

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“PROTOTIPO DE ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA
AUTOMÁTICA BASADA EN SENSORES Y
MICROCONTROLADORES”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

EDWAR RIVEROS CHAHUAYO

LIMA – PERÚ

2022

Document Information

Analyzed document	Tesis_Edwar Riveros Chahuayo.pdf (D157769609)
Submitted	2/3/2023 5:34:00 PM
Submitted by	David Ricardo Ascencios Templo
Submitter email	dascencios@lamolina.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	dascencios.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Documento.pdf Document Documento.pdf (D54177351)	 2
SA	PROTOTIPO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN Y REGISTRO AUTOMÁTICO DE PARÁMETROS METEOROL ÓGICOS.pdf Document PROTOTIPO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN Y REGISTRO AUTOMÁTICO DE PARÁMETROS METEOROL ÓGICOS.pdf (D113129510)	 5
W	URL: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/gart/procesosregulatorios/electricidad... Fetched: 2/3/2023 5:36:00 PM	 2
W	URL: http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3610 Fetched: 2/3/2023 5:36:00 PM	 2
W	URL: https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.67 Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 1
W	URL: http://uvadoc.uva.es/handle/10324/28977 Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 1
W	URL: https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005 Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 1
W	URL: https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-l... Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 2
W	URL: https://naylampmechatronics.com/sensores/30-modulo-rtc-ds1307-eeeprom-at24c32-i2c.html Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 1
SA	Tesis-Del_Salto_Anthony .pdf Document Tesis-Del_Salto_Anthony .pdf (D126508819)	 1
W	URL: https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/363-sensor-de-temperatura-y-hum... Fetched: 2/3/2023 5:35:00 PM	 1

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“PROTOTIPO DE ESTACIÓN AGROMETEOROLÓGICA
AUTOMÁTICA BASADA EN SENSORES Y
MICROCONTROLADORES”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. EDWAR RIVEROS CHAHUAYO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Presidente

Dr. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO
Asesor

Mg. Sc. RICARDO APACLLA NALVARTE
Miembro

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO
Miembro

LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A mis padres Zoila Chahuayo Ccanasa y Zosimo Riveros Matos, por su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida para que me pueda forjar como un buen profesional y por ser los pilares sobre los cuales se formó mi personalidad para contribuir con el país y mi familia.

A mi hermano, Luis Jhonatan Riveros Chahuayo, quien es una persona a la que considero y admiro mucho y, además, quien ha inspirado reflexión y filosofía en la elaboración de esta investigación.

A mis amigos y amigas de mi entorno más cercano, cuyos nombres están por demás mencionar, ya que cada uno sabe el gran aporte incondicional brindado para la finalización del presente proyecto.

A mis futuros colegas de la universidad, a los docentes de la facultad y a mis asesores; quienes también contribuyen en diferentes aspectos en la sociedad con la carrera de Ingeniería Agrícola.

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero agradecer a quienes hicieron posible el desarrollo de esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos de lucha emocional y formación personal. Estas palabras son para ustedes.

A Dios por ser el guía de mi camino espiritual y fue mi motivación.

A mi padre, madre y hermano, por haberme dado esa fuerza emocional y apoyo económico incondicionalmente para poder superarme.

A mi familia en general por haberme apoyado en momentos específicos en los cuales para mí fue complicado en la vida universitaria y también al término de ésta.

A mi patrocinador, Dr. David Ricardo Ascencios Templo, por la oportunidad brindada para poder desarrollar una investigación que fortaleció mis conocimientos técnicos y criterios, además por el tiempo brindado y sus consejos para la elaboración de la tesis.

A mi co-asesora, Mg. Sc. Karem Meza Capcha, por el apoyo brindado en los criterios y recomendaciones para la ejecución de mi proyecto de tesis.

A mis amigos y amigas de mi entorno más cercano, por el apoyo incondicional y contribución en el aspecto físico, emocional y moral para el desarrollo del presente proyecto.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo principal	3
1.2. Objetivos específicos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Observación meteorológica	6
2.2.1. Datos de observación	6
2.2.2. Estaciones meteorológicas	8
2.2.3. Agrometeorología y estaciones meteorológicas agrícolas	9
2.3. Parámetros agrometeorológicos	11
2.3.1. Temperatura del aire	11
2.3.2. Humedad relativa del aire	12
2.3.3. Presión atmosférica	13
2.3.4. Velocidad y dirección del viento	14
2.3.5. Radiación solar	16
2.3.6. Evapotranspiración	17
2.4. Ecuación FAO Penman-Monteith	19
2.5. Sistema de una estación meteorológica automática	20
2.5.1. Microcontroladores y microprocesadores	20
2.5.2. Sensores	24
2.5.3. Módulos externos	32
2.6. Sistemas fotovoltaicos	36
2.6.1. Panel solar	36
2.6.2. Regulador de carga solar	37
2.6.3. Batería solar	38
2.7. Software y programación	38
2.7.1. Estructura de programación	39
2.7.2. Arduino	39

2.8.	Internet de las cosas	40
2.8.1.	Blynk	41
III.	METODOLOGÍA.....	42
3.1.	Ubicación del proyecto	42
3.2.	Variables agrometeorológicas.....	44
3.3.	Consideraciones generales	45
3.4.	Selección de componentes electrónicos del prototipo	46
3.4.1.	Selección de sensores	46
3.4.2.	Selección de módulos y periféricos	47
3.4.3.	Selección del microcontrolador	48
3.4.4.	Selección de la fuente energética.....	48
3.5.	Diseño de la arquitectura electrónica.....	51
3.6.	Diseño definitivo para la construcción del prototipo.....	53
3.6.1.	Subsistema de medición de temperatura y humedad.....	55
3.6.2.	Subsistema de medición de viento y radiación solar.....	56
3.6.3.	Subsistema de gestión de datos	57
3.6.4.	Subsistema de medición de presión.....	59
3.6.5.	Subsistema de alimentación y regulación energética	60
3.6.6.	Estructura de soporte general	61
3.6.7.	Costo del prototipo	62
3.7.	Programación del microcontrolador	62
3.8.	Calibración de los sensores	64
3.8.1.	Sensor de temperatura y humedad relativa.....	65
3.8.2.	Sensor de presión barométrica.....	66
3.8.3.	Sensor de velocidad del viento	66
3.8.4.	Sensores de radiación solar	66
3.8.5.	Sensor de dirección del viento.....	67
3.9.	Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia.....	68
3.9.1.	Cálculo de la evapotranspiración de referencia.....	68
3.9.2.	Comparación de la variable de evapotranspiración.....	69
3.10.	Validación de datos.....	70
3.11.	Desarrollo de la base de datos.....	73
3.12.	Desarrollo de la interface de visualización	74

