Uda convencional para antena planar e esse projeto específico tem como base o projeto desenvolvido por SILVA et al., (2017) que tem como frequência de projeto 2,45 GHz e produzida em FR4. Foram feitas modificações na distância entre os diretores com o intuito de aumentar o ganho da antena que manteve a frequência de projeto de 2,45 GHz e também foi produzida em FR4 com permissividade elétrica 4,65 e tangente de perdas de 0,02. Com o projeto da antena foi encontrado as dimensões da antena sendo possível a visualização na Figura 81, onde todas suas dimensões estão em milímetros.

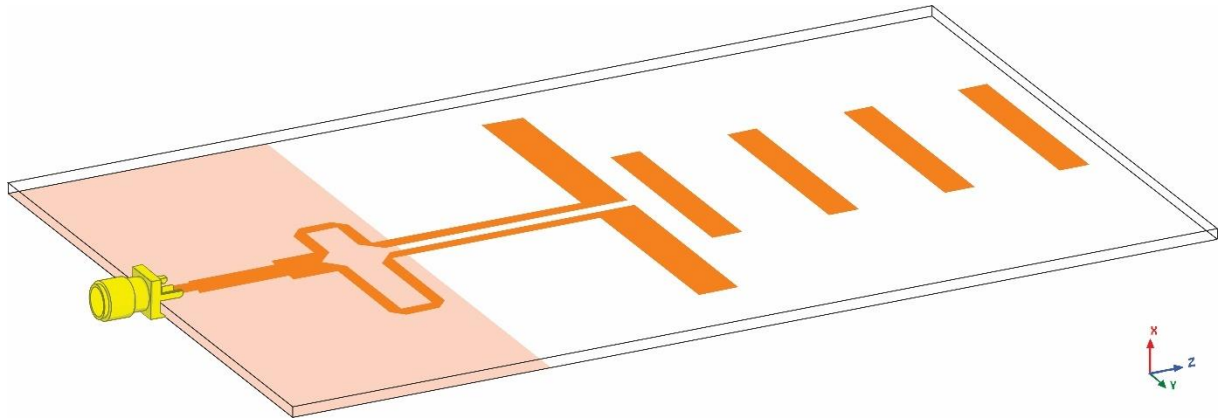
Figura 81: Dimensões da Antena Yagi-Uda planar de 4 diretores



Fonte: Autoria própria, 2020.

Após encontrada as dimensões, as antenas foram desenhadas e simuladas na faixa de frequência de 2 a 3 GHz com passo de 0,0075 (mesmas condições utilizadas das medições), no software Ansys HFSS® (*High Frequency Structural Simulator*), que faz uso do método numérico FEM, que possibilita a visualização de parâmetros como, coeficiente de reflexão, diagrama de radiação e ganho. Na Figura 81 é visualizado a antena simulada no HFSS®.

Figura 82: Antena Yagi-Uda planar simulada no Ansys HFSS®



Fonte: Autoria própria, 2020.

Após a etapa de projeto e simulação a antena foi fabricada por meio da técnica de corrosão, fazendo o uso inicialmente de uma impressora a jato de tinta com cura ultravioleta modelo UJF-6042 produzida pela Mimaki que imprime uma fina camada de tinta, como visto na Figura 83, que serve para delimitar área aonde não será corroído, criando uma proteção no cobre contra o perclorato de ferro (FeCl_3), pois não reage ao mesmo, que tem como função remover o excesso de cobre, deixando somente o desenho da antena na placa de FR4.

Figura 83: Impressão da antena



Fonte: Autoria própria, 2020.

Foi soldado entre a linha de transmissão e o plano refletor (plano de terra) para possibilitar a alimentação por meio de um conector SMA fêmea reto de cobre banhado a ouro, com faixa de operação de 0 a 6 GHz e impedância de $50\ \Omega$, apresentado na Figura 84.

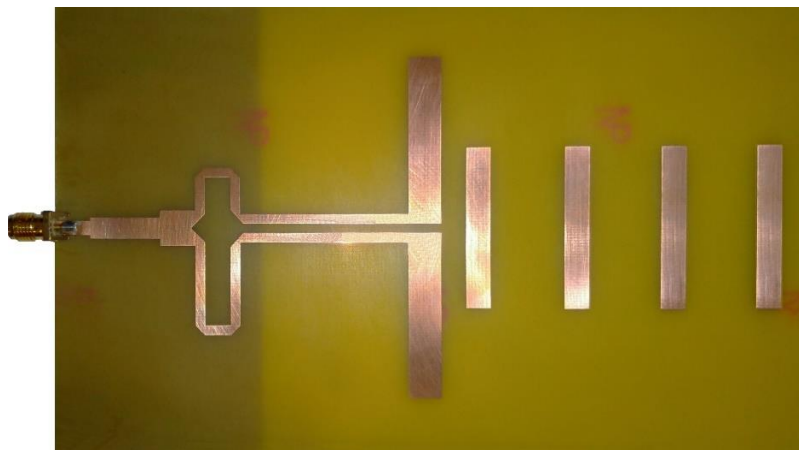
Figura 84: Conector SMA fêmea reto de quatro pinos



Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 85 é mostrada a antena confeccionada após o processo de corrosão, acabamento e soldagem do conector SMA fêmea.

Figura 85: Antena Yagi-uda planar construída



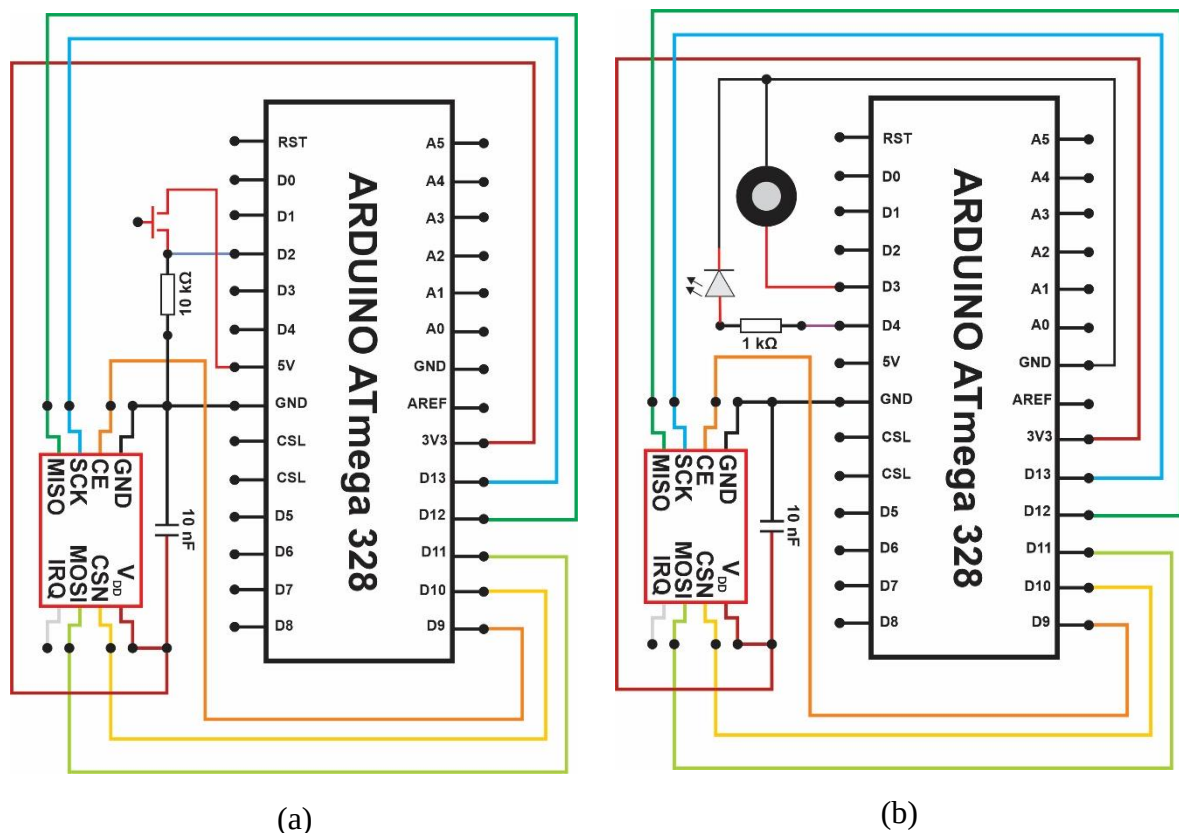
Fonte: Autoria própria, 2020.

6.2.3. Teste de comunicação e distância

Com intuito de confirmar o funcionamento do transceptor e alcance do mesmo, foram feitos teste com a finalidade de medir a distância máxima com a sua antena nativa e com a antena yagi-uda planar construída. Foi elaborado um programa básico que tinha como objetivo

enviar um pulso, onde escrevia um nível baixo em uma porta digital até o momento que era acionado um botão entreendo 4 pulsos de nível alto na porta digital no intervalo de 1 segundo, conectado a essa porta estava um *LED* e um *Buzzer* que era acionado no mesmo intervalo de 1 segundo com a mesma quantidade de pulsos e após isso voltava a escrever um nível baixo na porta. Com isso foi elaborado um circuito de transmissão e recepção que possibilitasse o teste. Sendo possível visualizar o esquema de ligação e os componentes utilizados por meio da Figura 86. Após isso fazendo uso de *protoboards* foi feito os circuitos da transmissão e recepção.

Figura 86: Esquemático do teste: (a) Transmissão, (b) Recepção.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A metodologia utilizada consistia em uma base fixa com o circuito receptor e outra móvel com o transmissor, que com o auxílio do GPS 78s da marca Garmin® foi marcado um ponto no local da base fixa e com o GPS e o circuito transmissor foi se afastando do sistema receptor em linha reta, a cada 50 metros era colocado as antenas em visada direta e apertado o botão enviando o pulso para o sistema de recepção onde foi observado que era mantido comunicação entre os dois transceptores. A Figura 87 demonstra o GPS utilizado para medir a distância.

Figura 87: Garmin GPSMap 78s.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Primeiramente foi utilizado a antena dipolo nativa do transceptor tendo um ganho de 2 dB o teste foi feito em ambiente poluído eletromagneticamente, decorrente de diversos outros sistema de comunicação que atuam na mesma frequência, com isso o transceptor com a antena dipolo atingiu 1130m, onde na Figura 88 é mostrado o trajeto feito e seu perfil de elevação do solo.

Figura 88: Teste de distância com a antena dipolo.



Fonte: Google Earth, 2020.

O mesmo procedimento foi feito fazendo o uso da antena yagi-uda planar construída, no mesmo trajeto e avaliando o mesmo parâmetro que é o alcance que a antena pode chegar, como se sabe a distância em que as antenas serão instaladas, não foi encontrado um valor para o alcance máximo, decorrente a falta de espaço físico e como foi atingido a marca de 1560 m que é o suficiente para essa aplicação. Demonstrado na Figura 89.

Figura 89: Teste de distância com a antena Yagi planar construída.



Fonte: Google Earth, 2020.

O último teste de comunicação foi no local onde as antenas serão instaladas, a antena transmissora sendo instalada na usina solar da UFERSA Mossoró II localizada no campus leste – Mossoró e a antena receptora no prédio CITED (Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semiárido). A Figura 91 traz as antenas instaladas em seus devidos locais. Na Figura 90 - a tem-se a antena transmissora fixada em uma estaca de concreto da cerca da usina solar Mossoró II, foi feito um estudo de sombreamento para que a projeção da sombra antena não interferisse na geração sombreando os painéis, já a Figura 90 - b traz a antena receptora instalada no alto do CITED com o intuito de conseguir a visada direta, pois como se tem diversos prédios em sua volta.

Figura 90: Local de instalação das antenas: (a) antena transmissora (b) antena receptora.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 91 é visualizado a distância entre uma antena e outra que é de aproximadamente 1280 m em linha reta ou visada direta, por meio desse teste foi constatado que se tem uma visada direta sem obstáculos relevantes para a comunicação já que a mesma foi contactada. Com isso sendo possível o envio de dados nessa distância da usina Mossoró II para o CITED sem perdas de dados consideráveis.

Figura 91: Visada do enlace de rádio CITED-USINA.

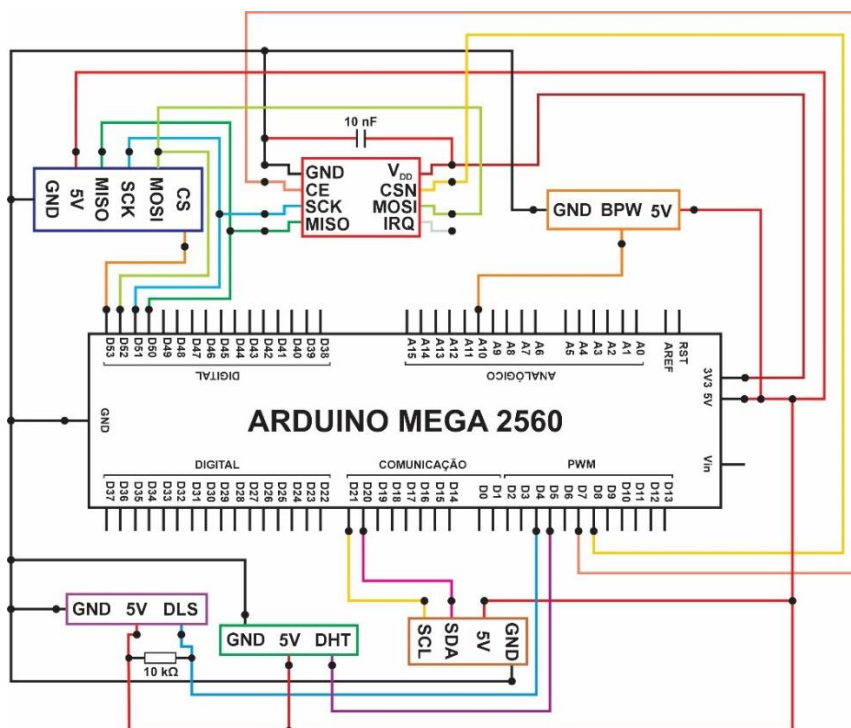


Fonte: Google Earth, 2020.

6.3. PROTÓTIPO DO SISTEMA GERAL

Primeiramente se faz necessário a interligação entre todos os sensores, sistema de transmissão e armazenamento de dados com o arduino, com isso na Figura 92 traz o esquema de ligação do sistema de transmissão, demonstrando por meio da representação de todos os componentes e interconexão necessários para elaboração do sistema de transmissão.

Figura 92: Esquema de ligação do circuito de transmissão.

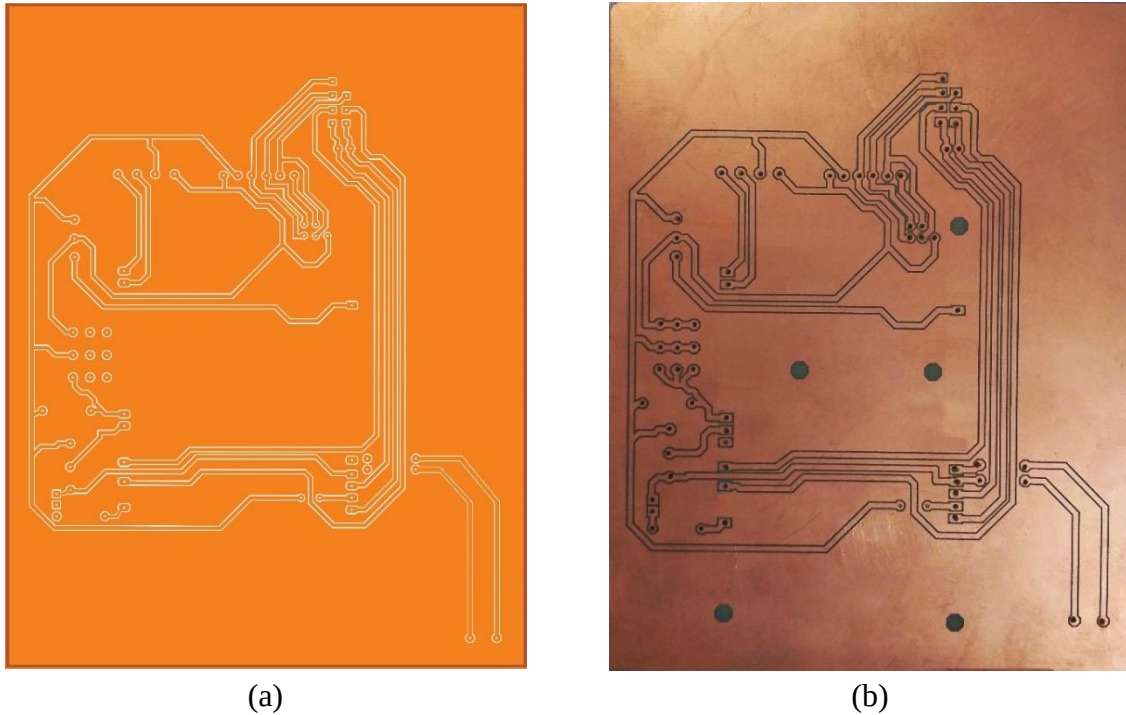


Fonte: Autoria própria, 2020.

Assim se fazendo necessário um meio eficiente que reduza interferência na conexão, uma maneira que atende esse é mediante a utilização de uma placa de circuito impresso para o circuito de transmissão, fazendo a conexão de modo eficiente e sem interferência. Na Figura 93-a é possível a visualização do projeto da placa de circuito impresso para a transmissão desenvolvida em plataforma de prototipagem livre.

Após o projeto o passo seguinte é a utilização por meio de uma máquina CNC, fazer as trilhas do circuito e furos para a colocação de conectores e componente que permitirá a conexão entre a parte responsável pela aquisição de dados a plataforma microcontrolada e a responsável pela transmissão de dados. A Figura 93-b demonstra a PCI de transmissão construída em uma placa de fenolite.

Figura 93: PCI de transmissão: (a) Projeto, (b) Construída.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Com isso o passo seguinte é a instalação dos componentes na PCI. Os componentes instalados foram pinos para conexão e fixação do arduino, pinos para a conexão com os sensores, um RTC (*Real Time Clock*), um modulo micro SD card, o NRF24L01 e um terminal para alimentação, assim fazendo todas as conexões para o funcionamento, na Figura 94 é visualizado a PCI com os componentes já instalados.

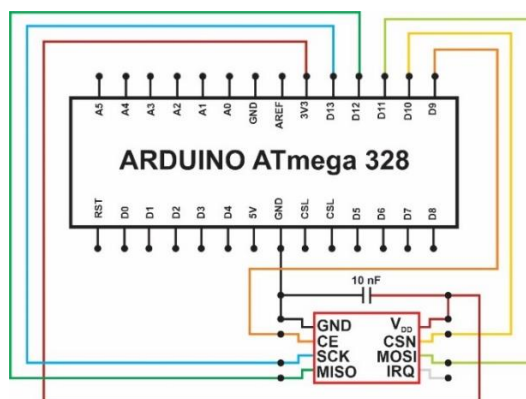
Figura 94: PCI de transmissão com os componentes instalados.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O próximo passo é elaborar um circuito para interligação do NRF24L01 com um arduino UNO para a captação do sinal enviado pelo sistema de transmissor, com isso sendo responsável pela recepção do sinal. Mostrada na Figura 95 o esquema de ligação entre o Arduino e o NRF24L01.

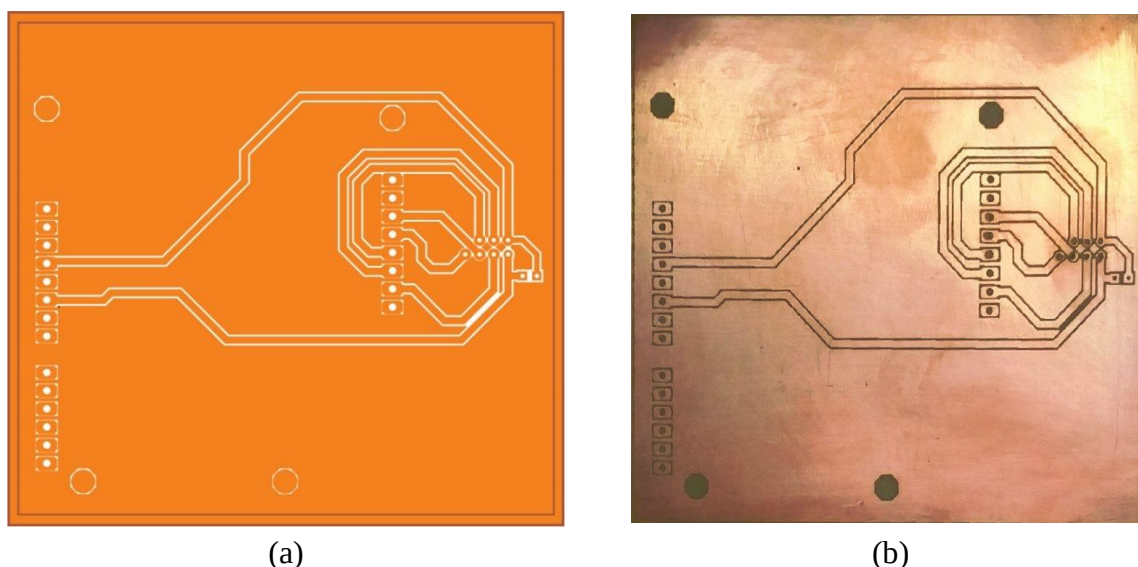
Figura 95: Esquema de ligação do circuito de recepção.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Seguindo os mesmos processos da PCI de transmissão, fazendo uso de uma máquina CNC para fazer as trilhas do circuito e furos para a colocação de conectores e componente que permitirá a conexão entre a parte responsável pela aquisição de dados a plataforma microcontrolada e a responsável pela transmissão de dados. A Figura 96 demonstra a placa de conexão construída em uma placa de fenolite/ FR4.