3.13. Manual de instalación, operación y mantenimiento	75
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	76
4.1. Ubicación del proyecto	76
4.2. Componentes electrónicos del prototipo.....	77
4.2.1. Sensores	77
4.2.2. Módulos y periféricos	79
4.2.3. Microcontrolador	80
4.2.4. Fuente energética.....	80
4.3. Arquitectura electrónica del prototipo	83
4.3.1. Esquemas de conexiones individuales.....	83
4.3.2. Esquema final de conexiones	90
4.4. Diseño definitivo del prototipo	94
4.4.1. Subsistema de medición de temperatura y humedad.....	94
4.4.2. Subsistema de medición de viento y radiación solar.....	95
4.4.3. Subsistema de gestión de datos	97
4.4.4. Subsistema de medición de presión.....	101
4.4.5. Subsistema de alimentación energética y regulación	102
4.4.6. Estructura de soporte general	103
4.4.7. Costo del prototipo	105
4.5. Programación del microcontrolador	106
4.6. Calibración de los sensores.....	111
4.6.1. Sensor de temperatura y humedad relativa.....	112
4.6.2. Sensor de presión barométrica.....	115
4.6.3. Sensor de velocidad del viento	117
4.6.4. Sensores de radiación solar	119
4.6.5. Sensor de dirección del viento.....	122
4.7. Evapotranspiración del cultivo de referencia.....	124
4.7.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia.....	124
4.7.2. Comparación de la variable de evapotranspiración.....	124
4.8. Validación de datos.....	130
4.8.1. Temperatura del aire	134
4.8.2. Humedad relativa del aire.....	137
4.8.3. Presión barométrica	139

4.8.4.	Velocidad del viento	141
4.8.5.	Radiación solar	143
4.8.6.	Evapotranspiración del cultivo de referencia	146
4.9.	Base de datos	149
4.10.	Interface de visualización	151
4.11.	Manual de instalación, operación y mantenimiento	152
V.	CONCLUSIONES	154
VI.	RECOMENDACIONES	156
VII.	BIBLIOGRAFÍA	158
VIII.	ANEXOS	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las escalas horizontales en fenómenos meteorológicos.....	7
Tabla 2: Definiciones de las magnitudes utilizadas en la medición de la humedad.....	13
Tabla 3: Diferencias entre microprocesadores y microcontroladores	21
Tabla 4: Características de los microcontroladores de las placas Arduino y ESP32	24
Tabla 5: Características técnicas de un regulador o controlador de carga solar.....	38
Tabla 6: Descripción de las variables meteorológicas a considerar	44
Tabla 7: Recurso solar promedio mensual en kWh/m ² /día - 22 años en promedio.....	49
Tabla 8: Ecuaciones de los indicadores estadísticos utilizados en la fase de validación	72
Tabla 9: Sensores seleccionados para la medición de las variables de interés.....	78
Tabla 10: Módulos y periférico seleccionados para control de funciones del prototipo.....	79
Tabla 11: Resultados del cálculo para la selección del panel solar	81
Tabla 12: Resultados del cálculo para la selección de la batería solar	81
Tabla 13: Disposición de los módulos y sensores de acuerdo a la carga que demandan	83
Tabla 14: Resultados de los modelos de regresión lineal simple para las variables que determinarán la radiación solar.....	120
Tabla 15: Resultados de los modelos de regresión múltiple para las variables que determinarán la radiación solar.....	121
Tabla 16: Datos estadísticos para la calibración de la variable de dirección del viento....	123
Tabla 17: Resumen descriptivo de los datos registrados por el prototipo para la fase de validación	130
Tabla 18: Resumen descriptivo de los datos resumidos a partir de los registrados por el prototipo para la fase de validación.....	131
Tabla 19: Índices estadísticos	134
Tabla 20: Determinación el error porcentual para totales diarios de radiación solar	144
Tabla 21: Determinación el error porcentual para totales diarios de evapotranspiración del cultivo de referencia	149
Tabla 22: Ecuación de todos los parámetros que intervienen en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia	167
Tabla 23: Costo del prototipo desagregado en sus cuatro componentes principales.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre la escala horizontal en metros y temporal en segundos de los fenómenos meteorológicos.	7
Figura 2: Observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt.	9
Figura 3: Estación meteorológica automática Vantage Pro2 Plus.	9
Figura 4: Variación de la presión atmosférica con la altitud.	14
Figura 5: Barómetro de mercurio, aneroides y electrónico.	14
Figura 6: Rosa de los vientos con puntos cardinales.	15
Figura 7: Factor de conversión ante la variación del viento según la altura.	16
Figura 8: Espectro electromagnético de la radiación extraterrestre.	17
Figura 9: Tanque evaporímetro para la estimación de la evapotranspiración.	18
Figura 10: Placa programable Arduino modelo Mega R3.	22
Figura 11: Placa programable Arduino MKR WiFi 1010.	23
Figura 12: Placa programable ESP32-DevKitC.	23
Figura 13: Sensor de temperatura y humedad SHT31.	26
Figura 14: Circuito impreso BME280 para presión barométrica, humedad y temperatura.	28
Figura 15: Weather Meters, módulo de sensores de velocidad y dirección de viento, y precipitación.	29
Figura 16: Sensor de luz solar Grove-SII145.	31
Figura 17: Sensor de radiación UV ML8511.	31
Figura 18: Módulos de reloj de tiempo real RTC, DS1307 y DS3231 respectivamente. ...	33
Figura 19: Módulos adaptadores de memoria externa SD y microSD respectivamente.	34
Figura 20: Display alfanumérico LCD 1602 y 2004, respectivamente.	35
Figura 21: Módulo conversor de voltaje DC-DC Step-Down LM2596.	36
Figura 22: IDE o entorno de programación de Arduino.	40
Figura 23: Componentes de la plataforma Blynk.	41
Figura 24: Ubicación de la zona de instalación del prototipo.	43
Figura 25: Detalle de protoboard o placa de pruebas o ensayos.	52
Figura 26: Esquema de componentes del prototipo.	54
Figura 27: Esquema gráfico de un abrigo meteorológico usado en estaciones meteorológicas convencionales.	55
Figura 28: Diseño digital de estructura del sensor de radiación solar.	57