Figura 96: PCI de recepção: (a) Projeto, (b) Construída.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A PCI do sistema de recepção consiste na conexão do NRF24L01 com o Arduino, na Figura 97 é observado os componentes instalados na PCI, foram instalados na placa pinos para interligação e fixação do Arduino UNO.

Figura 97: PCI de recepção com os componentes instalados.

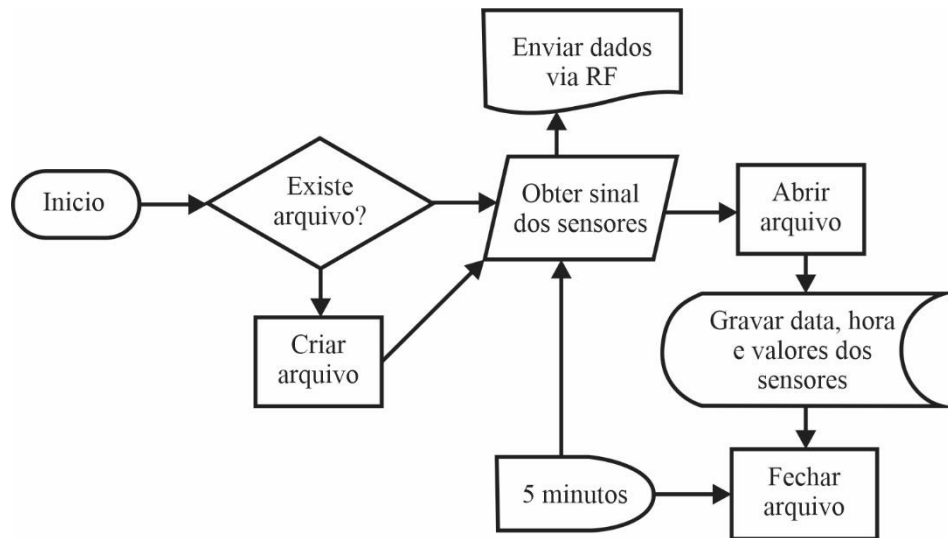


Fonte: Autoria própria, 2020.

O programa elaborado é na linguagem *wiring* algo muito próximo a linguagem em C, tem como função determinar as ações que é tomada pelo microcontrolador, onde para essa aplicação, é a leitura dos sensores de temperatura de operação, temperatura ambiente, umidade e de radiação solar é armazenando através do modulo SD *card* esses dados em um cartão SD em paralelo a isso é enviado por meio do NRF24L01 para estação de recepção.

A lógica do sistema pode ser vista na Figura 98 que mostra o fluxograma do algoritmo que rege o sistema, onde após o início verifica se no cartão SD tem o arquivo no formato .txt, se “não” é criado o arquivo aonde será escrito os dados, se “sim” é obtido os valores dos sensores, é aberto o arquivo para a gravação da data, hora e os valores obtidos pelos sensores, após a gravação é fechado o arquivo e começa a contagem de 5 minutos até a próxima obtenção do sinal do sensores repetindo esse looping até que ocorra uma ação externa.

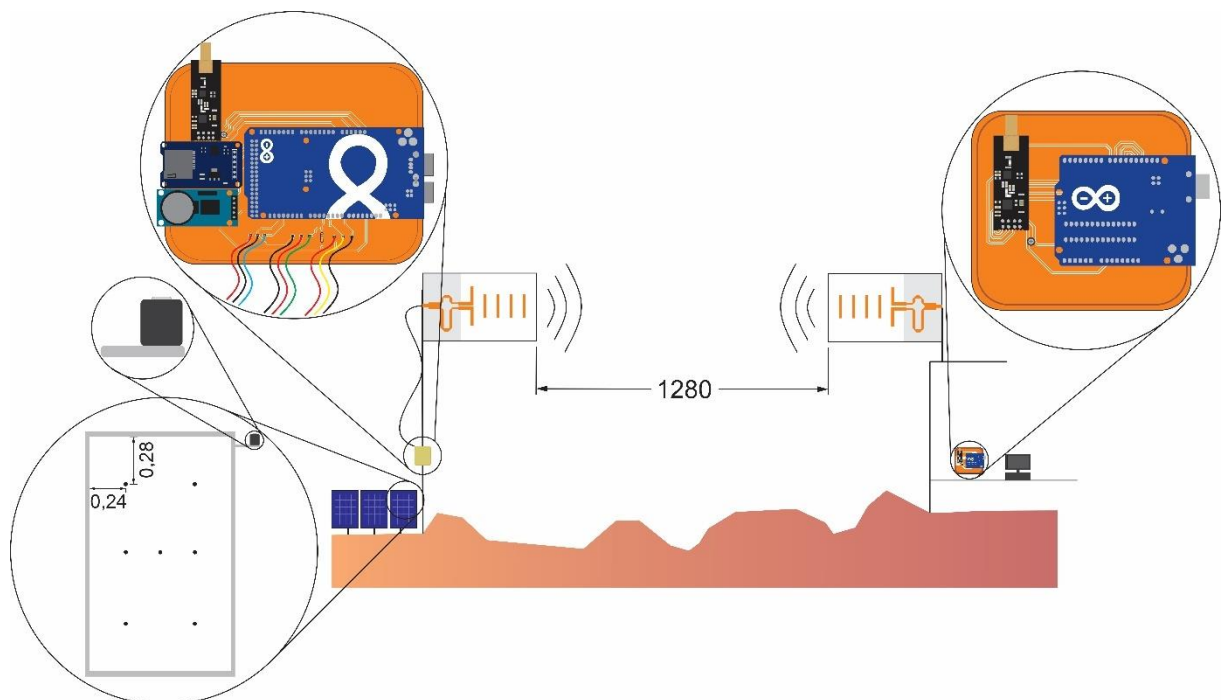
Figura 98: Fluxograma do Algoritmo.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Com isso se tem os componentes necessários para a montagem do sistema de telemetria da aquisição de dados, transmissão e recepção dados. A Figura 99 traz a representação do sistema como um todo.

Figura 99: Esquemático do sistema de telemetria.



Fonte: autoria própria, 2020.

O sistema foi instalado na usina solar Mossoró II da UFERSA, os sensores de temperatura de operação foram instalados na última placa do segundo arranjo, localizada na extrema esquerda no canto superior da primeira fileira de placas. Na Figura 100 é demonstrado o local instalado e o painel escolhido está em destaque.

Figura 100: Local da instalação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Esse local foi escolhido devido a facilidade de fixação e instalação do sistema. Para abrigar o equipamento foi utilizado uma caixa hermética, protegendo o equipamento de sol, chuva e poeira. Na Figura 101 tem a caixa hermética fixada na estrutura de suporte para fixação dos painéis solares.

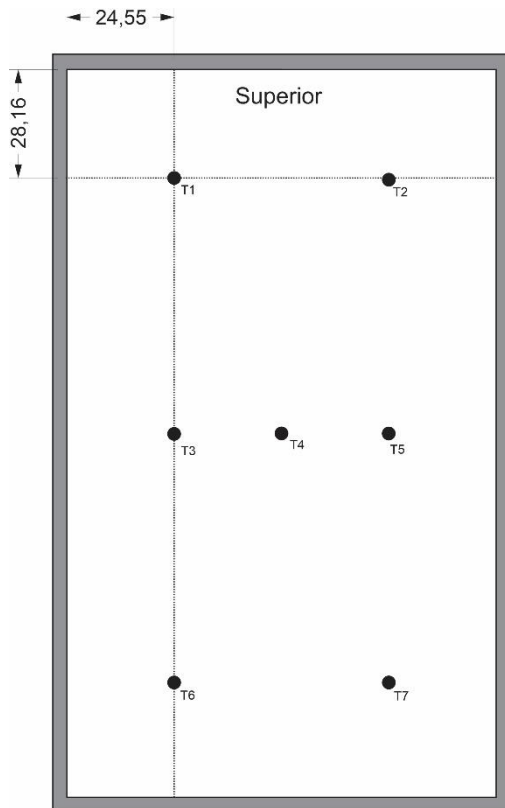
Figura 101: Caixa hermética.



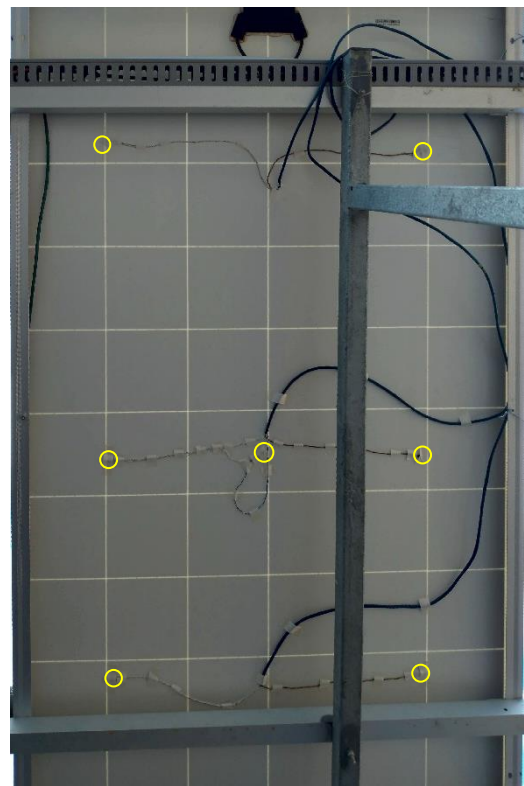
Fonte: Autoria própria, 2020.

A disposição dos sensores sobre a placa foi feita de maneira uniforme, podendo ser vista por meio da Figura 102-a, onde é possível visualizar a distância dos sensores da borda do painel. A instalação dos sensores de temperatura foi feita de maneira não invasiva, na parte posterior do painel, utilizando fita adesiva, com a finalidade de não interferir de nenhuma maneira o funcionamento. Na Figura 102-b mostra os sensores instalados e a conexão dos sensores com a placa foram feitas através de cabos RJ45.

Figura 102: Sensores de temperatura. (a) Disposição e (b) instalados



(a)

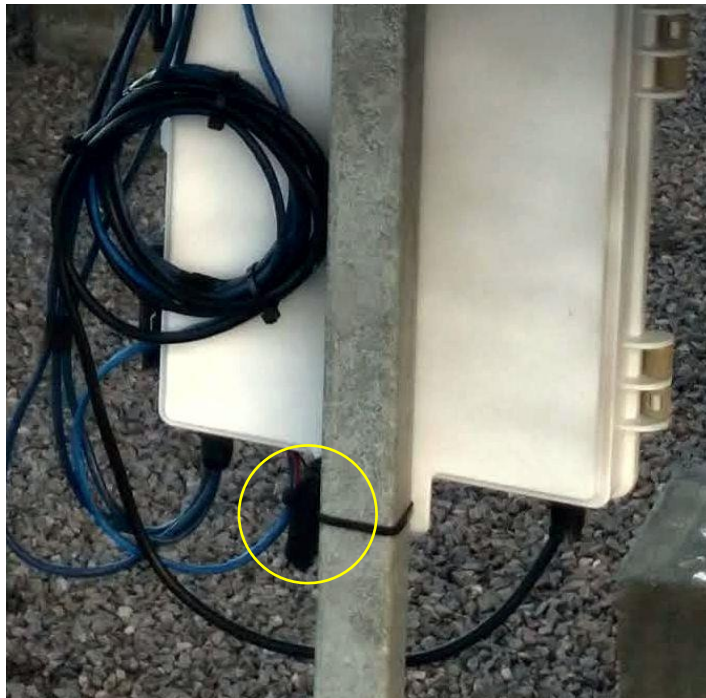


(b)

Fonte: Autoria própria, 2020.

O sensor de umidade e temperatura ambiente DHT21 foi instalado na parte posterior da caixa hermética, como mostra a Figura 103, foi tomado o cuidado de colocar em um local que em caso de uma chuva o mesmo não receba respingos diretamente, pois o mesmo não tem nenhuma proteção para chuva.

Figura 103: local de instalação do sensor DHT21.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a fixação do sensor de radiação foi utilizado um perfil de alumínio para fixar a estrutura de fixação dos painéis solares. Sua conexão com o arduino se deu através de cabo RJ45 onde pode ser observado o sensor já instalado na Figura 104.

Figura 104: Estrutura de fixação do piranômetro de fotodiodo.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A alimentação do sistema foi feita através de uma mini placa solar, que é constituída 6 células resinadas gerando uma tensão de 18,2 V e potência nominal de aproximadamente 5 W, sendo assim possível suprir a demanda de energia do sistema. Demonstrada na Figura 105, a mini placa já instalada.

Figura 105: Placa solar para alimentação do sistema.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Nota-se que a tensão nominal da placa é maior que a tensão recomendada pelo o arduino, assim, para resolver essa problemática foi utilizado um controlador de tensão, que tem como finalidade limitar a tensão, até um nível que possa ser utilizada pelo arduino. Para o projeto foi definido uma tensão de 12 V para a saída do controlador de tensão sendo assim possível a alimentação do sistema através da mini placa solar.

O controlador de carga utilizado foi o LM2596, no qual é visto na Figura 106, conseguindo suportar tensões de entrada de até 45 V, com isso suportando tensão de circuito aberto da placa de 21,4 V.

Figura 106: Regulador de tensão LM2596.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Como o nível de radiação pode oscilar durante o dia, podendo chegar a pontos críticos aonde a nebulosidade seria tamanha que poderia não gerar energia suficiente para o sistema, foram instalados duas células em série com a finalidade de atingir um nível de tensão próximo dos 10 V ainda assim se mantendo na faixa de recomendação do Arduino. As baterias serão recarregas pela mini placa solar, na Figura 107 é possível visualizar as baterias instaladas.

Figura 107: Sistema de baterias para alimentação.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Assim o sistema ficou organizado dentro da caixa hermética da maneira apresentada na Figura 108, onde é visto a PCI para interconexão com o RTC, módulo SD *card*, NRF24L01 e os sensores com o Arduino instalado centralizado na caixa, as baterias ficaram ao lado e o regulador de tensão LM2596 logo abaixo das baterias, onde através de aberturas na parte inferior da caixa é possível a entrada dos cabos vindo dos sensores e da placa, para que fosse possível a alimentação do Arduino. Para fixar os componentes na caixa foram utilizados parafusos.

Figura 108: Instalação do sistema e conexão dos sensores dentro da caixa hermética.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Por se tratar de um sistema automatizado, para efetuar as coletas dos dados, se faz necessário somente conferir se o cartão SD está no modulo SD *card* e ligar o sistema, com isso o sistema já está efetuando a leitura dos sensores, coletando dados de temperatura de operação, temperatura ambiente, humidade e radiação solar.

Todos as medições foram feitas no intervalo de 05:30 hs a 17:30 hs com a periodicidade de 5 minutos, foram feitas as coletas de dados na localização da usina solar da UFERSA Mossoró II nos dias de 03/07/2020 e 04/07/2020, também foram feitas medições no dia 06/07/2020 a uma distância superior a locação da usina chegando a uma distância de 1620 metros, conforme mostrado na Figura 109.

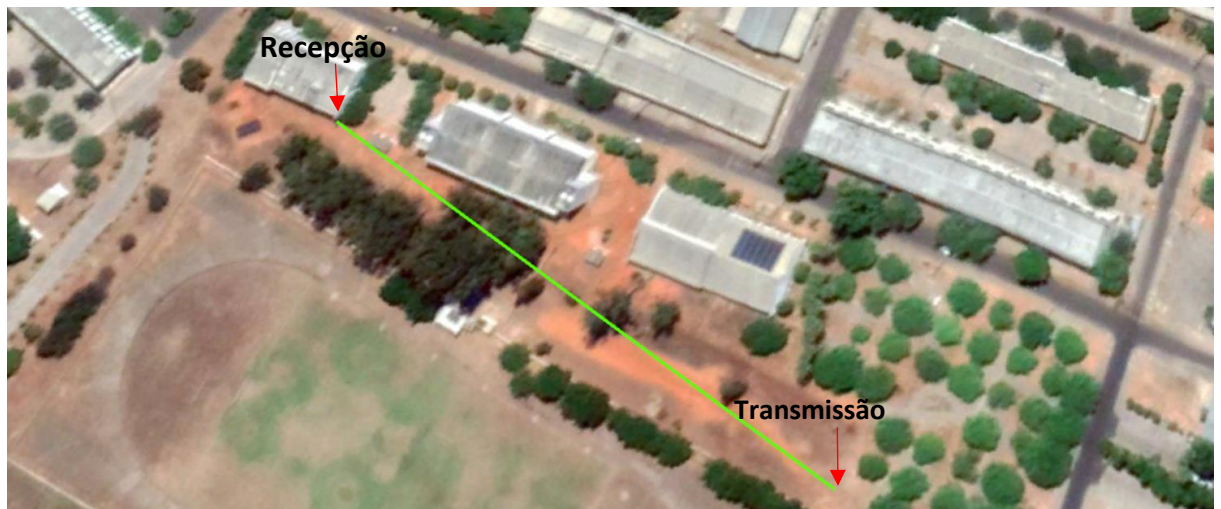
Figura 109: Locação de rádio enlace a 1680 metros.



Fonte: Google Earth, 2020.

Após isso foram feitas medições a uma distância de 170 metros, porém com a adição de vegetação como obstáculo, as medições foram feitas nos dias 07/07/2020 e 08/07/2020. Na Figura 110 é possível ver a locação dos rádios.

Figura 110: Locação de rádio enlace a 170 metros.



Fonte: Google Earth, 2020.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

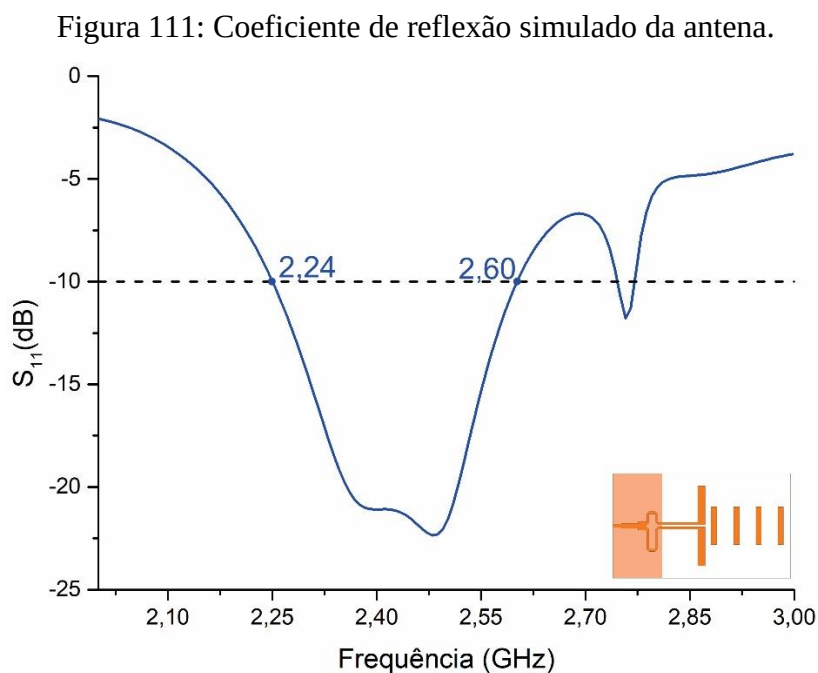
Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados simulados e experimentais das antenas e dos dados obtidos pelos sensores referentes a este trabalho tendo como base os conceitos abordados nos capítulos anteriores.

7.1. ANALISE DA ANTENA PROPOSTA

Preliminarmente foram realizadas simulações da antena proposta e em seguida com o objetivo de corroborar os resultados adquiridos, assim o protótipo da antena foi construída e medida. Os parâmetros obtidos foram os vistos anteriormente nesse trabalho.

7.1.1. Resultados Computacionais

Com as dimensões da antena encontrada foram realizadas simulações o utilizando o *software* HFSS® para aquisição dos resultados e extrair dados como coeficiente de reflexão, largura de banda, ganho e diagrama de radiação 2D e 3D. O resultado de coeficiente de reflexão para a antena simulada pode ser observado na Figura 111.

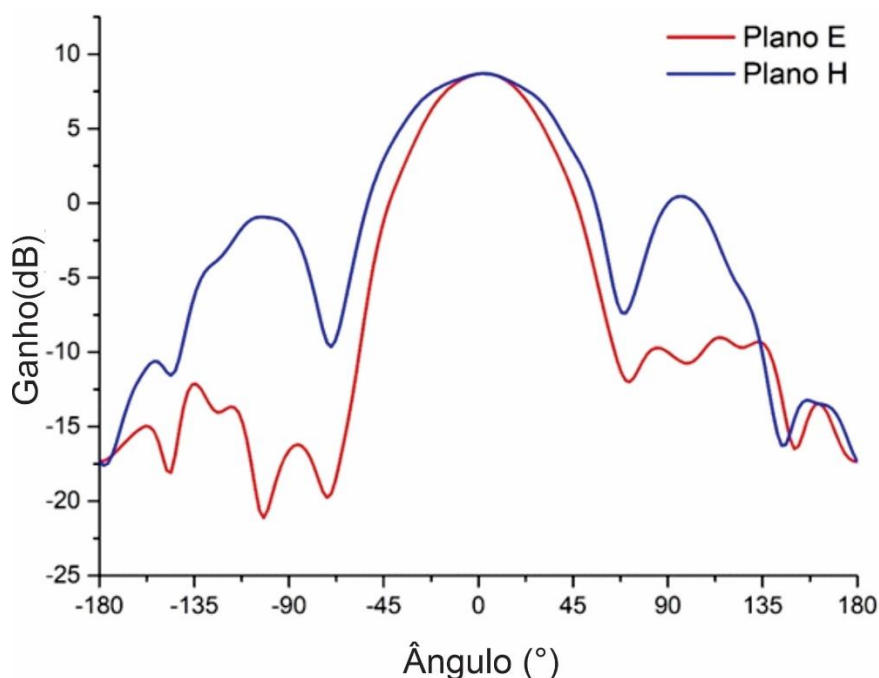


Fonte: Autoria própria, 2020.

Mediante a análise dos resultados demonstrados na Figura 112 é observado a largura de banda que vai de 2,24 GHz a 2,60 GHz totalizando 360 MHz, abrangendo todas as frequências da faixa *ISM* em 2,4 GHz, com um valor de coeficiente de reflexão de -21,66 dB para a frequência de ressonância em 2,45 GHz.

A Figura 112 demonstra os diagramas de radiação linear para a frequência de projeto da antena. Sendo possível constatar que se trata de uma antena que tem como característica um diagrama de radiação direcional como visto na literatura.

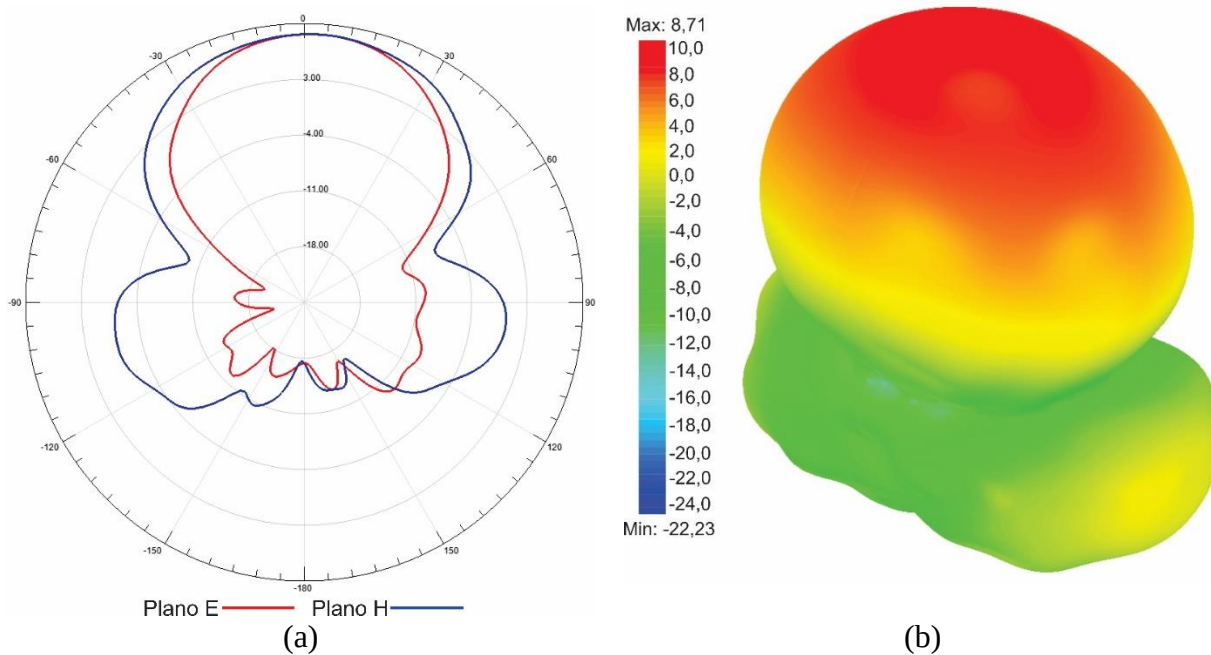
Figura 112: Diagrama de radiação linear.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 113 é ilustrado o diagrama de radiação 2D polar e 3D, sendo outras formas de se representar o diagrama de radiação, com isso complementando a visualização do mesmo. Na Figura 113 – a demonstra o diagrama de radiação 2D polar que por meio dele é possível notar que o feixe onde tem o seu valor máximo está deslocado em 2°. O valor máximo do ganho é 8,71 dB como é visto na Figura 113 – b e seu diagrama de radiação 3D, corroborando mais uma vez com a diretividade do diagrama de radiação da antena.

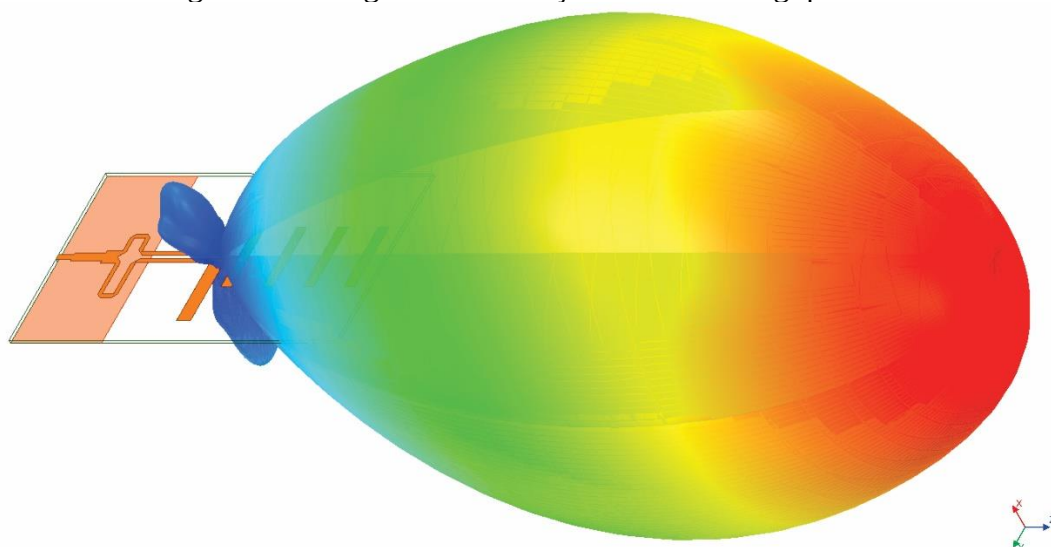
Figura 113: Diagrama de radiação: (a) 2D polar (b) 3D.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Ainda fazendo uso do HFSS® é possível visualizar por meio da Figura 114 o padrão de radiação *end-fire* da antena Yagi-Uda planar sendo essa característica herdada da antena yagi-uda convencional.

Figura 114: Diagrama de radiação da antena Yagi planar.



Fonte: Autoria própria, 2020.

7.1.2. Resultados Experimentais

Com a antena construída foi medido o coeficiente de reflexão e carta de Smith, as medições foram realizadas por meio da utilização de um *Vector Network Analyzer* (VNA) – Rhode & Schwarz, possuindo capacidade de medir na faixa de 100 kHz até 8,5 GHz. Na Figura 115 é mostrado o processo de medição com VNA R&S ZND disponibilizado pelo Laboratório de Telecomunicações da UFERSA.

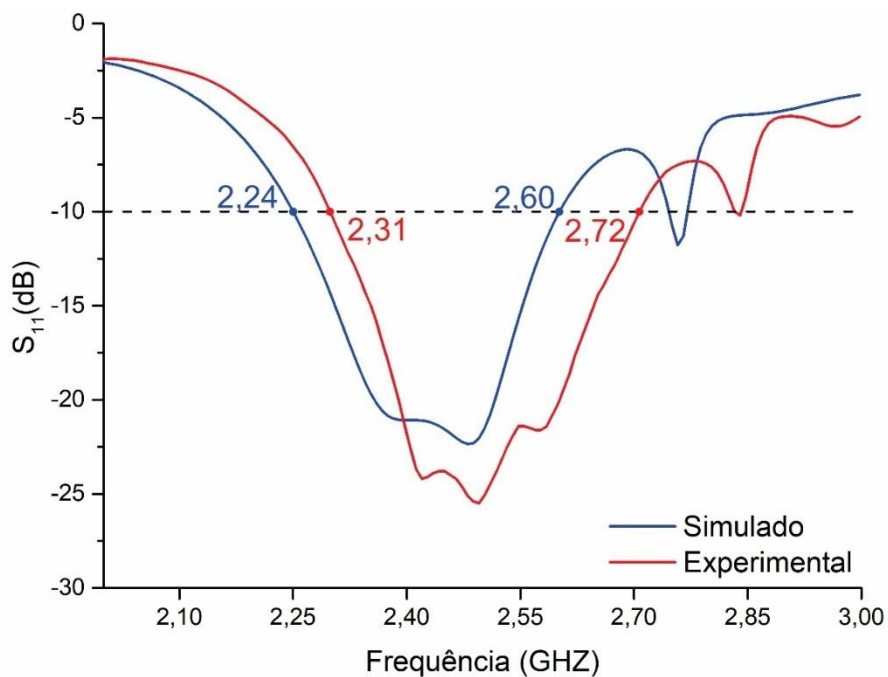
Figura 115: Medição do S_{11} por meio do VNA.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Obtido os valores experimentais do coeficiente de reflexão da antena construída foi gerado um gráfico comparando com os valores obtidos por meio das simulações, assim por meio da Figura 116 é possível observar a sobreposição das curvas. Analisando a Figura 116 é possível constatar um deslocamento de aproximadamente 4,61% para valores maiores, assim a largura de banda tem uma frequência inferior de 2,31 GHz e uma frequência superior de 2,72 GHz, totalizando assim uma largura de banda de aproximadamente 410 MHz, que igualmente ao valor simulado abrange todas as frequências banda *ISM* 2,4 GHz. Na frequência de ressonância de 2,45 GHz foi observado um valor de coeficiente de reflexão no valor de -23,95 dB.

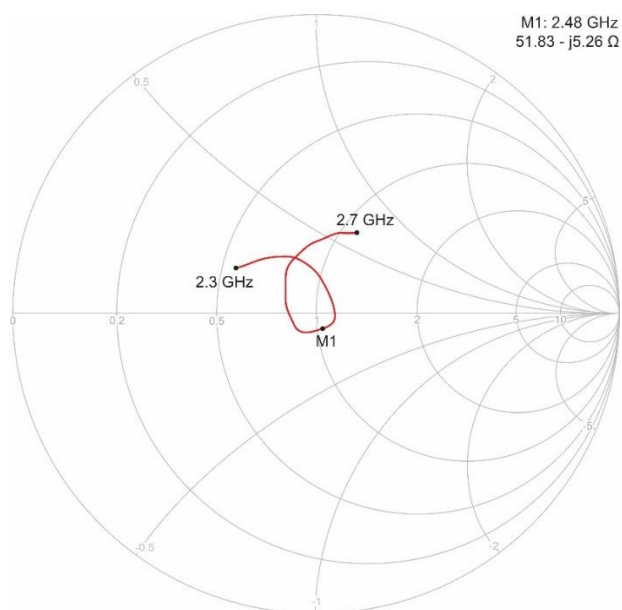
Figura 116: Coeficiente de reflexão experimental e simulado.



Fonte: Autoria própria, 2020.

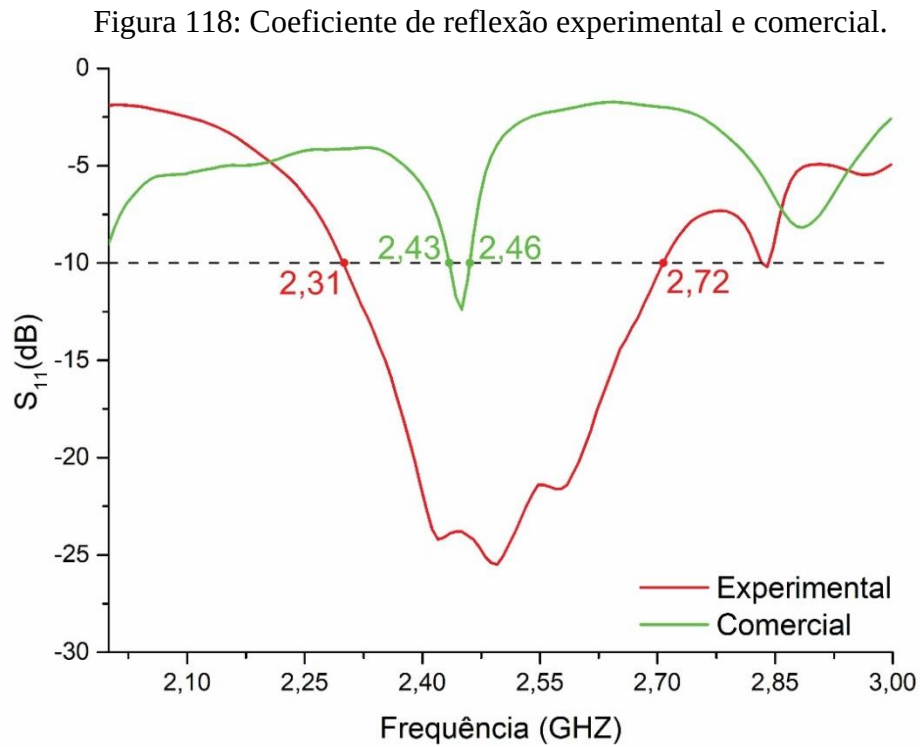
Na Figura 117 é apresentada a Carta de Smith para antena proposta, onde a curva foi construída para os valores situados entre a frequência inferior (2,3 GHz) e superior (2,7 GHz) da antena normalizados para 50Ω , para a frequência de 2,48 GHz foi retornado uma impedância no valor de $51,83 - j5,26$.

Figura 117: Carta de Smith da antena construída.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Fazendo um comparativo com uma antena Yagi-Uda comercial adquirida para a frequência de 2,45 GHz, a mesma se mostrou eficaz para essa aplicação porem teve uma largura de banda estreita, esse comparativo é observado por meio da Figura 118, que traz o coeficiente de reflexão da antena experimental (construída) e a antena comercial.

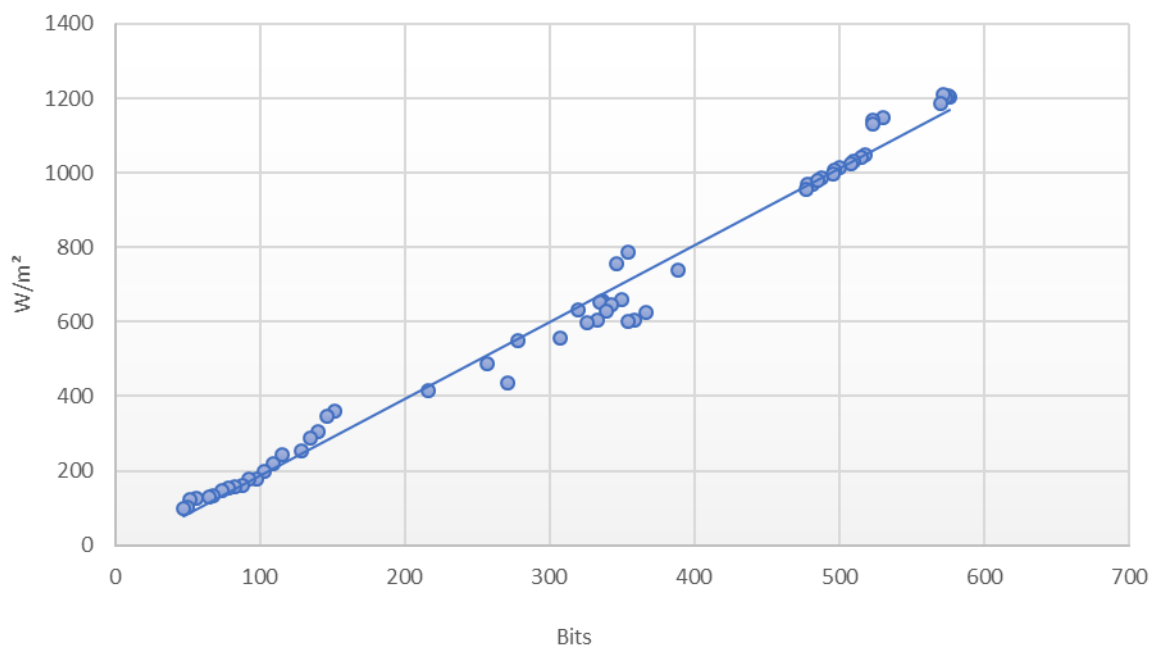


Fonte: Autoria própria, 2020.

7.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Após a coleta de dados na calibragem do piranômetro foi obtido um gráfico de dispersão que demonstra a relação entre a radiação solar em função da quantidade de bits onde é possível notar uma tendência linear na relação, no qual, foi feita uma regressão linear para obter uma curva tendência. Sendo vista na Figura 119.

Figura 119: Radiação solar em função dos bits e curva tendência.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Por intermédio da regressão linear foi possível encontrar a equação que relaciona a quantidade de bits com a quantidade de radiação, podendo ser vista na Equação 51.

$$Y = 2,0625x - 18,278 \quad (51)$$

Onde:

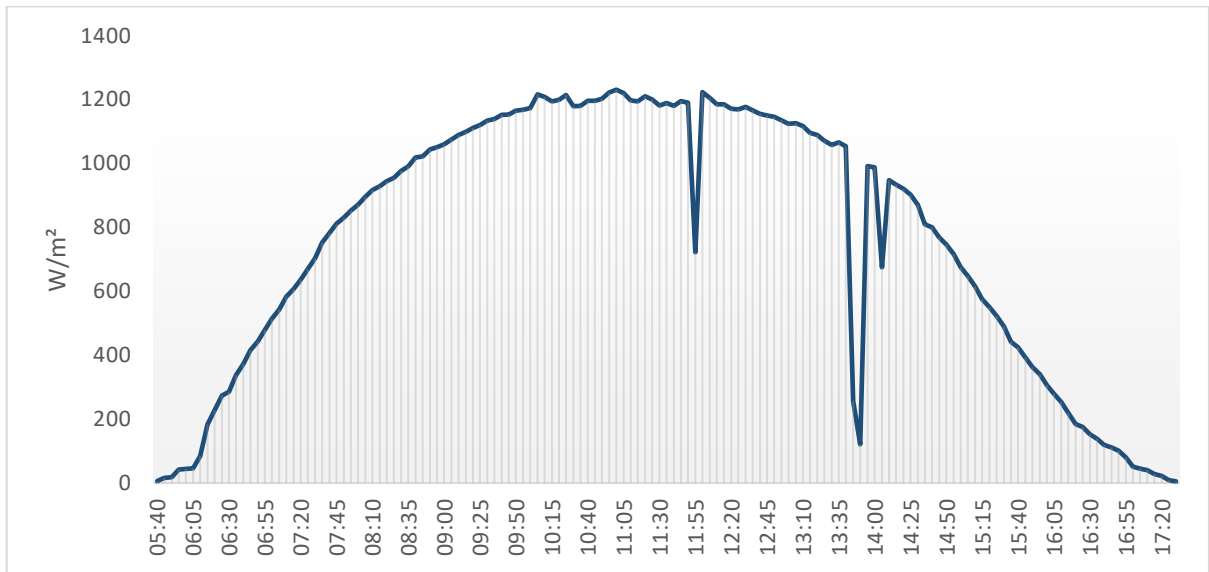
x = Quantidades de bits;

Y = Radiação solar.