Figura 29: Placa de circuito del tipo matriz de puntos de baquelita y cobre.....	58
Figura 30: Conectores adaptadores para protoboard: roseta RJ11, header hembra y bornera de dos hilos.....	58
Figura 31: Caja de pase eléctrica de PVC con tapa de 200x200x80 mm.....	59
Figura 32: Esquema del sistema fotovoltaico.....	60
Figura 33: Trípode de montaje de estación meteorológica de la marca Davis Instruments.....	61
Figura 34: Ubicación del del prototipo y de las estaciones automáticas de referencia	76
Figura 35: Esquemático en protoboard del módulo SHT31	84
Figura 36: Esquemático en protoboard del sensor BMP280	84
Figura 37: Esquemático en protoboard del módulo de velocidad y dirección de viento.....	85
Figura 38: Esquemático en protoboard del sensor ML8511 del módulo piranómetro.....	86
Figura 39: Esquemático en protoboard del sensor SI1145 del módulo piranómetro.	87
Figura 40: Esquemático en protoboard del módulo Real Time Clock DS3231.....	88
Figura 41: Esquemático en protoboard del módulo de memoria externa microSD.	89
Figura 42: Módulo de visualización, display LCD 16x02	89
Figura 43: Esquemático en protoboard de los convertidores de voltaje LM2596.....	90
Figura 44: Esquema general de conexiones elaborado en el software Fritzing.....	92
Figura 45: Plano de conexiones eléctricas del prototipo, elaborado en el software Eagle..	93
Figura 46: Al lado izquierdo, el sensor SHT31 dentro de su cobertura y al derecho, el sensor ubicado en el plato base.	94
Figura 47: Abrigo meteorológico contenedor del sensor de temperatura y humedad.....	95
Figura 48: Anemómetro y veleta del módulo Weather Meter.....	96
Figura 49: Sensores de radiación ML8511 y SI1145 en sus respectivos contenedores.	96
Figura 50: Estructuras de soporte de los sensores de velocidad y dirección del viento, y de radiación ML8511 y SI1145.....	97
Figura 51: Plano de circuito electrónico de la unidad central de procesamiento.	99
Figura 52: Placa de circuito electrónico de la unidad central de procesamiento, al lado izquierdo está la vista superior y al lado derecho, la vista posterior.	100
Figura 53: En el lado izquierdo está la tapa de la caja de pase de PVC y la placa en funcionamiento y en el derecho, la placa dentro de la caja de pase.	101
Figura 54: Sensor de presión barométrica montado sobre la placa de circuito principal..	101
Figura 55: A la izquierda está el panel solar con su estructura de sujeción y soporte, y a la derecha, la batería solar y el controlador de carga conectados entre sí.	102

Figura 56: Vista posterior del panel solar y frontal de la caja de protección de la batería y el regulador de carga.	103
Figura 57: Vistas del prototipo: a la derecha ensamblaje en laboratorio y a la izquierda, instalación en campo.	105
Figura 58: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la inclusión de librerías, definición de constantes y declaración de objetos.	107
Figura 59: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la definición de variables, constantes y estructuras de variables.....	108
Figura 60: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la función por defecto “void setup”.....	109
Figura 61: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la función por defecto “void loop”.....	110
Figura 62: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de temperatura del aire del sensor SHT31.	113
Figura 63: Gráfico de series temporales para la variable de temperatura del aire.....	114
Figura 64: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de humedad relativa del aire del sensor SHT31.....	114
Figura 65: Gráfico de series temporales para la variable de humedad relativa del aire. ...	115
Figura 66: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de presión barométrica del sensor BME280.	116
Figura 67: Gráfico de series temporales para la variable de presión barométrica.....	116
Figura 68: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de velocidad del viento del anemómetro del módulo Weather Meters.....	118
Figura 69: Gráfico de series temporales para la variable de velocidad del viento.	118
Figura 70: Gráficos de dispersión y curvas de calibración para las variables de radiación de los sensores ML8511 y SI1145.	119
Figura 71: Gráfico de cajas para cada punto cardinal del sensor de dirección del viento.	122
Figura 72: Comparación de la ET_o calculada y observada de la estación de referencia ...	126
Figura 73: Gráficos de dispersión para la variable de evapotranspiración calculados en periodos horarios, para el prototipo y la estación de referencia: a la izquierda considerando valores negativos y a la derecha sin considerarlos.	128
Figura 74: Gráfico de dispersión entre los valores de evapotranspiración a escala diaria, para el prototipo y los de la estación de referencia: a la izquierda considerando valores negativos y a la derecha sin considerarlos.....	129

Figura 75: Gráficos de series de tiempo para ET_o a escalas diarias, obtenidos a partir de la suma de valores a escalas menores: arriba considerando valores negativos y abajo, sin considerarlos.....	129
Figura 76: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de temperatura del aire.	136
Figura 77: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de temperatura del aire.	136
Figura 78: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de humedad relativa del aire.	138
Figura 79: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de humedad relativa del aire.	139
Figura 80: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de presión barométrica.	140
Figura 81: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de presión barométrica.	141
Figura 82: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de velocidad del viento.	142
Figura 83: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de velocidad del viento.	143
Figura 84: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de radiación solar.....	145
Figura 85: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de radiación solar.	146
Figura 86: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).	147
Figura 87: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).	148
Figura 88: Formato de base de datos del prototipo.	150
Figura 89: Visualización de un fragmento de la base de datos generada en Excel.	150
Figura 90: Paneles del aplicativo Blynk, visto desde dispositivo móvil, para las variables agrometeorológicas de interés.	151
Figura 91: Diagrama de flujo de la metodología.	172
Figura 92: Diagrama de flujo de la sección de establecimiento de condiciones iniciales, correspondiente a la función “void setup”.....	173

Figura 93: Diagrama de flujo del algoritmo del microcontrolador para la secuencia repetitiva, correspondiente a la función “void loop”.....	174
Figura 94: Diagrama de flujo para el algoritmo de cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia.	175
Figura 95: Trípode de EMA Davis ensamblado, sin mástil superior.	215
Figura 96: Panel solar, estructura del mismo y trípode.	217
Figura 97: Instalación de caja de protección para batería y regulador de carga.....	218
Figura 98: Placa de conexiones correspondiente a la unidad central del prototipo.....	219
Figura 99: Caja de protección para la unidad central del prototipo.....	220
Figura 100: Vista interior y final del módulo del sensor de temperatura y humedad.	222
Figura 101: Módulo Weather Meters y su ensamblaje con el módulo de temperatura y humedad.	223
Figura 102: Módulo piranómetro o de radiación solar y ensamblaje con el módulo Weather Meter.....	225
Figura 103: Vista final del ensamblaje del prototipo.	225
Figura 104: Plano esquemático del diagrama de conexiones del prototipo.	227
Figura 105: Plano de conexiones de la placa central del prototipo.	228
Figura 106: Materiales de limpieza principales para el prototipo	235
Figura 107: Vista interior del encapsulado que contiene al sensor SHT31.....	237
Figura 108: Vista de las placas del sensor de velocidad del viento y dirección del viento.	238
Figura 109: Vista de los módulos ML8511 y SI1145.	239
Figura 110: Vista final de la placa central de procesamiento con los módulos BME280, RTC DS3231 y adaptador microSD conectados; y los cables del módulo LCD.	240
Figura 111: Módulos LM2596 conectados a la placa central de procesamiento.	241
Figura 112: Código de programación para la verificación digital del módulo SHT31....	243
Figura 113: Código de programación para la verificación digital del módulo BME280..	244
Figura 114: Primer fragmento del código de programación para la verificación digital del módulo Weather Meter.....	245
Figura 115: Segundo fragmento del código de programación para la verificación digital del módulo Weather Meter.....	245
Figura 116: Código de programación para la verificación digital del módulo ML8511...	246
Figura 117: Código de programación para la verificación digital del módulo SI1145.	247
Figura 118: Código de programación para la verificación digital del módulo DS3231....	248

Figura 119: Código de programación para la verificación digital del módulo adaptador de memoria extraíble microSD.	249
Figura 120: Código de programación para la verificación digital del módulo LCD.....	250
Figura 121: Código de programación para la verificación digital de la conexión a la red del microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010.....	250
Figura 122: Ensamblaje del trípode para montar la estación.....	252
Figura 123: Trípode de estación meteorológica ensamblado.	252
Figura 124: Colocación de estructura de panel con el panel solar.	252
Figura 125: Ajuste angular de la estructura de soporte del panel solar.	252
Figura 126: Unión de cables de panel solar para conexión.	253
Figura 127: Colocación de caja de protección de batería y regulador sobre mástil.	253
Figura 128: Instalación de estructura de soporte de panel sobre mástil.	253
Figura 129: Conexión de cables con batería solar.	253
Figura 130: Conexión entre controlador de carga solar y batería solar.	254
Figura 131: Conexión de controlador de carga solar con batería y panel solar.....	254
Figura 132: Implementación de reguladores LM2596 para líneas de 5V y 3.3V.	254
Figura 133: Primera habilitación de la unidad central de procesamiento con placas de pruebas.....	254
Figura 134: Segunda habilitación de la unidad central de procesamiento con placas de pruebas.....	255
Figura 135: Habilitación del sensor SHT31 con adaptador RJ11.	255
Figura 136: Verificación eléctrica de PCB del anemómetro.	255
Figura 137: Colocación del sensor SHT31 dentro de cámara de protección basada en pantalla de Stevenson.	256
Figura 138: Ensamblaje de estructura de soporte con módulo de medición de temperatura y humedad relativa.....	256
Figura 139: Ensamblaje de anemómetro y veleta del módulo Weather Meter.	256
Figura 140: Módulos de temperatura y humedad, y de velocidad, dirección del viento y precipitación ensamblados.....	256
Figura 141: Habilitación del sensor ML8511.....	257
Figura 142: Verificación eléctrica de continuidad del sensor ML8511.	257
Figura 143: Verificación de continuidad eléctrica del sensor SI1145.....	257
Figura 144: Habilitación del sensor SI1145 y estructura del módulo piranómetro.....	257
Figura 145: Módulo piranómetro habilitado.	258

Figura 146: Ensamblaje de los módulos de temperatura y humedad, velocidad y dirección del viento, y radiación solar con mástil superior del trípode.....	258
Figura 147: Vista superior de los módulos piranómetro y Weather Meter unidos.....	258
Figura 148: Placa PCB del sensor de dirección del viento.....	259
Figura 149: Calibración del sensor de velocidad del viento.....	259
Figura 150: Vista posterior de placa central de procesamiento en proceso de soldadura de conexiones.	259
Figura 151: Vista superior de placa central de procesamiento, incluye microcontrolador, módulo RTC, módulo datalogger, sensor de presión atmosférica y reguladores de voltaje.	260
Figura 152: Toma de coordenadas del lugar de instalación del prototipo.....	260
Figura 153: Vista del subsistema de gestión de datos con prototipo instalado en campo.	260
Figura 154: Datos de medición mostrados en pantalla LCD en intervalos de 10 segundos para generar promedios de 1 minuto.	261
Figura 155: Vista del prototipo puesto en funcionamiento para la fase de calibración.....	261
Figura 156: Parte inferior del prototipo luego del desensamblaje de la parte superior, para el transporte del equipo.....	261
Figura 157: Módem de internet y router repetidor para garantizar la red inalámbrica WiFi.	262
Figura 158: Habilitación de la zona de instalación para colocación de grass americano..	262
Figura 159: Colocación de mangueras para riego por goteo subterráneo para grass americano.....	262
Figura 160: Zona de instalación de estaciones meteorológicas con cobertura vegetal renovada.....	262
Figura 161: Herramientas y materiales utilizados en el desarrollo del proyecto.....	263
Figura 162: Mantenimiento y limpieza del sistema fotovoltaico.	263
Figura 163: Verificación eléctrica del prototipo.....	263
Figura 164: Lavado y limpieza de la cámara del módulo de temperatura y humedad.....	264
Figura 165: Limpieza de sulfatos con WD-40 del sensor ML8511.	264
Figura 166: Mantenimiento y limpieza de la caja de protección de la batería y regulador de carga.....	264
Figura 167: Estructuras en acero inoxidable de reemplazo para panel solar y cajas de protección.	264