As medições no dia 02/07/2020, teve como objetivo aferir o sensor de radiação, cujo as medições foram feitas de maneira simultâneas utilizando ambos equipamentos. Foram analisados os valores obtidos, que podem ser vistos no Apêndice A, transformando em gráficos para uma melhor visualização dos valores obtidos.

Por meio da Figura 120 é possível visualizar a curva de radiação diária coletados pelo MES-100, sendo possível notar algumas variações bruscas de radiação, decorrente a passagem rápida de nuvens.

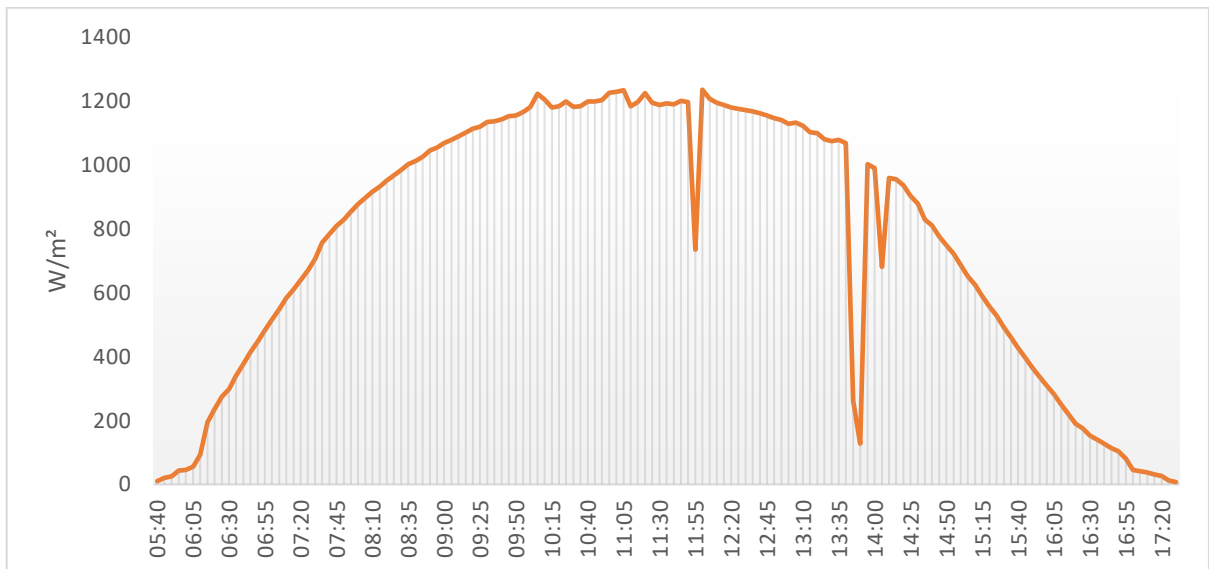
Figura 120: Curva de radiação obtida pelo MES-100 no dia 02/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 121 mostra a curva de radiação obtida pelo protótipo, tendo variação de radiação decorrente de passagens rápidas de nuvens.

Figura 121: Curva de radiação obtida pelo protótipo no dia 02/07/2020.

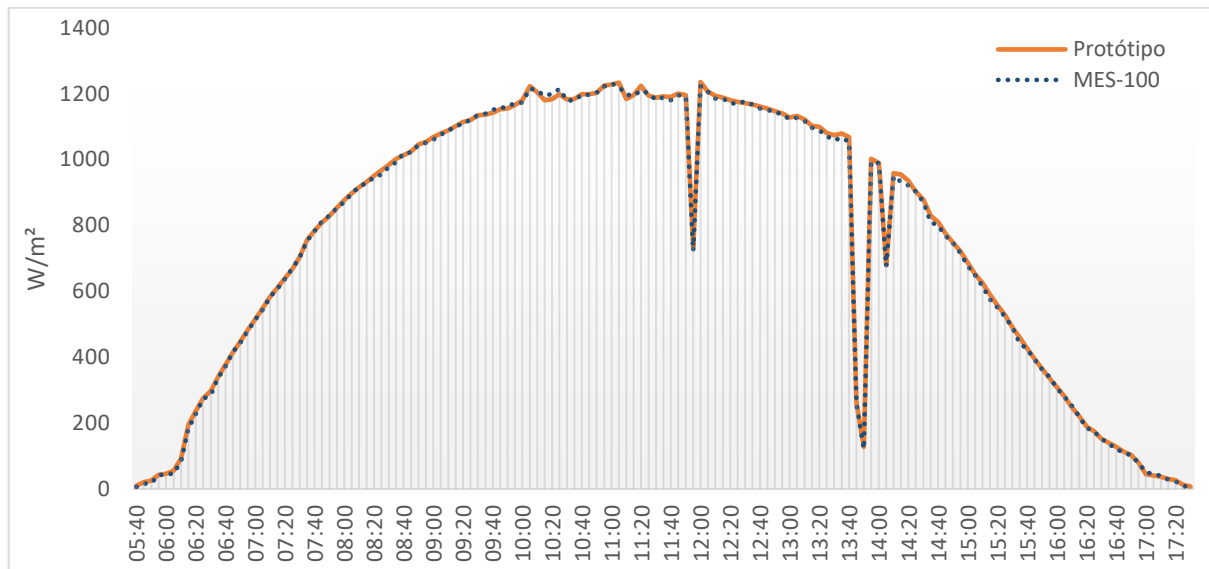


Fonte: Autoria própria, 2020.

Comparando as curvas de radiação obtidas pelo MES-100 e o protótipo é possível constatar o mesmo comportamento entre as duas curvas, uma semelhança relevante, com isso,

para uma melhor visualização o Figura 122 mostra as curvas de radiação obtidas pelos dois equipamentos sobrepostos.

Figura 122: Sobreposição das curvas de radiação do MES-100 e protótipo.

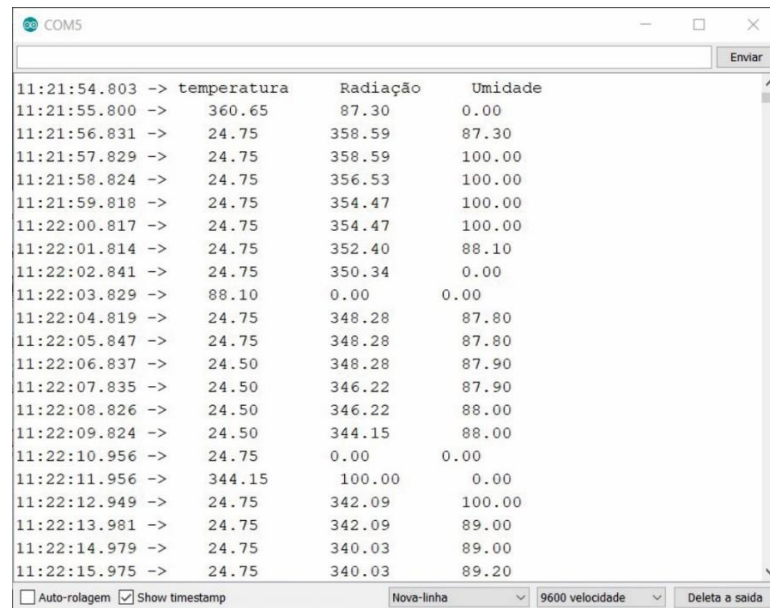


Fonte: Autoria própria, 2020.

Podendo constatar uma semelhança notável entre as curvas de radiação obtidas por meio do MES-100 e protótipo. As medias de radiação global diárias obtidas por cada instrumento foram 763,05 para o MES-100 e 759,54 para o protótipo com esses valores médios é possível calcular precisão do protótipo, com isso contatando um erro percentual de aproximadamente de 0,459 %.

Os dados foram observados pelo monitor serial do arduino no sistema de recepção, que teve como função de plataforma de monitoramento, na Figura 123 é possível visualizar uma captura de tela do monitor serial e como fica à disposição dos dados recebidos.

Figura 123: Plataforma de monitoramento.



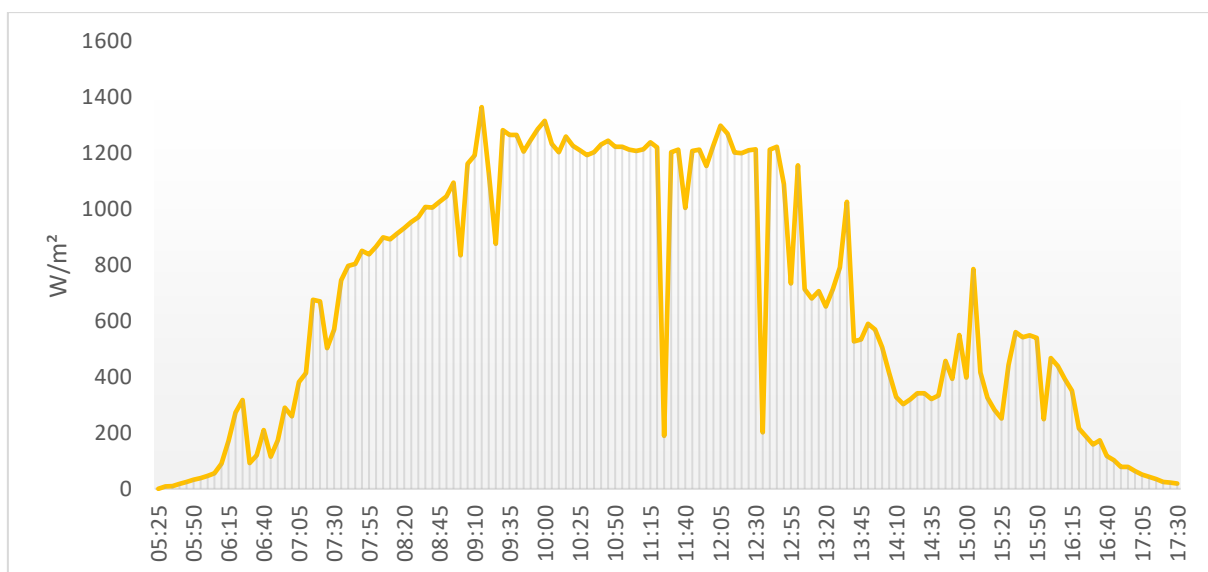
The screenshot shows a web application window titled 'COMS'. It contains a table with three columns: 'temperatura', 'Radiação', and 'Umidade'. The table lists 20 rows of data, each starting with a timestamp. The data shows fluctuations in temperature (mostly around 24.75), radiation (ranging from 0.00 to 360.65), and humidity (ranging from 87.30 to 100.00). At the bottom of the window, there are controls for 'Auto-rolagem' (unchecked), 'Show timestamp' (checked), a 'Nova-linha' button, a dropdown for '9600 velocidade', and a 'Deleta a saída' button.

Timestamp	temperatura	Radiação	Umidade
11:21:54.803 ->			
11:21:55.800 ->	360.65	87.30	0.00
11:21:56.831 ->	24.75	358.59	87.30
11:21:57.829 ->	24.75	358.59	100.00
11:21:58.824 ->	24.75	356.53	100.00
11:21:59.818 ->	24.75	354.47	100.00
11:22:00.817 ->	24.75	354.47	100.00
11:22:01.814 ->	24.75	352.40	88.10
11:22:02.841 ->	24.75	350.34	0.00
11:22:03.829 ->	88.10	0.00	0.00
11:22:04.819 ->	24.75	348.28	87.80
11:22:05.847 ->	24.75	348.28	87.80
11:22:06.837 ->	24.50	348.28	87.90
11:22:07.835 ->	24.50	346.22	87.90
11:22:08.826 ->	24.50	346.22	88.00
11:22:09.824 ->	24.50	344.15	88.00
11:22:10.956 ->	24.75	0.00	0.00
11:22:11.956 ->	344.15	100.00	0.00
11:22:12.949 ->	24.75	342.09	100.00
11:22:13.981 ->	24.75	342.09	89.00
11:22:14.979 ->	24.75	340.03	89.00
11:22:15.975 ->	24.75	340.03	89.20

Fonte: Autoria própria, 2020.

Após a constatação da precisão do sensor de radiação, foram feitas duas medições com o sistema completo, medindo parâmetros de radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e temperatura de operação do painel solar fotovoltaico as medições foram feitas nos dias 03/07/2020 e 04/07/2020 na Usina Mossoró II. A Figura 124 traz a curva de radiação solar no dia 03/07/2020, sendo possível visualizar as variações da radiação solar, tendo um pico de 1365,09 W/m² e com uma radiação média de aproximadamente 676,54 W/m².

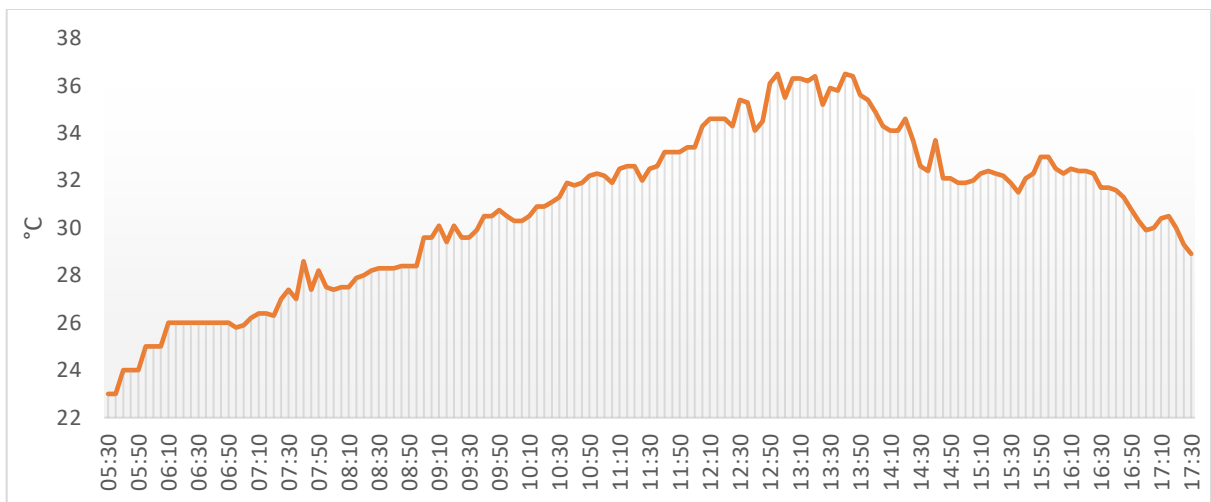
Figura 124: Radiação solar no dia 03/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Outro parâmetro observado foi a temperatura ambiente, que por meio da Figura 125 é possível visualizar a curva de temperatura no dia 03/07/2020, que traz um valor máximo de 36,5°C e uma mínima de 23°C, com isso durante o dia todo foi retornado uma temperatura média de 30,81°C.

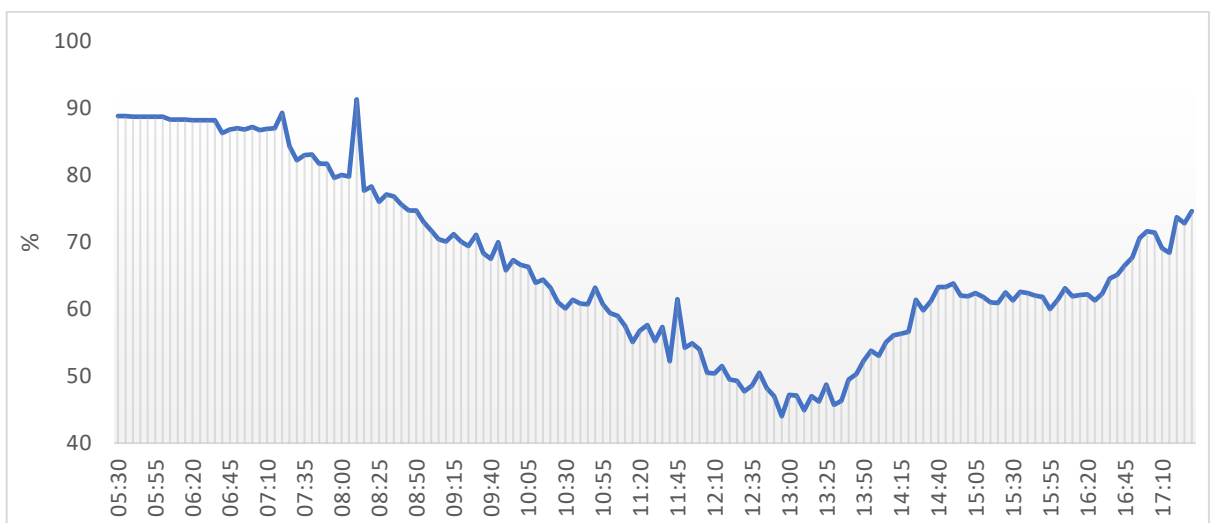
Figura 125: Temperatura ambiente no dia 03/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A umidade relativa do ar no dia 03/07/2020 é demonstrada pela curva na Figura 126, onde é possível constatar que o comportamento da mesma varia de acordo com a temperatura ambiente e os níveis de radiação, com uma umidade média de 66,84% atingido uma máxima de 91,3% e uma mínima de 44%.

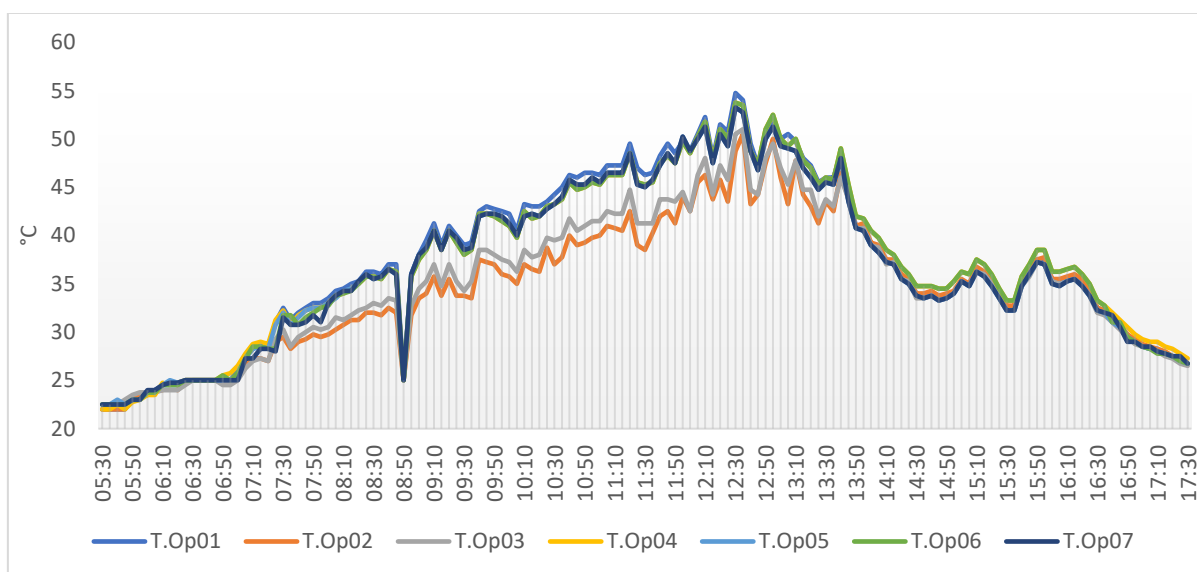
Figura 126: Umidade relativa do ar no dia 03/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Também foi observado dados da temperatura de operação do painel da usina, onde na Figura 127 é possível observar as curvas de temperaturas obtidas pelos sensores no decorrer do dia, a temperatura média obtida foi 36,5°C, com uma máxima de 52,9°C e uma mínima de 22,9°C. Observando que a placa em alguns períodos de tempo ultrapassa a temperatura nominal de operação, decorrente dessas temperaturas elevadas se tem uma redução no rendimento da placa.