Figura 168: Componentes sujetadores para estructuras metálicas utilizadas en el ensamblaje del prototipo.....	265
Figura 169: Componentes electrónicos y eléctricos utilizados para el desarrollo del proyecto.	265
Figura 170: Mantenimiento y calibración estación meteorológica de referencia Davis Vantage Pro2 de la FIA por parte del personal de la empresa Davis Instruments, en la UNALM.	265

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Ecuaciones de los parámetros utilizados para el cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia	167
ANEXO 2: Costo referencial del prototipo como presupuesto	170
ANEXO 3: Diagramas de flujo elaborados	172
ANEXO 4: Código de programación fuente para la operación del prototipo de estación agrometeorológica basada en sensores y microcontroladores	176
ANEXO 5: Manual de instalación, operación y mantenimiento del prototipo	198
ANEXO 6: Panel fotográfico durante el proceso de investigación	252

RESUMEN

El Perú es un país con una gran variedad climática y de suelos, pero cuenta con un acceso limitado a tecnologías de adquisición de información meteorológica, sobre todo en sectores de bajos recursos económicos. El propósito del presente proyecto es plantear una alternativa de solución para cubrir la necesidad de adquirir información agrometeorológica mediante el desarrollo e implementación de un prototipo de estación agrometeorológica automática, lo cual se logró mediante el diseño de una arquitectura electrónica que consiste en la interacción de diversos elementos electrónicos como: sensores para la medición de variables como la temperatura, humedad relativa, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, y radiación solar; módulos o periféricos, una placa Arduino y un sistema fotovoltaico; los cuales junto a elementos eléctricos complementarios representan un costo considerablemente menor a una estación meteorológica automática comercial y a través de la programación del microcontrolador permiten registrar los parámetros de interés en intervalos de un minuto. Luego, se calibró cada uno de los sensores usando el método de comparación estadística con respecto a una estación de referencia para determinar funciones de calibración que fueron insertados al programa principal con el fin de calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método de FAO Penman-Monteith, para posteriormente validar los datos observados por el prototipo con los observados por la estación de referencia mediante la determinación de indicadores estadísticos. Los resultados de la validación determinan que el prototipo realiza observaciones fiables ya que presentan valores de correlación y correspondencia entre 0.90 y 0.99 y de índice de Nash-Sutcliffe entre 0.85 y 0.99. Adicionalmente, el equipo cuenta con una base de datos y un visualizador virtual de información a través de la plataforma IoT denominada Blynk que opera con redes WiFi. Por último, se elaboró un manual de instalación, operación y mantenimiento con la finalidad de garantizar la funcionalidad del prototipo por periodos prolongados de tiempo y brindar conocimiento de su estructura electrónica y física.

Palabras clave: Arquitectura electrónica, programación, evapotranspiración del cultivo de referencia, Arduino, Blynk.

ABSTRACT

Perú is a country that has a widely climate and soil variability, but it possesses a limited access to meteorological data acquisition technologies, especially over low economics resources sectors. The purpose of this research is setting an alternative of solution to cover the need of acquiring agrometeorological information through the development and implementation of an automatic agrometeorological station prototype, which was accomplished through the design of an electronic architecture that consists in the interaction of different electronic elements such as: temperature, relative humidity, barometric pressure, wind speed and direction, and solar radiation; modules or peripheries; an Arduino board and a photovoltaic system; those which alongside some complementary electronic elements represent considerably less cost than a commercial automatic weather station and by means of the programming of the microcontroller allow to record the parameters in one-minute time intervals. Then, each sensor was calibrated using a statistical comparison method with respect to a reference station to determine calibration functions that were inserted in the main program in order to compute the reference crop evapotranspiration by FAO Penman-Monteith method, to subsequently validate the data observed by the prototype with those observed by the reference station by means of the determination of statistical indicators. The outcomes of the validation determine that the prototype performs reliable observations because they present correlation and agreement values between 0.90 and 0.99 and Nash-Sutcliffe values between 0.85 and 0.99. In addition, the equipment has a database and a information virtual visualizer through an IoT platform named Blynk which operate with WiFi networks. Finally, an installation, operation and maintenance manual was made in order to secure the functionality of the prototype for continuous periods of time and to offer knowledge about its electronic and physical structure.

Keywords: Electronic architecture, programming, reference crop evapotranspiration, Arduino, Blynk.

I. INTRODUCCIÓN

La planificación estratégica y las decisiones agrometeorológicas relacionadas a las actividades de producción agropecuaria en diferentes escalas temporales (corto, mediano y largo plazo) necesitan del conocimiento de las interacciones existentes entre el subsuelo, suelo, las capas atmosféricas, cobertura vegetal, etc.; es decir, están influenciados por el clima y el tiempo, por lo tanto su conocimiento debe ser puesto a disposición de los usuarios como información agrometeorológica eficiente, disponible en el tiempo de manera oportuna y adecuada, y en escalas geográficas adecuadas (Basualdo, 2015).

La disposición de información meteorológica a través de estaciones meteorológicas es relevante porque su monitoreo tiene un alto impacto principalmente en las predicciones climáticas, seguido por la agricultura, salud, zoología, entre otros; en la actualidad se pueden citar problemas particulares e importantes como los son el cambio climático en glaciares, prevención de desastres y prevención ante la alta radiación solar (Netto & Arigony-Neto, 2019; Saini et al., 2016; Ureña Elizondo, 2017).

No obstante, actualmente la red de estaciones abocadas a la medición de parámetros climatológicos en muchas zonas del mundo es considerada de baja densidad, como sucede en los Andes Peruanos, cuya densidad de estaciones es aproximadamente diez veces más escasa que las de Suiza, además de presentar discontinuidades y un bajo rango en la escala temporal de medición (Gubler et al., 2017). Adicionalmente, en India se cuenta con una resolución espacial de estaciones aproximadamente cinco veces mayor a la de Perú, y es catalogada como de baja densidad (Saini et al., 2016). Según todo esto, se puede afirmar que se cuenta con información meteorológica espacialmente y temporalmente de baja calidad, y esto se puede evidenciar en la distribución de estaciones tanto meteorológicas e hidrológicas disponibles en la base de datos del SENAMHI y en la continuidad y rango temporal de sus mediciones.