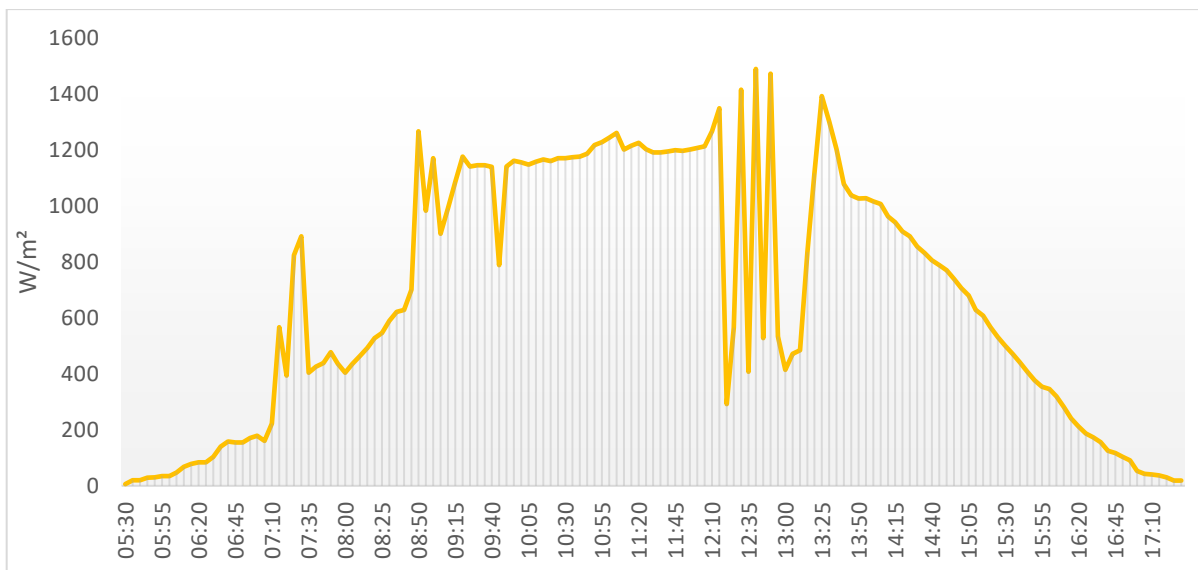
Figura 127: Temperatura de operação do painel no dia 03/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O segundo dia de coleta de dados foi o dia 04/07/2020 seguindo a mesma metodologia utilizada nos dias anteriores. Por meio da Figura 128 é capaz de observar a curva de radiação, constando variações no decorrer do dia, que teve variações decorrente a passagens de nuvens. Os valores obtidos da radiação solar foi uma radiação máxima de 1490,9 W/m² e radiação média de 680,8 W/m².

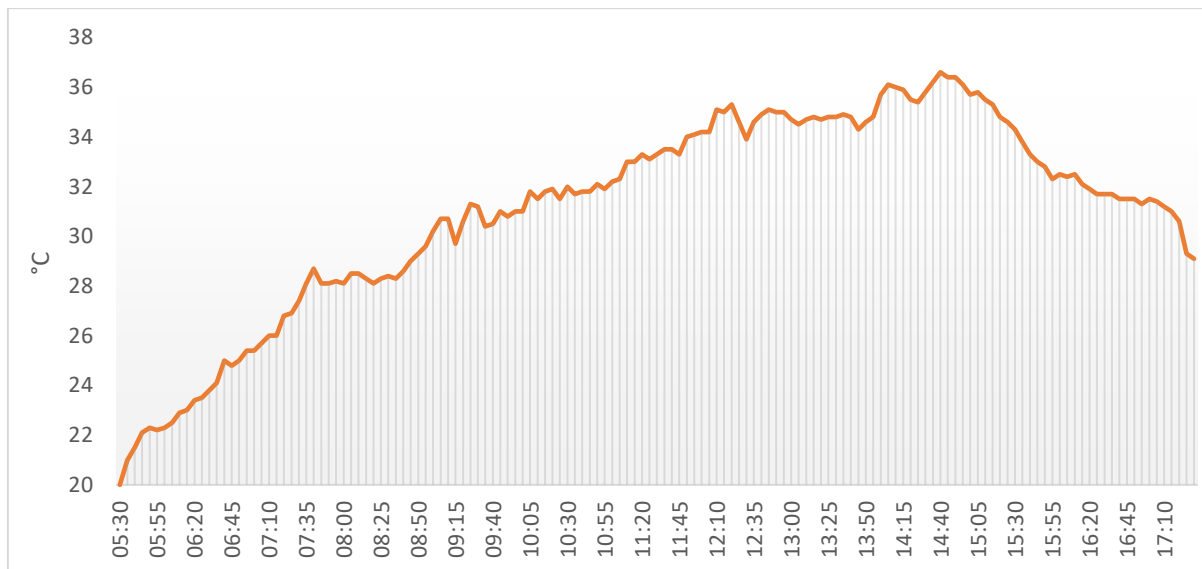
Figura 128: Radiação solar no dia 04/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A temperatura ambiente do dia 04/07/2020 é vista na Figura 129 que traz a curva de variação no dia, com uma temperatura máxima de 36,6°C, mínima de 20°C e uma temperatura média no decorrer do dia de 31,06°C.

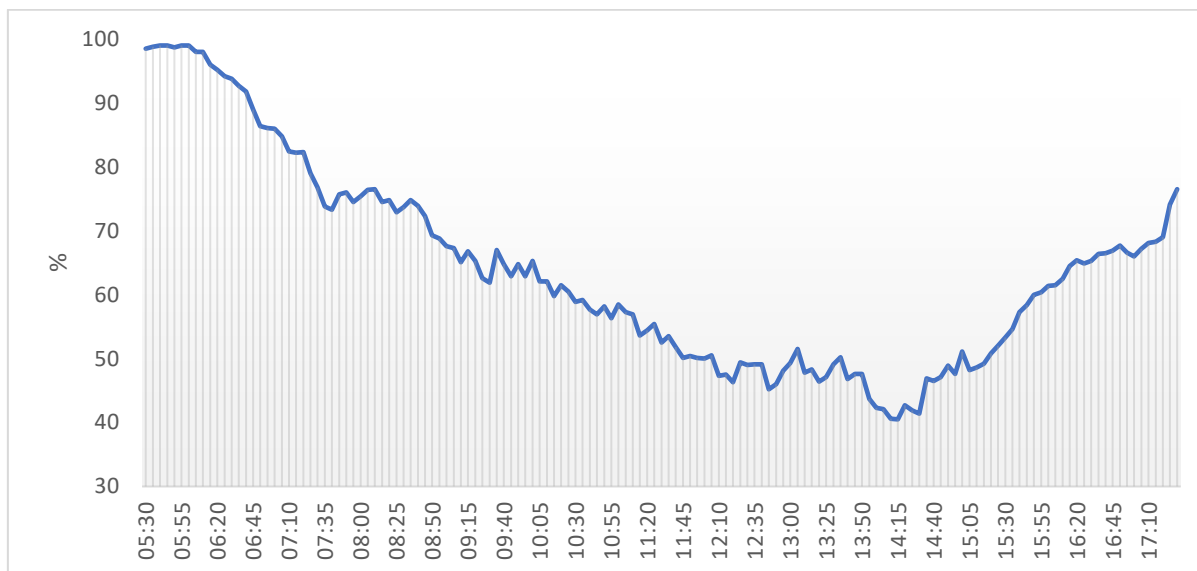
Figura 129: Temperatura ambiente no dia 04/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Os valores registrados da umidade relativa do ar são demonstrados na Figura 130, onde foi constatado uma umidade relativa mínima de 40,5%, uma máxima de 99% e uma média durante o decorrer do dia de 63,99%.

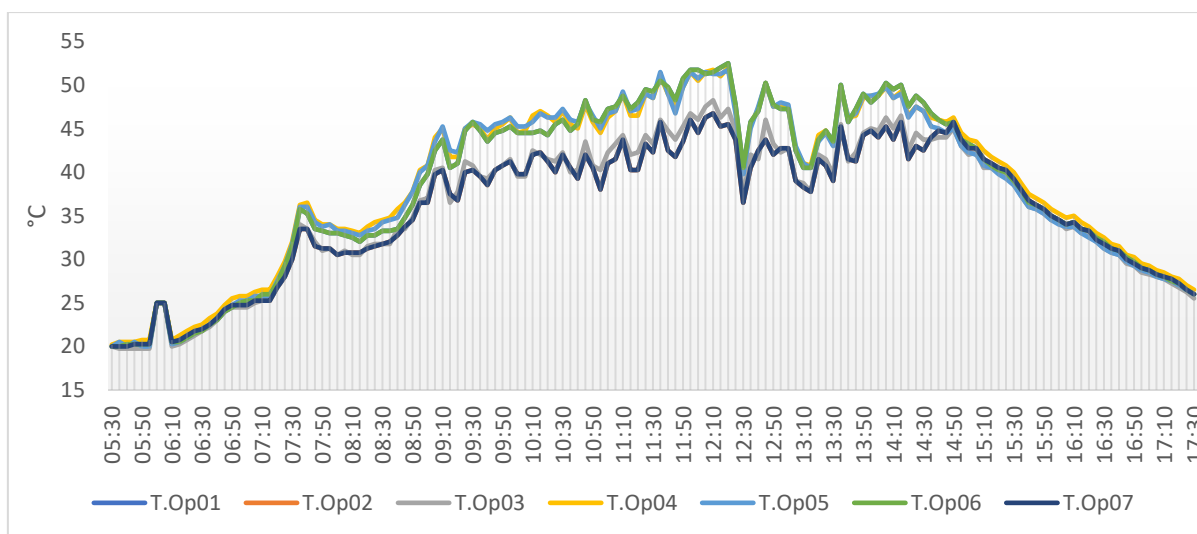
Figura 130: Umidade relativa do ar no dia 04/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A temperatura de operação do painel atingiu o valor máximo de 50,1°C, mínima de 19,99°C e uma média no decorrer de sua operação de 37,34°C. Que podem ser visualizadas na Figura 131 pelas curvas de temperatura de cada sensor, igualmente ao dia anterior foi constatado temperaturas acima da recomendada para operação.

Figura 131: Temperatura de operação do painel no dia 04/07/2020.

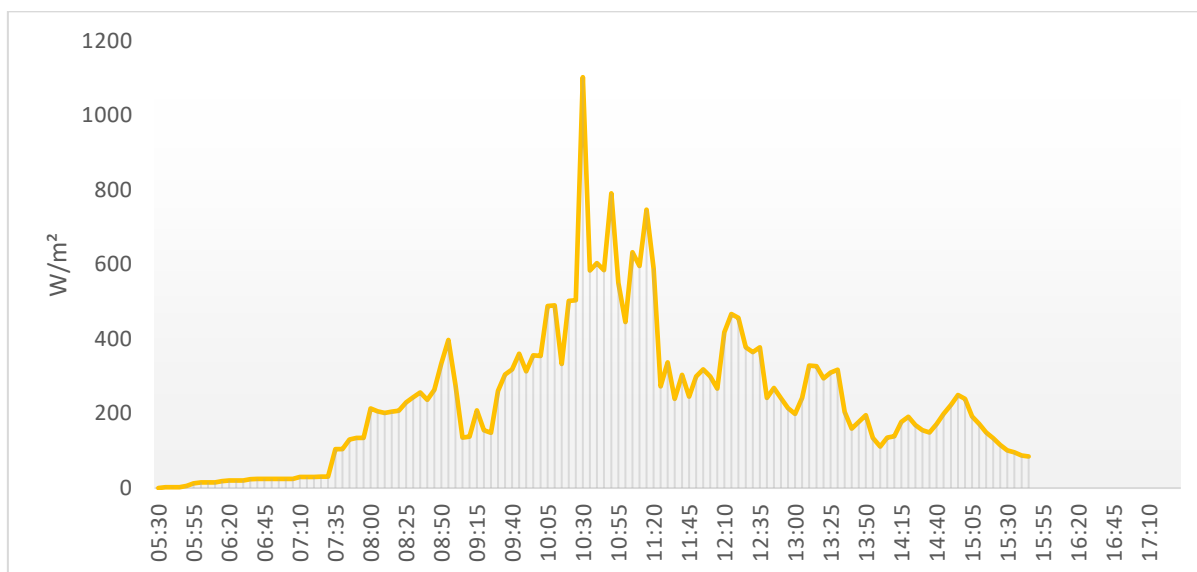


Fonte: Autoria própria, 2020.

O Terceiro dia medição foi feita no dia 06/07/2020, e a aquisição dos dados ocorreu em ambiente distinto da usina Mossoró II, a uma distância superior atingindo uma distância de aproximadamente 1680 metros do sistema de recepção dos dados, onde decorrente de uma dia muito chuvoso o sinal ficou oscilando muito durante o dia, decorrente as alterações no espaço livre e ao fato que o transceptor utilizado traz no seu *datasheet* um alcance máximo de 1100 metros, então o sinal chega ao receptor já atenuado, assim ficando suscetível a alterações dos parâmetros do espaço livre. O sinal foi perdido aproximadamente às 15:45 após o tempo ficar novamente nublado com pancadas de chuvas onde não foi possível fazer a reconexão do *link*, conforme mostrado nas Figuras 133-135.

Os parâmetros medidos foram a radiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Na Figura 132 é exposto a curva de radiação solar, sendo possível constar que o dia teve uma alta nebulosidade, com apenas um momento de sol, durante o tempo em que se teve a comunicação foi observado uma radiação máxima de 1102,1 W/m² e uma radiação média de 236,12 W/m².

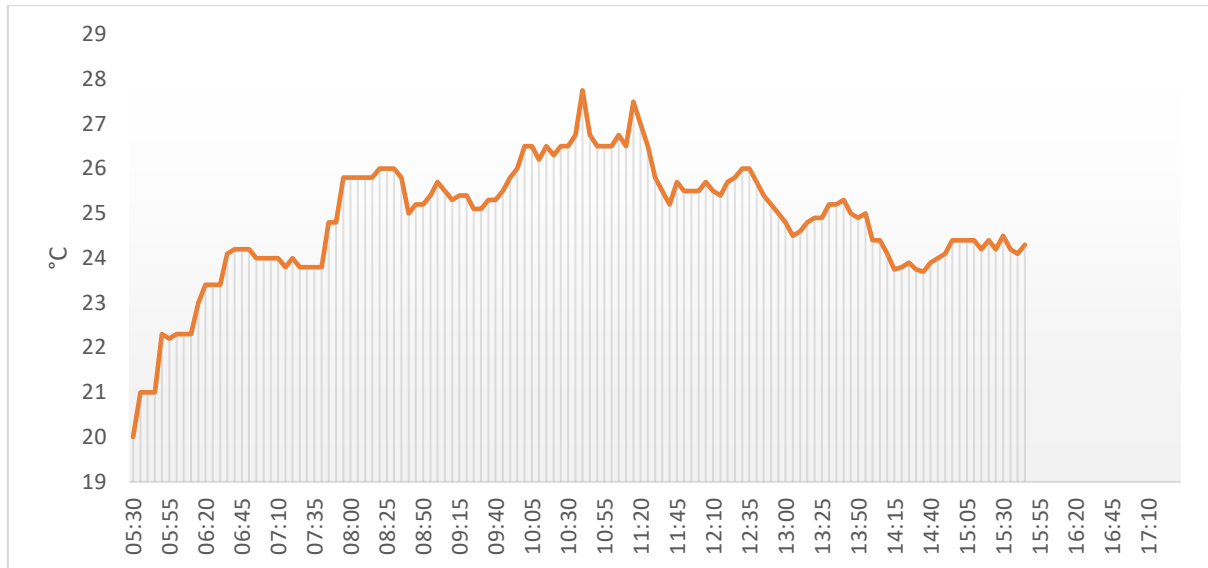
Figura 132: Radiação solar no dia 06/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A temperatura ambiente obtida pelo sistema foi abaixo dos dias anteriores de medições, com uma máxima de 27,75°C e uma temperatura média durante o período de medição de 24,85°C. podendo ser visto a curva que representa a temperatura ambiente durante o período de 05:30 às 15:45, por meio da Figura 133.

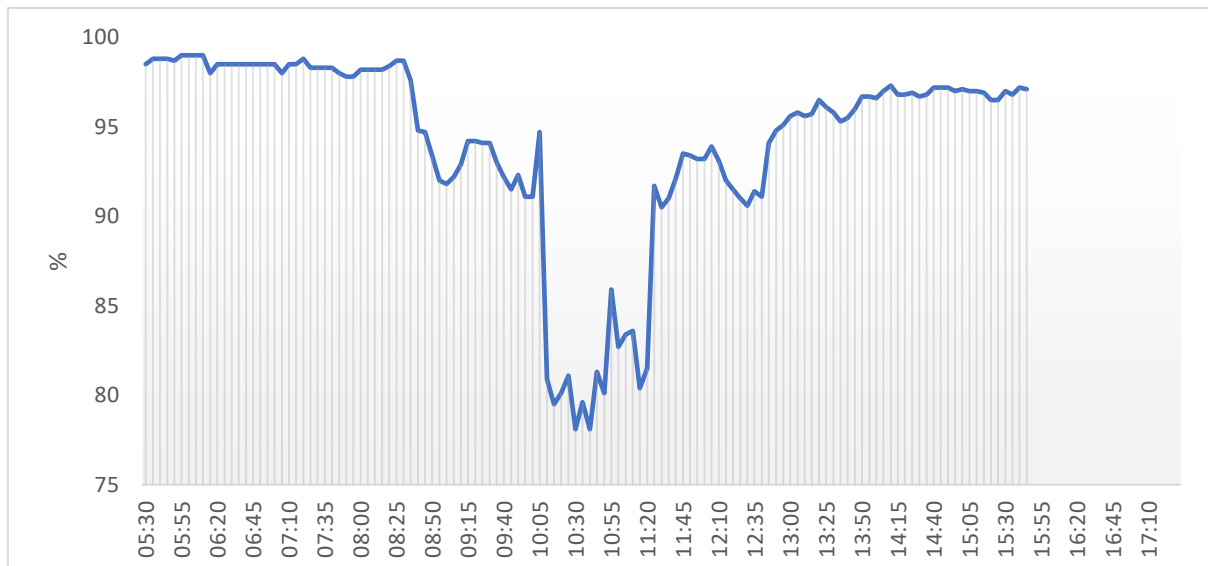
Figura 133: Temperatura ambiente no dia 06/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 134 é apresentada a curva de umidade relativa do ar, tendo como valores uma máxima umidade de 99%, mínima de 78,1% e uma média de 78,1% no período que se obteve comunicação.

Figura 134: Umidade relativa do ar no dia 06/07/2020.

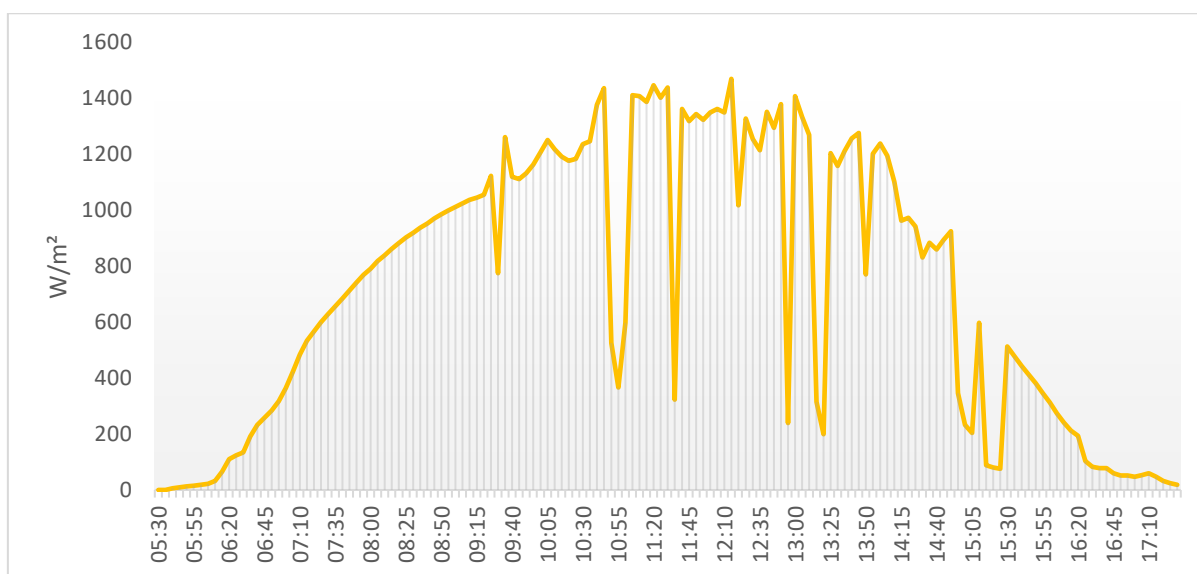


Fonte: Autoria própria, 2020.