La tecnología ha avanzado de tal manera que se han planteado métodos para suplir esta falta de información, tales como el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica (NOAA), métodos estadísticos para completar datos históricos faltantes, métodos de homogenización, etc. Asimismo, campos como la electrónica y la ingeniería de sistemas han hecho posible la construcción de estaciones meteorológicas automáticas basadas en microcontroladores y sensores electrónicos en diferentes partes del mundo; sin embargo, la accesibilidad de estos es complicada debido a su alto valor económico en el mercado.

En el ámbito de la agricultura, el Perú es un país con gran variedad de climas y suelos; y con una gran cantidad de usuarios que aún realizan prácticas obsoletas e ineficientes en el uso del recurso hídrico, esto hace necesaria la implementación de estaciones y cubrir tanto espacial como temporalmente su distribución, sin embargo, la realidad es opuesta a lo planteado, esto resultado de dos factores: el primero, la falta de conocimientos en estas tecnologías y recursos económicos para el desarrollo o adquisición de estos sistemas en muchos sectores del país y segundo, a la disposición y condiciones de espacios en las diferentes regiones del país que interfieren en la instalación eficiente de estos sistemas.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad demostrar el beneficio del uso de sistemas embebidos con microcontroladores y sensores programables de bajo costo para la obtención de información agrometeorológica de manera continua, ordenada y en un lugar específico, en este caso en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), mediante el diseño de un prototipo portable y con funcionalidad sencilla, que será capaz de registrar información de: temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar; y mediante estos, la evapotranspiración potencial; los cuales serán calibrados y validados tomando como referencia estándares propuestas por entidades como la Organización Meteorológica Mundial y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Adicionalmente se desarrollará interfaces de visualización de información en tiempo real e histórico de datos con el uso de módulos electrónicos y la tecnología de Internet de las Cosas (IoT), respaldados por una base de datos generada por el propio prototipo

1.1. Objetivo principal

Desarrollar e implementar un prototipo de estación agrometeorológica automática de bajo costo basado en microcontroladores y sensores para obtener información continua y en tiempo real.

1.2. Objetivos específicos

- Diseñar la arquitectura electrónica, construir el prototipo y configurarla mediante la programación, calibración y validación, para asegurar la funcionalidad del sistema y la obtención de la información requerida.
- Calcular el valor de la evapotranspiración potencial de la zona como aplicación del prototipo mediante métodos matemáticos, haciendo uso de la información obtenida por los sensores electrónicos.
- Desarrollar la base de datos y las interfaces de visualización, con el fin de simular a una estación meteorológica estándar.
- Elaborar un manual de instalación, operación y mantenimiento para asegurar el funcionamiento adecuado del prototipo y sus elementos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Desde siglos remotos, la importancia del conocimiento acerca del clima ha sido relevante debido a su influencia en aspectos desde el modo de vida de las personas hasta las decisiones a tomar en el ámbito de la siembra y cosecha o el pronóstico el tiempo (Haefke et al., 2011). A través de los años, la ciencia ha permitido el desarrollo de instrumentos que podían registrar variables climáticas, para luego ensamblarlas y sistematizarlas en estaciones meteorológicas convencionales, hoy en día dichos sistemas se han automatizado para reducir costos y errores de medición, lo que ha abierto una brecha para el desarrollo de estos sistemas de manera más viable abriendo paso al uso de microcontroladores, sensores electrónicos y módulos de transmisión inalámbrica.

Haefke et al. (2011) plantea el uso de microcontroladores fabricados por Silicon-Labs, una tecnología de transmisión inalámbrica denominada Zigbee y sensores analógicos compatibles; todo ello para ensamblar una estación meteorológica inteligente (Smart Weather Station en sus términos) que se comunica de manera inalámbrica con un servidor que permite que en una interface de visualización se muestre la información de las variables meteorológicas registradas, como temperatura, humedad relativa, presión barométrica e intensidad de luz; demostrando la posibilidad de desarrollar un sistema de medición meteorológica con características de economía, flexibilidad en el manejo de data para diferentes propósitos, precisión considerable y capacidad de implementar una red de estaciones.

Saini et al. (2016) propone el uso de una placa Arduino UNO como central de adquisición de información, sensores de bajo costo con mejor exactitud y valores en el factor de correlación mayores a 0.90 con respecto a estaciones accesibles en el lugar de estudio, considerando las variables de temperatura, humedad relativa, presión barométrica y velocidad y dirección de viento; una interface de visualización más agradable basada en

LabVIEW, y comunicación inalámbrica a través del protocolo Zigbee. Así, dicho sistema fue desarrollado con la intención de ser de bajo costo, sencillo de instalar, y proveer pronósticos del tiempo y alertas tempranas.

Nozad et al. (2017) desarrolla un modelo de estación meteorológica, basado en dos aspectos muy importantes a tener en cuenta: el primero, consiste en el diseño de un sistema de adquisición de datos a partir de una placa Arduino UNO y sensores de bajo costo que miden las variables de temperatura, humedad relativa, intensidad de luz y velocidad de viento; el segundo, la adición de un sistema de control y automatización de actuadores a sistemas periféricos como aire acondicionado, calefactores y la luz artificial en un hogar, todo ello en relación a la información brindada por los sensores. Adicionalmente, hace énfasis en el logro de la creación de una base de datos para almacenar la información y poder analizarla utilizando el lenguaje de programación R.

Netto & Arigony-Neto (2019) plantea perspectivas importantes en los aspectos de portabilidad y autonomía, como la consideración de una estructura de soporte para todo el equipo de medición que depende de las condiciones de la zona, el uso de paneles solares y baterías NiCd para crear un sistema de alimentación energética, un sistema de recolección de datos o datalogger para almacenar la data, y un módulo de control del reloj para asociar una referencia del tiempo al sistema autónomo.

Palaguachi Encalada (2018) y Bravo Vecorena (2016) han demostrado principalmente la versatilidad del uso de las placas Arduino y Raspberry Pi estando conectados mediante diferentes protocolos de comunicación, ya sea inalámbricamente o a través de cables, donde la placa Arduino, se encarga de la lectura de los sensores para la medición de variables meteorológicas y dicha información sea enviada a la placa Raspberry Pi, la cual, con acceso a internet, ejecute un servidor local y una base de datos para la gestión y almacenamiento de la información; logrando así poder ser enviada a una plataforma web en la cual el cliente o usuario pueda acceder y generar reportes.