No dia 08/07/2020 foram feitas novas medidas em novo local em local mais próximo ao sistema de recepção porém foi procurado um local que se tivesse obstáculos, para constatar a funcionalidade do sistema, sendo instalado a uma distância de 170 metros, que mesmo com os obstáculos que no caso seria plantas foi capaz de manter um link de sinal estável sem perdas de sinal em nenhum momento durante toda a medição. Igualmente ao dia 06/07/2020 foram medidos parâmetros de radiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

Os dados de radiação solar do dia 08/07/2020 podem ser observados por meio da Figura 135, sendo obtivo um valor máximo de 1470,3 W/m² e uma média de radiação no dia de 725,39 W/m².

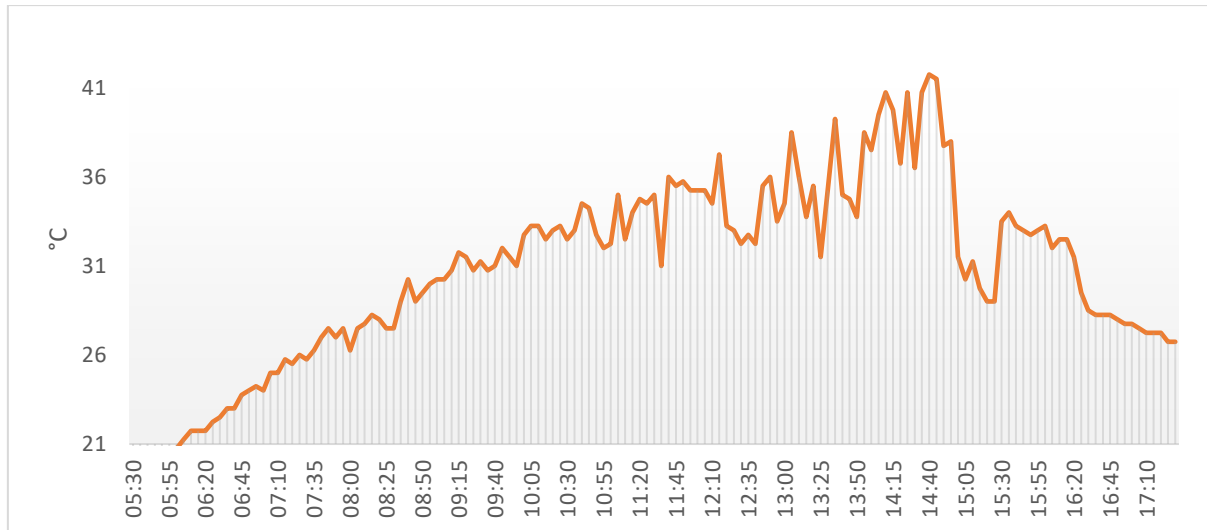
Figura 135: Radiação solar no dia 08/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A curva de temperatura ambiente é exposta na Figura 136, onde se teve uma temperatura mínima de 20,1°C, máxima de 41,75°C e uma média 30,8°C durante todo horário de sol.

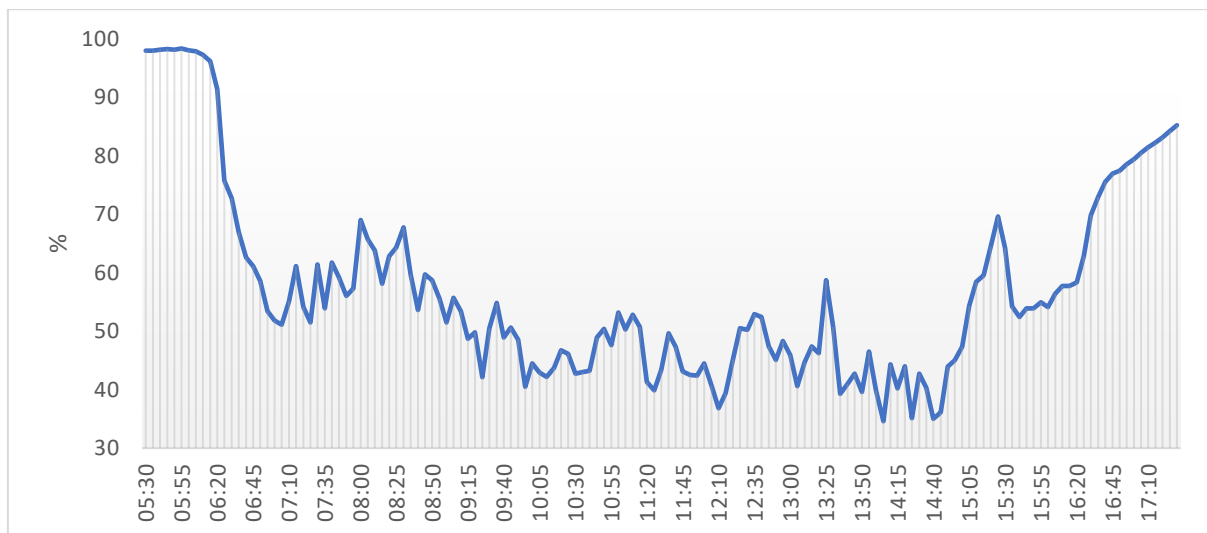
Figura 136: Temperatura ambiente no dia 08/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Os níveis de umidade relativa do ar, podem ser vistos na Figura 137, com valores de máximo 98,3%, mínima de 34,6% e média de 56,99%.

Figura 137: Umidade relativa do ar no dia 08/07/2020.



Fonte: Autoria própria, 2020.

De acordo com os gráficos dos dados obtidos, pode ser visto ao longo de 4 dias de medições as variações de seus valores de acordo com as mudanças climáticas. Assim pelos dados obtidos é possível observar que o sistema como um todo funcionam satisfatoriamente ao permitir a coleta de dados a distância.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho realizou-se um estudo e o desenvolvimento de um sistema de telemetria aplicado a parâmetros influenciadores na geração solar fotovoltaica, foram estudadas e desenvolvidas os setores de sensoriamento e comunicação para elaboração deste trabalho. Para este fim foram descritos conceitos importantes para o desenvolvimento do trabalho, contribuindo em um bom embasamento teórico sobre o conteúdo. Com a aplicação das técnicas para o desenvolvimento de uma antena Yagi-Uda planar proposta para o receptor e transmissor, sendo o processo de projeto auxiliado por meio do uso do software da ANSYS HFSS® para realizações das simulações. O procedimento de fabricação das antenas se mostrou importante por proporcionar a possibilidade de observar o comportamento real do dispositivo e comparar com as simulações realizadas. Os resultados obtidos nas medições da antena se mostraram semelhantes aos resultados simulados, o que reforça a importância de se fazer simulações antecedentes a fabricação do dispositivo. Mesmo havendo deslocamento de frequência no dispositivo proposto a largura de banda atende toda a faixa de aplicação.

Para aplicação experimental, as antenas foram desenvolvidas para serem integradas no sistema de rádio frequência (receptor/transmissor) do sistema de telemetria desenvolvido para a aquisição de parâmetros influenciadores na geração solar fotovoltaica e enviar a distância superiores a 1000 metros. O sistema de transmissão de dados se mostrou eficaz em transmissão de dados a distâncias superiores a 1000 metros, atingindo a transmissão de dados a uma distância de 1680 metros, comprovando assim a eficácia da antena, pois, o transceptor utilizado traz a informação que o seu alcance máximo com as antenas de fábrica é de no máximo 1100 metros.

O desenvolvimento do sistema de aquisição de dados se comportou como esperado, sendo o ponto chave o desenvolvimento de um sensor capaz de obter valores de radiação solar com uma precisão aceitável, algo que foi alcançado, com valores semelhantes a um sistema comercial. Os demais sensores por se tratarem de sensores comerciais, não se faz necessário aferir a precisão dos mesmos com outros sensores já comerciais.

Com o sistema de aquisição e transmissão elaborados foram implementados em três pontos diferentes, na Usina Mossoró II, onde não se foi possível obter comunicação decorrente de visada direta entre as antenas. No segundo ponto a uma distância de 1680 metros onde foi possível obter a visada porém o sinal chegava ao receptor com grande atenuação, assim ficando suscetível a variações no espaço livre. No terceiro ponto a uma distância de 200 metros, porém

com a adição de vegetação como obstáculo, onde se teve comunicação sem nenhuma interferência. Com isso conclui-se que o sistema de telemetria proposto cumpriu seu objetivo de fazer a aquisição de dados que influenciam na geração solar fotovoltaico e na transmissão.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se:

- Implementação de um modo de economia de energia, para uma maior durabilidade das baterias;
- Elaboração de uma PCI microcontrolada exclusiva para o sistema de telemetria, com sistema de aquisição e transmissão embutidas;
- Implementar um transceptor na faixa de 2,4 GHz com uma potência maior a fim de reduzir perdas;
- Desenvolvimento de uma plataforma de monitoramento para computador ou nuvem, facilitando o acesso aos dados.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, M. S. de; QUEIROZ, W. J. L. de. **Ondas eletromagnéticas e Teoria de Antenas**. São Paulo: Erica, 2010.

ALFACOMP (Porto Alegre). **Calculo de rádio enlace para radio modem**. 2018. Disponível em: <https://alfacompbrasil.com/2018/06/13/calculo-de-radio-enlace-para-radio-modem/>. Acesso em: 21 maio 2020.

ALFACOMPBRASIL. **CCO – Centro de Controle e Operação da telemetria de água e esgoto**. 2019. Disponível em: <https://alfacompbrasil.com/2019/05/07/cco/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

ALFACOMPBRASIL. **Antena yagi 900MHz -17dBi**. Disponível em: <https://www.alfacomp.ind.br/antenas/antena-yagi-900mhz-17dbi>. Acesso em: 12 jun. 2020.

AMITEC, 2015. Disponível em: <http://training.amitec.co/home/antenna-positioner-transmission-line>>. Acesso em: 21 out 2017.

ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. **PLANO DE ATRIBUIÇÃO, DESTINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL**. Brasília: Espectro, Órbita e Radiodifusão, 2020.

ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. **Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas**. 2015. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/setorregulado/component/content/article/129-mantenha-se-informado/144-informacao-4?Itemid=257>. Acesso em: 18 maio 2020.

AOSONG ELECTRONICS CO. **AM2301A**: temperature and humidity sensor with communication line. Temperature and Humidity Sensor with communication Line. 2020. Disponível em: <http://www.aosong.com/en/products-47.html>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, p.1073.2005.

BALANIS, C. A. **Teoria das Antenas: Análise e Síntese**. vol. 1 e 2. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BANZI, M. **Primeiros passos com o Arduino**. São Paulo: Novatec, 2011.

BELTRÃO, R. E. de A. **Efeito da temperatura na geração de energia de módulos fotovoltaicos submetidos a condições climáticas distintas. estudo de caso para as localidades de Recife e Araripina**. 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/9740/arquivo8636_1.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2020.

BEZERRA, R. R. de M. **DESENVOLVIMENTO DE FILTROS ESPACIAIS FSS COM ELEMENTOS POLARES PARA APLICAÇÕES INDOOR DE REDES LOCAIS SEM FIO**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, PPGE, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

BHARTIA, P. et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Boston: Artech House, 2000. 434 p.

BIRD, T. S., **Definition and Misuse of Return Loss**, IEEE antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, pp. 166-167, 2009.

BLUM, J. **Explorando o Arduino: técnicas e ferramentas para magias de engenharia**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016.

BOLZAN, M. B. **Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores**. 2014. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BRAGA, N. C. **O básico sobre os Microcontroladores: parte 1 (MIC139)**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/13263-obasico-sobre-os-microcontroladores-parte-1-mic139>>. Acesso em: 07 jun. 2020.

BRANQUINHO, O. C.; REGGIANI, N.; ANDREOLLO, A. G. **REDES DE COMUNICAÇÃO DE DADOS SEM FIO: Uma Análise De Desempenho**. Campinas, jun. 2011.

BRASIL. Aneel. Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração. **BIG - Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil**. 2019. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

BRIANEZE, J. R. **Um Novo Tipo de Antena para Radar Aerotransportado: Yagi Tridimensional**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Microondas e Óptica, Unicamp, São Paulo, 2008.

BUTLER, J. et al. **Wireless Networking in the Developing World**. 3. ed. Scotts Valley: Createspace, 2013. 524 p. Disponível em: https://textbookequity.org/Textbooks/wndw3-wireless%20networking_developing_world.pdf. Acesso em: 24 maio 2020

CANTOR, G. A. R. **INFLUÊNCIA DOS FATORES CLIMÁTICOS NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL**. 2017. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CAPOVILLA, C. E. **ANTENAS PLANARES APLICADAS ÀS COMUNICAÇÕES MOVEIS DE ULTIMAS GERAÇÕES UTILIZANDO ELEMENTOS QUASI-YAGI**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Campinas, 2004.

CARVALHO, Á. G. de; BADINHAN, Luiz Fernando da Costa. **Eletrônica: telecomunicações**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

CHAGAS, M. A. R. das. **Otimização do Projeto da Antena Yagi-Uda Pelo Método Particle Swarm Optimization - PSO**. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Matemática e Estatística, Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

CHAN, K-C., HARTER, A. **Impedance Matching and the Smith Chart – The Fundamentals**. RF antennas Tx/Rx. p. 52-66. Jul. 2000.

CHENG, D.; CHEN, C. Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays. **1972 Antennas and Propagation Society International Symposium**, [s.l.], v. 21, n. 5, p.615-623, set. 1973. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <http://dx.doi.org/10.1109/aps.1972.1146892>.

CONNECTWI. **ANTENA OMNIDIRECIONAL 2.4GHZ 12DBI HG2412U-PRO - HYPERLINK**. 2020. Disponível em: <https://www.connectwi.com.br/antena-omnidirecional-2-4ghz-12dbi-hg2412u-pro-hyperlink.html>. Acesso em: 10 jun. 2020.

CORREIA, D.; SOARES, A.j.m.; TERADA, M.a.b.. Optimization of gain, impedance and bandwidth in Yagi-Uda antennas using genetic algorithm. **1999 Sbmo/ieee Mtt-s International Microwave and Optoelectronics Conference**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, p.41-44, ago. 1999. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/imoc.1999.867038>.

COSERN (Rio Grande do Norte) (Org). SOMOS A ENERGIA PARA CRIAR O FUTURO. 2018. Disponível em: <<http://servicos.cosern.com.br/residencial-rual/pages/informacoes/normas-e-padroes.aspx>>. Acesso em: 25 mai. 2020.

COSTA, F. C. da. **Uma nova proposta de antenas quasi-yaho banda larga para comunicação sem fio**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grand, Natal, 2006.

DIAS, R. R. M. et al. **PROJETO DE ENLACE DE MICRO-ONDAS ASSOCIADO A ATENUAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE E ATMOSFÉRICA UTILIZANDO SOFTWARE COMERCIAIS**. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 14., 2016, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: Ufu, 2016. p. 31-36.

DEPARTMENT OF THE ARMY TECHNICAL MANUAL. **TM 11-486-6**: Electrical communications systems engineering: radio. EUA: Department of The Army, 1956.

EIBERT, T. F.; VOLAKIS, J.L. Fundamentals of Antennas, Arrays, and Mobile Communications. In: VOLAKIS, John L. **Antenna Engineering Handbook**. 4. ed. Ohio: Mcgraw-hill, 2007. p. 3-77.

ENERCONS. **Consultoria para economia na fatura de energia migração para o mercado livre e geração distribuída**. Disponível em: <<http://www.enercons.com.br/produtos-e-servicos/consultoria-para-economia-na-fatura-de-energia-migracao-para-o-mercado-livre-e-geracao-distribuida/26/edital-para-arrendamento-de-cghs-p-geracao-distribuida>>. Acesso em: 29 mai. 2019.

EURAAP, EUROPEAN ASSOCIATION ON ANTENNAS AND PROPAGATION. **ANTENNAS RESEARCH & APPLICATIONS**. 2018. Disponível em: <http://www.antennasvce.org/Public/Antenna>. Acesso em: 07 maio 2020.

FELBER, A.; LUGO, A.; FELBER, Y. **Evolução do Mercado de Geração distribuída (2007 a 2018)**. 2019. Disponível em: <https://www.epowerbay.com/post/2019/01/07/gera%C3%A7%C3%A3o->

distribu%ADda-evolu%A7%A3o-do-mercado-2007-a-2018. Acesso em: 15 maio 2020.

FERNANDES, E. M. F. **Aplicação de Superfície Seletiva em Frequência para Melhoria de Desempenho de Sistemas de Antenas Tipo Banda Dupla**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

FELICE, F. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ENLACES PONTO-APONTO UTILIZANDO A FAIXA DE FREQUÊNCIA NÃO LICENCIADA DE 2,4GHZ EM TECNOLOGIA SPREAD SPECTRUM**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FILHO, V. A. A. **Arranjo de Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

FLUKE, Termômetro IR visual VT02. Base de dados FLUKE. São Paulo: Fluke, 2018. Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/termometros/termometrosdeinfravermelhos/vt02-visual-ir-thermometer.htm?pid=75051>>. Acesso em: 25 mai. 2020.

FONSECA, B. Hardware livre: tecnologia acessível a todos. 2017. Disponível em: <<https://www.redbull.com/br-pt/hardware-livre-tecnologia-acessivel-a-todos>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

FRENZEL, L. E. **Fundamentos de Comunicação Eletrônica: linhas, micro-ondas e antenas**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FUSCO, V. F. **Teoria e Técnica de Antenas: Princípios e Prática**, São Paulo: Bookman, 2006.

GOMES, G. G. R. **Sistemas de rádio enlaces digitais**. São Paulo: Erica, 2013. 352 p.

Gupta, K. C., Garg, R. e Chadha, R. (1981). **Computer-aided design of microwave circuits**, first edn, Artech.

HUKSEFLUX. **LP02 pyranometer**. Disponível em: <https://www.hukseflux.com /product /lp02-pyranometer?referrer=/product_group/pyranometer>. Acesso em: 20 mai. 2020.

IEEE STANDARDS. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE, New York, Março de 2012. 1-2793.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **Std 145**: IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1973. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7366738>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

INSTRUTHERM. **Mes-100-**. Disponível em: <<https://www.instrutherm.net.br/medidor-de-energia-solar-mod-mes-100-digital-portatil.html>>. Acesso em: 06 mar. 2020.

IRENA. **Statistics Time Series**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. Acesso em: 10 maio 2020.

JAMHOUR, E. **Comunicação sem Fio: wlan (802.11). WLAN (802.11)**. 2017. Disponível em: <http://www.ppgia.pucpr.br/~jamhour/Pessoal/Atual/WLAN-Parte1.pdf>. Acesso em: 19 maio 2020.

JASIK, H. Fundamentals of Antennas. In: JOHNSON, Richard C. **Antenna Engineering Handbook**. 3. ed. New York: Mcgraw-hill, 1993. Cap. 1. p. 36-77

KHODIER, M.; AL-AQIL, M. Design and Optimization of Yagi-Uda antenna arrays. **Iet Microwaves, Antennas & Propagation**, [s.l.], v. 4, n. 4, p.426-436, abr. 2010. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-map.2009.0054>. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5453094>>. Acesso em: 28 jul. 2019

KRAUS, John D. **Antennas**. New Delhi: Tata Mcgraw-hill, 1997.

KUMAR, G.; RAY, K. **Broadbanding Microstrip Antennas**. [S.I]: Artech House, 2003.

LAGHROUCHE, M.; ATTAF, A.; ZIANI, R.; AMEUR, S. Design of a Microcontroller Based Automated Pyranometer. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, [s.l.], v. 1, n. 08, p. 1106-1110, abr. 2010. AEDERMACP (European Association for the Development of Renewable Energies and Power Quality). <http://dx.doi.org/10.24084/repqj08.598>.

LEONG, K. M. K. H.; ITOH, Tatsuo. Printed Quasi-Yagi Antennas. In: WATERHOUSE, Rod. **Printed Antennas for Wireless Communications**. Pharad: John Wiley & Sons Ltd, 2007. p. 69-100.

LI-COR. **LI-200R Pyranometer**. Disponível em: <<https://www.licor.com/env/products/light/pyranometer.html>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

LOPEZ, I.V. (Org.). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**: Guia de Orientação. Rio de Janeiro: FGV, dezembro 2002. 90 p. Disponível em: Acesso em: 09 maio. 2020.

MA, M. T. Arrays of Discrete Elements. In: JOHNSON, R. C. **Antenna Engineering Handbook**. 3. ed. Geórgia: Mcgraw-hill, 1993. p. 78-111.

MAIA, L. **Sistemas de radioenlaces digitais**: Santa Rita do Sapucaí: Inatel, 2015. Color. Disponível em: <https://dadospdf.com/download/cap1-intro-sistema-radio-parte-_5a4d10c1b7d7bcab6730c7481_pdf>. Acesso em: 13 jun. 2019.

MATTOS, G. M. **ESTUDO DE RENDIMENTO E TEMPERATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM USO DE TECNICA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR**. 2016. 88 f, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MAZZER, D. **Radio Cognitivo para internet das coisas**. 2016. 161 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado em Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, 2016.