2.2. Observación meteorológica

Se define observación meteorológica de la siguiente manera:

Las observaciones meteorológicas (así como las ambientales y geofísicas afines) se realizan por diversas razones. Se utilizan para la preparación en tiempo real de análisis meteorológicos, predicciones y avisos de tiempo violento, para el estudio del clima, para las operaciones locales sensibles a las condiciones meteorológicas (por ejemplo, operaciones locales de vuelo en aeródromos o trabajos de construcción en instalaciones terrestres y marítimas), para la hidrología y la meteorología agrícola, y con fines de investigación meteorológica y climatológica. (Organización Meteorológica Mundial, 2008, p. I.1-1)

2.2.1. Datos de observación

Según la Organización Meteorológica Mundial (2010, pp. II-1), la adquisición y el análisis de datos de observación meteorológica son parte de actividades relacionadas con el medio ambiente y el clima como los pronósticos del tiempo y análisis meteorológicos en general, los cuales requieren de características tales como resolución temporal y espacial, exactitud y la demanda de información, los cuales a su vez dependen de las diferentes escalas de los fenómenos meteorológicos y de las características de la información que se requiera.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de la escala horizontal o espacial de los fenómenos meteorológicos, ya que estos se pueden encontrar en diferentes escalas temporales y espaciales, en una de las cuales se encuentra aquellos correspondientes a la meteorología agrícola o agrometeorología (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

En la Figura 1 se pueden apreciar la relación entre la resolución temporal y horizontal de los fenómenos meteorológicos, los cuales indican dos aspectos importantes para la presente investigación, la primera, que a mayor magnitud de los fenómenos en la escala espacial, mayor es su duración y segundo, que en la microescala, que es donde se encuentran los fenómenos agrometeorológicos, se necesitan redes más densas y observaciones más frecuentes (Organización Meteorológica Mundial, 2010).

Tabla 1: Clasificación de las escalas horizontales en fenómenos meteorológicos

Escalas horizontales	Alcance	Fenómenos
Microescala	menos de 100 m	Meteorología agrícola, por ejemplo, evaporación.
Topoescala (escala local)	100 m a 3 km	Contaminación del aire o tornados.
Mesoescala	3 km a 100 km	Tormentas, brisa de mar y de montaña.
Gran escala	100 km a 3000 km	Frentes, diversos ciclones, formaciones de nubes.
Escala planetaria	más de 3000 km	Ondas largas de la tropósfera superior.

Fuente: (Organización Meteorológica Mundial, 2010)

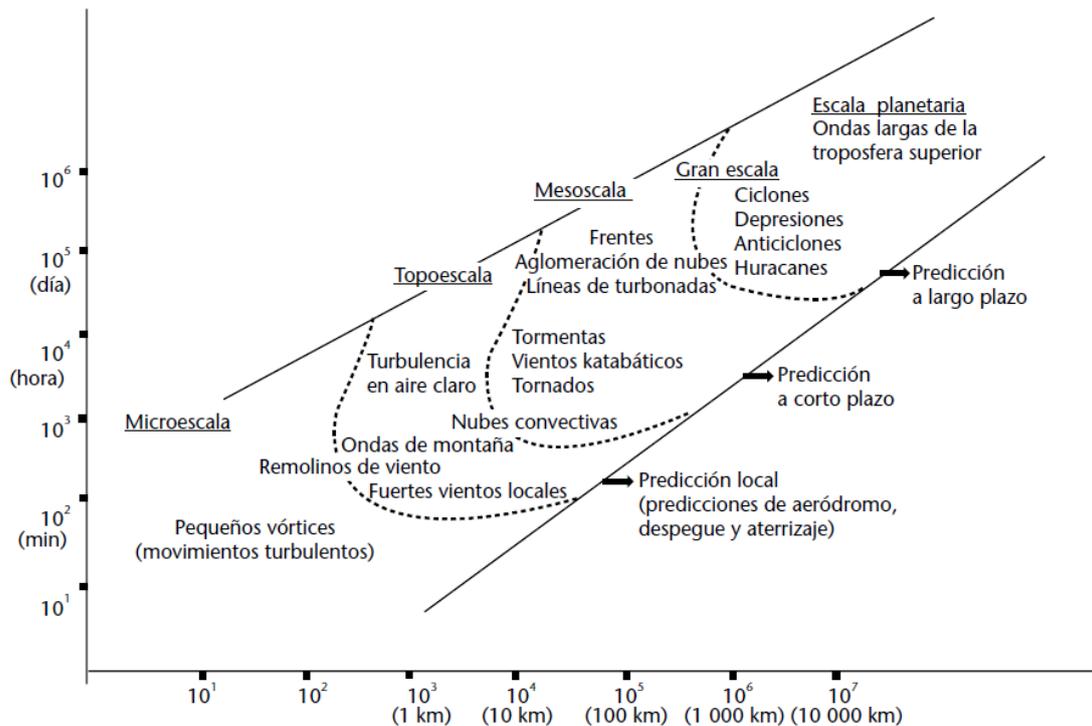


Figura 1: Relación entre la escala horizontal en metros y temporal en segundos de los fenómenos meteorológicos.

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (2010, pp. II-1).

El SMO se diseñó como un sistema integrado por dos subsistemas principales: de superficie y espacial o satelital. El primero consta de elementos principales y secundarios (estaciones sinópticas, marítimas, climatológicas, agrometeorológicas, etc) y el segundo,

de elementos que obtienen información de manera indirecta, basados en el fenómeno de la radiación electromagnética (Organización Meteorológica Mundial, 2008).

El Sistema Mundial de Observación (SMO) provee observaciones del estado de la atmósfera y de la superficie oceánica, obtenidas en la misma superficie terrestre y desde el espacio exterior, dichas observaciones son denominadas observaciones meteorológicas Organización Meteorológica Mundial (2010, pp. I–1). Estas observaciones son previstas para todos los programas asociados a esta misma entidad, tales como los Servicios Meteorológicos Nacionales y organismos destinados a contribuir a la seguridad pública, al bienestar económico y al desarrollo de sus respectivos países; u otros programas medioambientales de otras organizaciones internacionales que la requieran.