MAXIM INTEGRATED. **DS18B20-PAR**. 2020. Disponível em: https://www.maximintegrated.com/en/products/sensors/DS18B20-PAR.html/tb_tab0. Acesso em: 12 jun. 2020.

MCROBERTS, M. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

MEDEIROS, J. C.d de O. **Princípios de Telecomunicação**: Teoria e Prática. 2. ed. São Paulo: Erica, 2007.

MENDES, N. A. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES SEM FIO BASEADA EM MECANISMOS DE CRIPTOGRAFIA**. 2011. 48 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialista em Configuração e Gerenciamento de Servidores e Equipamentos de Rede, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., Curitiba, 2011.

MIGUEL, D. de S. **Análise do Padrão IEEE 802.11g Para Comunicação De Um Sistema De Controle Distribuído De Semáforos**. 2015. 64 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado em Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**. 2. ed. Washington: Ieee Press, 2005.

MORAES, A. F. de. **Redes sem fio**: instalação, configuração e segurança. São Paulo: Erica, 2010. 301 p.

MORAES, L. B. **Antenas Impressas Compactas para Sistemas WIMAX**, Dissertação de Mestrado: Universidade de São Paulo, 2012.

MORÃES, Martin José Fagundes. **Comunicação de Dados Por Rádio Frequência**. 2001. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MOURA, G. B. de A. **METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Fitotecnia, Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **NBS 688: Yagi Antenna Design**. Colorado: U.S Department of Commerce, 1976.

NÚÑEZ, A. F. **Uma Introdução ao ARDUINO e suas Aplicações na Robótica**. Recife: André F. Núñez, 2012. Color. Disponível em:
<http://pet.inf.ufpel.edu.br/sacomp/2012/palestras/SACOMP2012-29_05-4.Arduino.pdf>.
Acesso em: 10 jun. 2020.

ORACOM. **Antena Fixa Direcional Tipo Yagi UHF - SLYAG-10U/PE**. 2019. Disponível em: <http://www.oracom.com.br/site/index.php?page=shop.product_details&flypage=&product_id=195>. Acesso em: 17 out. 2019

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

PIAU, D. de B. **Projeto de dimensionamento de enlace de rádio associado a atenuações devido à chuva utilizando celplan e pathloss**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.

QIAN Y, D. WR, KANEDA N. I. T. **Microstrip-fed Quasi-Yagi Antenna with Broadband Characteristics**. Electron Lett. 1998;34 (23):2194–2196.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. 2. ed. São

Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ROCHOL, J. **Sistemas de comunicação sem fio: conceitos e aplicações** [recurso eletrônico]. Porto Alegre: Bookman, 2018.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SANTOS, H. W. dos. **Desenvolvimento de Antenas de Microfita Miniaturizadas com Polarização Circular para Sistema de Comunicação sem Fio**. 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SHT TELEMETRIA (São Paulo). **TELEMETRIA INDUSTRIAL**. 2020. Disponível em: <http://www.telemetriasht.com.br/equipamentos-telemetria/telemetria-industrial.php>. Acesso em: 09 jun. 2020.

SIGMA SENSORS (São Paulo). **Estação Pluviométrica Automática com Telemetria de Dados EP-RX-100**. 2020. Disponível em: <https://sigmasensors.com.br/produtos/estacao-pluviometrica-automatica-com-telemetria-de-dados-ep-rx-100>. Acesso em: 14 jun. 2020.

SIGNALBOOSTER. **BUILDING YAGI ANTENNA - FOR OUTDOOR EXTERNAL OUTSIDE EXTERIOR INSTALLS (SURECALL SC-230-800 MHZ)**. 2020. Disponível em: <https://www.signalbooster.com/pages/building-yagi-antenna-for-outdoor-external-outside-exterior-installs-surecall-sc-230-800-mhz>. Acesso em: 27 abr. 2020.

SILVA, C. **O Que é Balun? Para Que Serve, Quais Seus Tipos?** 2018. Disponível em: <https://www.servti.com/blog/2018/04/28/o-que-e-balun-para-que-serve-e-como-usar/>. Acesso em: 08 maio 2020.

SILVA, G.; BARRADAS, O. **Sistemas Radiovisibilidade**. Rio de Janeiro: Embratel, 1977.

SILVA, I. B. T. da et al. Quasi-Yagi microstrip antenna device design for directive wideband ISM application. **Microwave and Optical Technology Letters**, [s.l.], v. 59, n. 12, p.3042-3046, 22 set. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/mop.30871>

SILVA, R. de A. **Validação da Viabilidade de Rádio Enlace Utilizando o Software Pathloss 5.0**. 2016. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

- SILVA NETO, A. S. e. **Antenas de Microfita para 4g, 5g e Arranjo de Antenas Cilíndricas**. 2016. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- SOEIRO, G. C. **Projeto de uma Antena para Controle Wireless de um Robô**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa, 2012.
- SOUZA, F. **Arduino MEGA 2560**. 2018. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>. Acesso em: 09 jun. 2020.
- STAVARENGO, A. A. **Telemetria de dados e imagens para plataforma autônoma para coleta de dados hidrológicos**. 2006. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- TOLEDO, S. S. de. **Construção de uma unidade de ensino potencialmente significativa para o experimento de Hertz**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.
- UFERSA. Usina Solar da UFERSA. 2019. Disponível em: <<https://usinasolar.ufersa.edu.br/>>. Acesso em: 07 jun. 2019.
- UK.RS-ONLINE. **Vishay BPW34 IR**. Disponível em: <<https://uk.rs-online.com/web/p/photodiodes/6997616/>>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- USSOLAR INSTITUTE. **Pyranometer**. Disponível em: <https://www.myussi.com/glossary/pyranometer/>. Acesso em: 25 maio 2020.
- VAVER, R. T. **Redes WLAN de Alta Densidade utilizando o protocolo IEEE 802.11ac: estudo de caso de um estádio**. 2017. 109 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia de Computação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2017.
- WEBSTER, J. G. **The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**. New York: Crc Press Llc, 1999.
- WENTWORTH, S. M., **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia**, LTC, 2006.
- WRIGHT, Michael. **Using the Nrf24l01: 2.4ghz RF Control Module with the Arduino**. Createspace Independent Publishing Platform, 2017.
- Yagi, H. (1928). **Beam transmission of the ultra-short waves**, Proceedings of IRE 16: 715–741.
- ZAMPIER, Leonardo R. **ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ANTENAS FRACTAIS EM UHF**. 2018. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do

Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/472.pdf>.
Acesso em: 08 maio 2020.

APENDICE A: DADOS DA AFERIÇÃO DO DIA 02/07/2020

Hora	Protótipo MES-100		Hora	Protótipo MES-100		Hora	Protótipo MES-100	
05:40	10,11	5,89	09:00	1068,09	1060	12:20	1179,47	1171
05:45	20,5	15,8	09:05	1078,4	1075	12:25	1175,34	1169
05:50	25,03	18,03	09:10	1088,72	1089	12:30	1171,22	1177
05:55	43,03	42,2	09:15	1101,09	1099	12:35	1167,09	1166
06:00	45,3	44	09:20	1113,47	1111	12:40	1160,9	1155
06:05	55,4	46,6	09:25	1119,65	1120	12:45	1154,72	1150
06:10	92,53	83,9	09:30	1134,09	1134	12:50	1146,47	1146
06:15	194,65	183,1	09:35	1136,15	1139	12:55	1140,28	1135
06:20	235,9	227,8	09:40	1142,34	1152	13:00	1127,9	1124
06:25	275	273,2	09:45	1152,65	1153	13:05	1132,03	1126
06:30	297,8	285,7	09:50	1154,72	1165	13:10	1121,72	1117
06:35	340	337,6	09:55	1165,03	1168	13:15	1102,22	1096
06:40	377,15	372,6	10:00	1179,9	1173	13:20	1099,03	1089
06:45	414,28	416,3	10:05	1222,78	1216	13:25	1080,47	1071
06:50	447,3	443,1	10:10	1204,22	1208	13:30	1074,28	1058
06:55	482,34	478,6	10:15	1179,47	1194	13:35	1078,4	1066
07:00	515,34	514,3	10:20	1183,28	1199	13:40	1068,09	1054
07:05	548,34	543	10:25	1198,4	1214	13:45	261,65	256,4
07:10	583,4	583,3	10:30	1181,53	1179	13:50	127,59	121,1
07:15	610,22	607,2	10:35	1183,59	1180	13:55	1002,09	991,9
07:20	639,09	636,3	10:40	1198,03	1196	14:00	989,72	988
07:25	667,97	669,5	10:45	1198,03	1196	14:05	680,34	675,2
07:30	705,09	703,4	10:50	1202,15	1202,15	14:10	958,8	948,3
07:35	756,65	752,8	10:55	1225	1222	14:15	954,65	933,5
07:40	783,47	782,8	11:00	1228	1231	14:20	936,09	921,1
07:45	808,22	811,7	11:05	1233,5	1220	14:25	903,09	903,3
07:50	828,84	830,5	11:10	1183,59	1197	14:30	878,34	870,8
07:55	853,59	852,5	11:15	1195,97	1194	14:35	828,84	809,7
08:00	876,28	871,2	11:20	1223,9	1210	14:40	810,28	800,2
08:05	896,9	896,1	11:25	1193,9	1200	14:45	775,22	768,2
08:10	915,47	917,3	11:30	1187,72	1181	14:50	748,4	746,5
08:15	931,97	929	11:35	1191,84	1189	14:55	721,59	716,3
08:20	950,53	945,3	11:40	1189,78	1180	15:00	686,53	675,6
08:25	967,03	954,5	11:45	1200,09	1195	15:05	651,47	648
08:30	983,53	977,1	11:50	1195,97	1190	15:10	624,65	614,8
08:35	1002,09	991	11:55	733,97	722,5	15:15	589,59	575,1
08:40	1012,4	1019	12:00	1235,15	1223	15:20	556,59	549,8
08:45	1024,78	1022	12:05	1206,28	1205	15:25	527,72	523
08:50	1045,4	1044	12:10	1193,9	1185	15:30	490,59	490
08:55	1053,65	1051	12:15	1187,72	1185	15:35	459,65	442

Hora	Protótipo MES-100	
15:40	426,65	425,2
15:45	395,72	392,8
15:50	364,78	362,8
15:55	335,9	340,3
16:00	309,09	306,4
16:05	282,28	279,5
16:10	249,28	254,1
16:15	220,4	219,6
16:20	189,47	184,7
16:25	175,03	175,2
16:30	152,34	152
16:35	139,97	138,2
16:40	127,6	119,6
16:45	113,15	111,5
16:50	102,84	101,5
16:55	80,15	80,1
17:00	45,09	50,8
17:05	40,97	45
17:10	36,84	40,1
17:15	30,65	28,65
17:20	26,53	22,4
17:25	12,4	8,8
17:30	7,1	5,2

[illegible]

**Silicon PIN Photodiode**

94 8583

FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: top view
- Dimensions (L x W x H in mm): 5.4 x 4.3 x 3.2
- Radiant sensitive area (in mm²): 7.5
- High photo sensitivity
- High radiant sensitivity
- Suitable for visible and near infrared radiation
- Fast response times
- Angle of half sensitivity: $\varphi = \pm 65^\circ$
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC

**Note**

** Please see document "Vishay Material Category Policy":
www.vishay.com/doc?99902

APPLICATIONS

- High speed photo detector

DESCRIPTION

BPW34 is a PIN photodiode with high speed and high radiant sensitivity in miniature, flat, top view, clear plastic package. It is sensitive to visible and near infrared radiation. BPW34S is packed in tubes, specifications like BPW34.

PRODUCT SUMMARY

COMPONENT	I_{ra} (μA)	φ (deg)	$\lambda_{0.1}$ (nm)
BPW34	50	± 65	430 to 1100
BPW34S	50	± 65	430 to 1100

Note

- Test condition see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION

ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
BPW34	Bulk	MOQ: 3000 pcs, 3000 pcs/bulk	Top view
BPW34S	Tube	MOQ: 1800 pcs, 45 pcs/tube	Top view

Note

- MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		V_R	60	V
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	P_V	215	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ\text{C}$
Operating temperature range		T_{amb}	- 40 to + 100	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	- 40 to + 100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	$t \leq 3\text{ s}$	T_{sd}	260	$^\circ\text{C}$
Thermal resistance junction/ambient	Connected with Cu wire, 0.14 mm ²	R_{thJA}	350	K/W

BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Breakdown voltage	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $E = 0$	$V_{(BR)}$	60			V
Reverse dark current	$V_R = 10\text{ V}$, $E = 0$	I_{ro}		2	30	nA
Diode capacitance	$V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$	C_D		70		pF
	$V_R = 3\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$	C_D		25	40	pF
Open circuit voltage	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	V_o		350		mV
Temperature coefficient of V_o	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	TK_{V_o}		- 2.6		mV/K
Short circuit current	$E_A = 1\text{ klx}$	I_k		70		μA
	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	I_k		47		μA
Temperature coefficient of I_k	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$	TK_{I_k}		0.1		%/K
Reverse light current	$E_A = 1\text{ klx}$, $V_R = 5\text{ V}$	I_{ra}		75		μA
	$E_e = 1\text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950\text{ nm}$, $V_R = 5\text{ V}$	I_{ra}	40	50		μA
Angle of half sensitivity		ϕ		± 65		deg
Wavelength of peak sensitivity		λ_p		900		nm
Range of spectral bandwidth		$\lambda_{0.1}$		430 to 1100		nm
Noise equivalent power	$V_R = 10\text{ V}$, $\lambda = 950\text{ nm}$	NEP		4×10^{-14}		$\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$
Rise time	$V_R = 10\text{ V}$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$, $\lambda = 820\text{ nm}$	t_r		100		ns
Fall time	$V_R = 10\text{ V}$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$, $\lambda = 820\text{ nm}$	t_f		100		ns

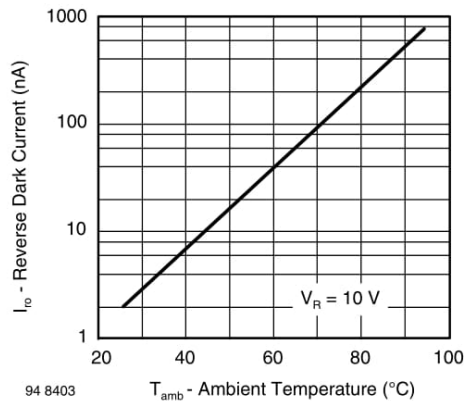
BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)


Fig. 1 - Reverse Dark Current vs. Ambient Temperature

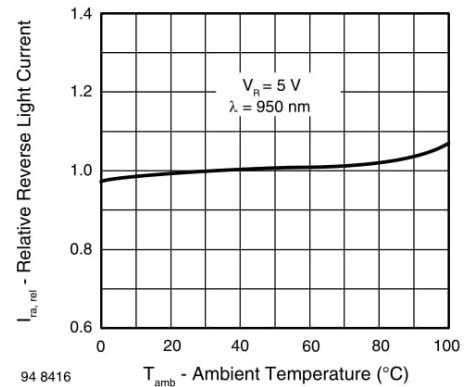
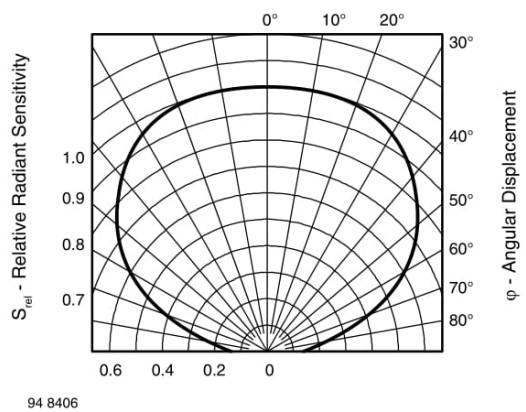
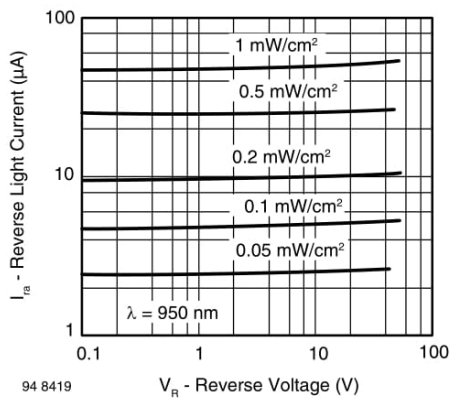
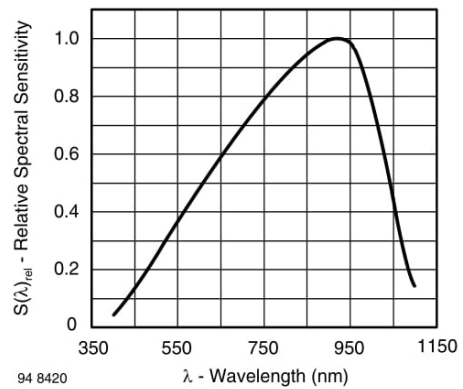
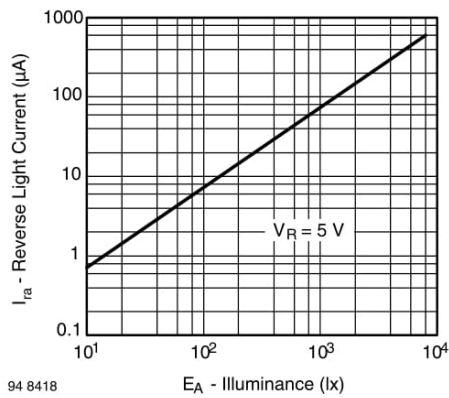
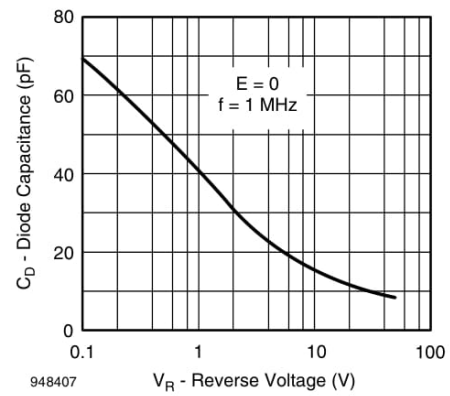
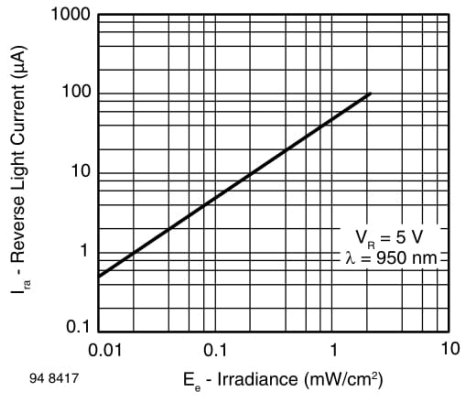


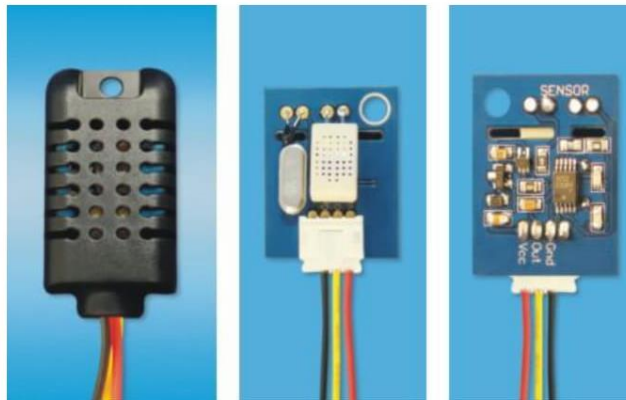
Fig. 2 - Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature



AOSONG

Temperature and humidity module

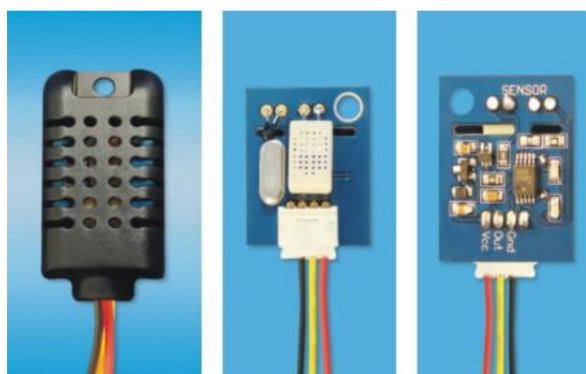
AM2301 Product Manual



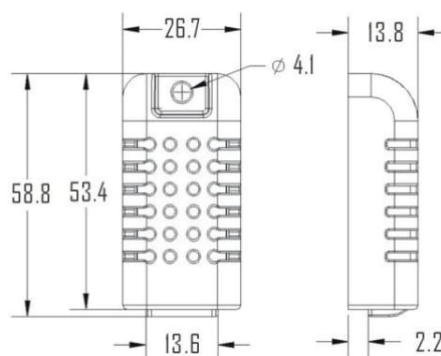
www.aosong.com

1、Product Overview

AM2301 capacitive humidity sensing digital temperature and humidity module is the one that contains the compound has been calibrated digital signal output of the temperature and humidity sensor. Application of a dedicated digital modules collection technology and the temperature and humidity sensing technology, to ensure that the product has high reliability and excellent long-term stability. The sensor includes a capacitive sensor wet components and a high-precision temperature measurement devices, and connected with a high-performance 8-bit microcontroller. The product has excellent quality, fast response, strong anti-jamming capability, and high cost. Each sensor is extremely accurate humidity calibration chamber calibration. The form of procedures, the calibration coefficients stored in the microcontroller, the sensor within the processing of the heartbeat to call these calibration coefficients. Standard single-bus interface, system integration quick and easy. Small size, low power consumption, signal transmission distance up to 20 meters, making it the best choice of all kinds of applications and even the most demanding applications. Products for the 3-lead (single-bus interface) connection convenience. Special packages according to user needs.



Physical map



Dimensions (unit: mm)

2、Applications

HVAC, dehumidifier, testing and inspection equipment, consumer goods, automotive, automatic control, data loggers, home appliances, humidity regulator, medical, weather stations, and other humidity measurement and control and so on.

3、Features

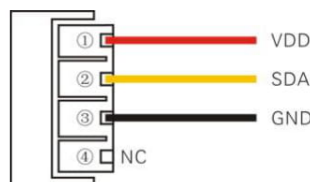
Ultra-low power, the transmission distance, fully automated calibration, the use of capacitive humidity sensor, completely interchangeable, standard digital single-bus output, excellent long-term stability, high accuracy temperature measurement devices.

4、The definition of single-bus interface

4.1 AM2301 Pin assignments

Table 1: AM2301 Pin assignments

Pin	Color	Name	Description
1	Red	VDD	Power (3.3V-5.2V)
2	Yellow	SDA	Serial data, Dual-port
3	Black	GND	Ground
4		NC	Empty



PIC1: AM2301 Pin Assignment

4.2 Power supply pins (VDD GND)

AM2301 supply voltage range 3.3V – 5.2V, recommended supply voltage is 5V.

4.3 Serial data (SDA)

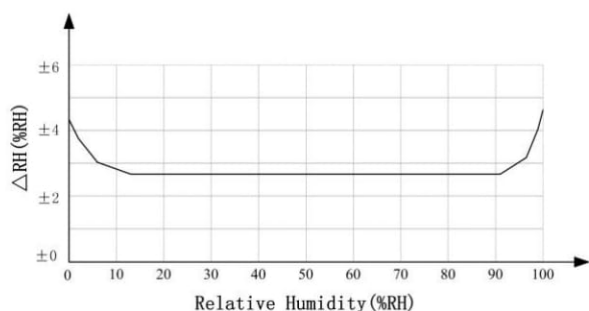
SDA pin is tri structure for reading, writing sensor data. Specific communication timing, see the detailed description of the communication protocol.

5、Sensor performance

5.1 Relative humidity

Table 2: AM2301 Relative humidity performance table

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy ^[1]	25℃		± 3		%RH
Repeatability			± 1		%RH
Exchange	Completely interchangeable				
Response ^[2]	1/e(63%)		<6		S
Sluggish			± 0.3		%RH
Drift ^[3]	Typical		<0.5		%RH/yr

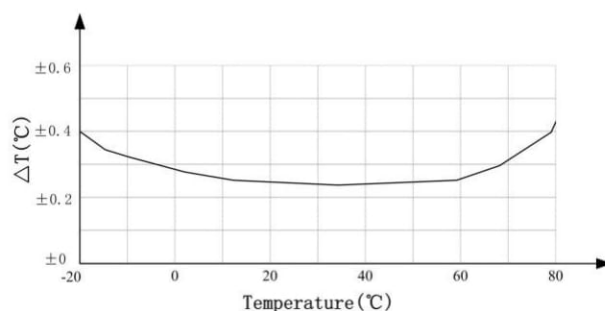


Pic2: At25℃ The error of relative humidity

5.2 Temperature

Table 3: AM2301 Relative temperature performance

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		℃
n			16		bit
Accuracy			± 0.3	± 1	℃
Range		-40		80	℃
Repeat			± 0.2		℃
Exchange	Completely interchangeable				
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		℃/yr



Pic3: The maximum temperature error

6、Electrical Characteristics

Electrical characteristics, such as energy consumption, high, low, input, output voltage, depending on the power supply. Table 4 details the electrical characteristics of the AM2301, if not identified, said supply voltage of 5V. To get the best results with the sensor, please design strictly in accordance with the conditions of design in Table 4.

Table 4: AM2301 DC Characteristics

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Voltage		3.3	5	5.2	V
Power consumption ^[4]	Dormancy	10	15		μA
	Measuring		500		μA
	Average		300		μA
Low level output voltage	I _{OL} ^[5]	0		300	mV
High output voltage	R _p <25 kΩ	90%		100%	VDD
Low input voltage	Decline	0		30%	VDD
Input High Voltage	Rise	70%		100%	VDD
R _{pu} ^[6]	VDD = 5V VIN = VSS	30	45	60	kΩ
Output current	turn on		8		mA
	turn off	10	20		μA
Sampling period		2			S

[1] the accuracy of the factory inspection, the sensor 25 ° C and 5V, the accuracy specification of test conditions, it does not include hysteresis and nonlinearity, and is only suitable for non-condensing environment.

[2] to achieve an order of 63% of the time required under the conditions of 25 ° C and 1m / s airflow.

[3] in the volatile organic compounds, the values may be higher. See the manual application to store information.

[4] this value at VDD = 5.0V when the temperature is 25 ° C, 2S / time, under the conditions of the average.

[5] low output current.

[6] that the pull-up resistor.

7、Single-bus communication (ONE-WIRE)

7.1 Typical circuits for single bus

Microprocessor and AM2301 connection typical application circuit is shown in Figure 4. Single bus communication mode, pull the SDA microprocessor I / O port is connected.

Special instructions of the single-bus communication:

1. Typical application circuit recommended in the short cable length of 30 meters on the 5.1K pull-up resistor pullup resistor according to the actual situation of lower than 30 m.
2. With 3.3V supply voltage, cable length shall not be greater than 100cm. Otherwise, the line voltage drop will lead to the sensor power supply, resulting in measurement error.
3. Read the sensor minimum time interval for the 2S; read interval is less than 2S, may cause the temperature and humidity are not allowed or communication is unsuccessful, etc..
4. Temperature and humidity values are each read out the results of the last measurement For real-time data that need continuous read twice, we recommend repeatedly to read sensors, and each read sensor interval is greater than 2 seconds to obtain accuratethe data.

ANEXO D: DATASHEET DS18B01

Click [here](#) for production status of specific part numbers.

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

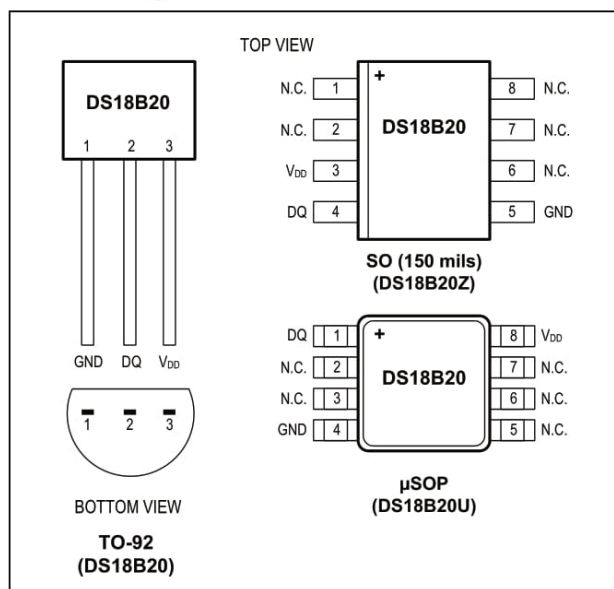
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
 - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground -0.5V to +6.0V
 Operating Temperature Range..... -55°C to +125°C

Storage Temperature Range -55°C to +125°C
 Solder Temperature Refer to the IPC/JEDEC
 J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		V_{DD}	
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-30°C to +100°C			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	V_{IL}	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V_{IH}	Local power	+2.2	The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$		V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	I_L	$V_{I/O} = 0.4V$	4.0			mA
Standby Current	I_{DDS}	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	I_{DQ}	(Note 10)		5		μA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

Note 1: All voltages are referenced to ground.

Note 2: The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU} . In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: $V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$.

Note 3: See typical performance curve in [Figure 1](#). Thermometer Error limits are 3-sigma values.

Note 4: Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

Note 5: To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.

Note 6: Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

Note 7: Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.

Note 8: To minimize I_{DDs} , DQ should be within the following ranges: $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$ or $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$.

Note 9: Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

Note 10: DQ line is high ("high-Z" state).

Note 11: Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with $V_{DD} = 5.5V$.

AC Electrical Characteristics—NV Memory(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	t_{WR}			2	10	ms
EEPROM Writes	N_{EEWR}	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	t_{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years

AC Electrical Characteristics(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Conversion Time	t_{CONV}	9-bit resolution	(Note 12)		93.75	ms
		10-bit resolution			187.5	
		11-bit resolution			375	
		12-bit resolution			750	
Time to Strong Pullup On	t_{SPON}	Start convert T command issued			10	μ s
Time Slot	t_{SLOT}	(Note 12)	60		120	μ s
Recovery Time	t_{REC}	(Note 12)	1			μ s
Write 0 Low Time	t_{LOW0}	(Note 12)	60		120	μ s
Write 1 Low Time	t_{LOW1}	(Note 12)	1		15	μ s
Read Data Valid	t_{RDV}	(Note 12)			15	μ s
Reset Time High	t_{RSTH}	(Note 12)	480			μ s
Reset Time Low	t_{RSTL}	(Notes 12, 13)	480			μ s
Presence-Detect High	t_{PDHIGH}	(Note 12)	15		60	μ s
Presence-Detect Low	t_{PDLOW}	(Note 12)	60		240	μ s
Capacitance	$C_{IN/OUT}$				25	pF

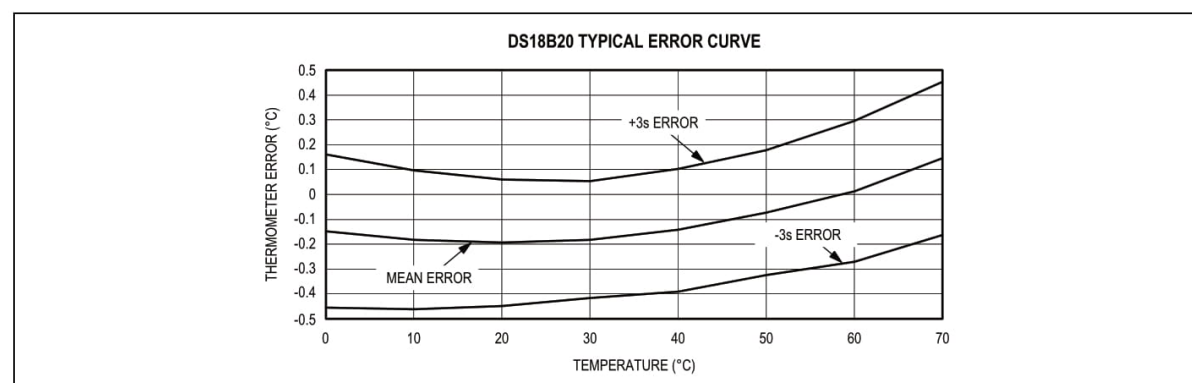
Note 12: See the timing diagrams in [Figure 2](#).**Note 13:** Under parasite power, if $t_{RSTL} > 960\mu$ s, a power-on reset can occur.

Figure 1. Typical Performance Curve



nRF24L01+

Single Chip 2.4GHz Transceiver

Product Specification v1.0

Key Features

- Worldwide 2.4GHz ISM band operation
- 250kbps, 1Mbps and 2Mbps on air data rates
- Ultra low power operation
- 11.3mA TX at 0dBm output power
- 13.5mA RX at 2Mbps air data rate
- 900nA in power down
- 26µA in standby-I
- On chip voltage regulator
- 1.9 to 3.6V supply range
- Enhanced ShockBurst™
- Automatic packet handling
- Auto packet transaction handling
- 6 data pipe MultiCeiver™
- Drop-in compatibility with nRF24L01
- On-air compatible in 250kbps and 1Mbps with nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 and nRF24E2
- Low cost BOM
- ±60ppm 16MHz crystal
- 5V tolerant inputs
- Compact 20-pin 4x4mm QFN package

Applications

- Wireless PC Peripherals
- Mouse, keyboards and remotes
- 3-in-1 desktop bundles
- Advanced Media center remote controls
- VoIP headsets
- Game controllers
- Sports watches and sensors
- RF remote controls for consumer electronics
- Home and commercial automation
- Ultra low power sensor networks
- Active RFID
- Asset tracking systems
- Toys

2.2 Pin functions

Pin	Name	Pin function	Description
1	CE	Digital Input	Chip Enable Activates RX or TX mode
2	CSN	Digital Input	SPI Chip Select
3	SCK	Digital Input	SPI Clock
4	MOSI	Digital Input	SPI Slave Data Input
5	MISO	Digital Output	SPI Slave Data Output, with tri-state option
6	IRQ	Digital Output	Maskable interrupt pin. Active low
7	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
8	VSS	Power	Ground (0V)
9	XC2	Analog Output	Crystal Pin 2
10	XC1	Analog Input	Crystal Pin 1
11	VDD_PA	Power Output	Power Supply Output (+1.8V) for the internal nRF24L01+ Power Amplifier. Must be connected to ANT1 and ANT2 as shown in Figure 32 .
12	ANT1	RF	Antenna interface 1
13	ANT2	RF	Antenna interface 2
14	VSS	Power	Ground (0V)
15	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
16	IREF	Analog Input	Reference current. Connect a 22kΩ resistor to ground. See Figure 32 .
17	VSS	Power	Ground (0V)
18	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
19	DVDD	Power Output	Internal digital supply output for de-coupling purposes. See Figure 32 .
20	VSS	Power	Ground (0V)

Table 1. nRF24L01+ pin function

5 Electrical specifications

Conditions: $V_{DD} = +3V$, $V_{SS} = 0V$, $T_A = -40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$

5.1 Power consumption

Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
Idle modes						
I_{VDD_PD}	Supply current in power down			900		nA
I_{VDD_ST1}	Supply current in standby-I mode	a		26		μA
I_{VDD_ST2}	Supply current in standby-II mode			320		μA
I_{VDD_SU}	Average current during 1.5ms crystal oscillator startup			400		μA
Transmit						
I_{VDD_TX0}	Supply current @ 0dBm output power	b		11.3		mA
I_{VDD_TX6}	Supply current @ -6dBm output power	b		9.0		mA
I_{VDD_TX12}	Supply current @ -12dBm output power	b		7.5		mA
I_{VDD_TX18}	Supply current @ -18dBm output power	b		7.0		mA
I_{VDD_AVG}	Average Supply current @ -6dBm output power, ShockBurst™	c		0.12		mA
I_{VDD_TXS}	Average current during TX settling	d		8.0		mA
Receive						
I_{VDD_2M}	Supply current 2Mbps			13.5		mA
I_{VDD_1M}	Supply current 1Mbps			13.1		mA
I_{VDD_250}	Supply current 250kbps			12.6		mA
I_{VDD_RXS}	Average current during RX settling	e		8.9		mA

- This current is for a 12pF crystal. Current when using external clock is dependent on signal swing.
- Antenna load impedance = $15\Omega + j88\Omega$.
- Antenna load impedance = $15\Omega + j88\Omega$. Average data rate 10kbps and max. payload length packets.
- Average current consumption during TX startup (130 μs) and when changing mode from RX to TX (130 μs).
- Average current consumption during RX startup (130 μs) and when changing mode from TX to RX (130 μs).

Table 4. Power consumption

5.2 General RF conditions

Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
f_{OP}	Operating frequency	a	2400		2525	MHz
PLL_{res}	PLL Programming resolution			1		MHz
f_{XTAL}	Crystal frequency			16		MHz
Δf_{250}	Frequency deviation @ 250kbps			± 160		kHz
Δf_{1M}	Frequency deviation @ 1Mbps			± 160		kHz
Δf_{2M}	Frequency deviation @ 2Mbps			± 320		kHz
R_{GFSK}	Air Data rate	b	250		2000	kbps
$F_{CHANNEL\ 1M}$	Non-overlapping channel spacing @ 250kbps/1Mbps	c		1		MHz
$F_{CHANNEL\ 2M}$	Non-overlapping channel spacing @ 2Mbps	c		2		MHz

a. Regulatory standards determine the band range you can use.

b. Data rate in each burst on-air

c. The minimum channel spacing is 1MHz

Table 5. General RF conditions

5.3 Transmitter operation

Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
P_{RF}	Maximum Output Power	a		0	+4	dBm
P_{RFC}	RF Power Control Range		16	18	20	dB
P_{RFCR}	RF Power Accuracy				± 4	dB
P_{BW2}	20dB Bandwidth for Modulated Carrier (2Mbps)			1800	2000	kHz
P_{BW1}	20dB Bandwidth for Modulated Carrier (1Mbps)			900	1000	kHz
P_{BW250}	20dB Bandwidth for Modulated Carrier (250kbps)			700	800	kHz
$P_{RF1.2}$	1 st Adjacent Channel Transmit Power 2MHz (2Mbps)				-20	dBc
$P_{RF2.2}$	2 nd Adjacent Channel Transmit Power 4MHz (2Mbps)				-50	dBc
$P_{RF1.1}$	1 st Adjacent Channel Transmit Power 1MHz (1Mbps)				-20	dBc
$P_{RF2.1}$	2 nd Adjacent Channel Transmit Power 2MHz (1Mbps)				-45	dBc
$P_{RF1.250}$	1 st Adjacent Channel Transmit Power 1MHz (250kbps)				-30	dBc
$P_{RF2.250}$	2 nd Adjacent Channel Transmit Power 2MHz (250kbps)				-45	dBc

a. Antenna load impedance = $15\Omega + j88\Omega$

Table 6. Transmitter operation

5.4 Receiver operation

Datarate	Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
	RX _{max}	Maximum received signal at <0.1% BER			0		dBm
2Mbps	RX _{SENS}	Sensitivity (0.1%BER) @2Mbps			-82		dBm
1Mbps	RX _{SENS}	Sensitivity (0.1%BER) @1Mbps			-85		dBm
250kbps	RX _{SENS}	Sensitivity (0.1%BER) @250kbps			-94		dBm

Table 7. RX Sensitivity

Datarate	Symbol	Parameter (condition)	Notes	Min.	Typ.	Max.	Units
2Mbps	C/I _{CO}	C/I Co-channel			7		dBc
	C/I _{1ST}	1 st ACS (Adjacent Channel Selectivity) C/I 2MHz			3		dBc
	C/I _{2ND}	2 nd ACS C/I 4MHz			-17		dBc
	C/I _{3RD}	3 rd ACS C/I 6MHz			-21		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 12\text{MHz}$			-40		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 36\text{MHz}$	a		-48		dBc
1Mbps	C/I _{CO}	C/I Co-channel			9		dBc
	C/I _{1ST}	1 st ACS C/I 1MHz			8		dBc
	C/I _{2ND}	2 nd ACS C/I 2MHz			-20		dBc
	C/I _{3RD}	3 rd ACS C/I 3MHz			-30		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 6\text{MHz}$			-40		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 25\text{MHz}$	a		-47		dBc
250kbps	C/I _{CO}	C/I Co-channel			12		dBc
	C/I _{1ST}	1 st ACS C/I 1MHz			-12		dBc
	C/I _{2ND}	2 nd ACS C/I 2MHz			-33		dBc
	C/I _{3RD}	3 rd ACS C/I 3MHz			-38		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 6\text{MHz}$			-50		dBc
	C/I _{Nth}	N th ACS C/I, $f_i > 25\text{MHz}$	a		-60		dBc

a. **Narrow Band (In Band) Blocking measurements:**

0 to $\pm 40\text{MHz}$; 1MHz step size

For Interferer frequency offsets $n \cdot 2 \cdot f_{\text{xtal}}$, blocking performance is degraded by approximately 5dB compared to adjacent figures.

Table 8. RX selectivity according to ETSI EN 300 440-1 V1.3.1 (2001-09) page 27