2.2.2. Estaciones meteorológicas

La disposición de datos meteorológicos de una zona es de gran importancia para implementar una buena gestión y planificación en agricultura, urbanismo, ingeniería u ordenamiento territorial (Elías Castillo & Castelví Sentís, 2001). En consecuencia, las estaciones meteorológicas o denominadas también estaciones de la red sinóptica de superficie surgen como solución para la adquisición de dichos datos mediante observaciones meteorológicas (Organización Meteorológica Mundial, 2010). Generalmente las estaciones meteorológicas se definen como un método técnico para medir parámetros climatológicos tanto en tierra como en mar con determinados dispositivos, es así como el fin absoluto de estos sistemas es el estudio del clima, cuya aplicación puede ser para diversos fines y su composición no es limitada a métodos no eléctricos (Nozad et al., 2017).

Con la finalidad de obtener mayor número de datos u observaciones y mejorar la fiabilidad de las mismas, surgen las estaciones meteorológicas automáticas (en adelante, EMA), las cuales se conciben como un sistema automatizado basado en las estaciones meteorológicas previamente descritas, son consideradas como tales con la condición de que provea datos con una exactitud comparable a la de una estación convencional, dichas EMA están compuestas por una unidad de adquisición y procesamiento de datos y dispositivos de medición o sensores (Organización Meteorológica Mundial, 2008).

En la Figura 2 se puede apreciar dos vistas de una estación meteorológica convencional o denominada también como observatorio meteorológico, en donde se encuentran distribuidos los instrumentos de medición. Mientras que en la Figura 3 se aprecia una EMA, la cual por su reducido espacio puede ser instalado de manera autónoma y aislada o incluso estar incluido en un observatorio formando parte de su red de equipos de medición.



Figura 2: Observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt.

Fuente: (Universidad Nacional Agraria La Molina, s/f)



Figura 3: Estación meteorológica automática Vantage Pro2 Plus.

Fuente: (Davis Instruments, 2022b)

2.2.3. Agrometeorología y estaciones meteorológicas agrícolas

La agricultura está frente a dos situaciones complejas, la primera es la necesidad de utilizar los recursos de manera sustentable, es decir, evitando la degradación del medio ambiente y la segunda, todo lo relacionado a las condiciones sociales y económicas, por ello, la agrometeorología es el primer paso para la comprensión del sistema climático y, en

consecuencia, posibilita encontrar relaciones cuantitativas entre los cultivos y el clima, en otras palabras, entre la superficie terrestre, la interface suelo-aire y la capa atmosférica; es así que la estimación de los consumos del recurso hídrico, el diseño de sistemas de riego y drenaje; las decisiones relacionadas al uso de suelo y modelos de cultivos son aplicaciones consecuentes del estudio de la agrometeorología para evitar problemas como el aumento del nivel freático, la lixiviación de nutrientes o alta salinidad y el bajo rendimiento de los cultivos (Campos Aranda, 2005; World Meteorological Organization, 2010).

A pesar de que la comunidad meteorológica precisa la diferencia entre clima y tiempo, siendo el primero las características atmosféricas en una zona en particular describiendo todas las estaciones del año o sobre un largo periodo de tiempo, mientras que el tiempo hace referencia a los eventos ocurridos en periodos de tiempo cortos; un usuario o cliente de información agrometeorológica toma decisiones combinando ambos conceptos. (National Centers for Environmental Information, 2018; Rijks & Baradas, 2000).

Las estaciones meteorológicas agrícolas o estaciones agrometeorológicas también pertenecen a la red sinóptica de superficie, con particularidades en el tipo de observaciones que realiza y la ubicación de las mismas (Organización Meteorológica Mundial, 2015). Estas deben precisar de una localización representativa de las condiciones meteorológicas y el fitoclima de estudio, de instrumentos con medidas fiables y de entornos amigables de los instrumentos para facilitar las observaciones (Elías Castillo & Castelví Sentís, 2001). Las estaciones agrometeorológicas se clasifican en cuatro tipos según las variables que miden y los objetivos para las cuales se han instalado, estos son: estación meteorológica agrícola principal, estación meteorológica ordinaria, estación meteorológica auxiliar y estación meteorológica agrícola para propósitos específicos; siendo la primera el tipo que posee mayor cantidad de observaciones, cuyas variables de medición incluidas son más específicos y de mayor cantidad, esto lo hace factible como un modelo referencial y general para un propósito relacionado al sector agrícola (Protocolo Para La Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas, 2013; World Meteorological Organization, 2010).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (Protocolo Para La Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas, 2013) propone las

variables de carácter meteorológico, biológico y de suelo a considerar para las observaciones en estaciones meteorológicas principales. Siendo estas la referencia más explícita de una estación agrometeorológica, se detalla las variables sugeridas como sigue:

- Temperatura del aire a diversos niveles de la capa adyacente del suelo con los valores extremos.
- Temperatura del suelo a profundidades de 5, 10, 20, 50 y 100 cm, con diferentes tipos de cobertura y otras profundidades para fines especiales y las zonas forestales.
- Radiación solar total, componentes de la radiación solar y terrestre, radiación fotosintéticamente activa.
- Insolación.
- Precipitación.
- Evaporación.
- Humedad del aire.
- Evapotranspiración referencial y de cultivos.
- Dirección del viento, velocidad a diferentes niveles de altura.
- Presión atmosférica.
- Registro de hidrometeoros y demás elementos del estado higrométrico, especialmente granizo, rocío, niebla, escorrentía y altura de la capa freática.

2.3. Parámetros agrometeorológicos

2.3.1. Temperatura del aire

La temperatura está definida como “la magnitud física que representa el movimiento aleatorio medio de las moléculas de un cuerpo físico” (Organización Meteorológica Mundial, 2008). Es cuantificada mediante el estado termodinámico del cuerpo en cuestión y el flujo de calor con otro cuerpo, utilizando como unidad la temperatura termodinámica expresada en Kelvin (K). En términos de meteorología, la variable más común es la medición de la temperatura del aire; descrita como el valor leído por un termómetro, condicionado por la protección ante la radiación solar incidente y la acción del viento (Elías Castillo & Castelví Sentís, 2001; Organización Meteorológica Mundial, 2008). La temperatura del aire al nivel del cultivo es acaparada por la agrometeorología, y es común que sea medida teniendo en cuenta criterios como la altura de medición y el uso de

pantallas de Stevenson o comúnmente conocidos como abrigo meteorológico para la protección del instrumento (Allen et al., 2006).

La medición de la temperatura de aire se puede realizar mediante instrumentos clasificados en cuatro grupos, estos son: termómetros de líquido en vidrio, termómetros de deformación, termómetros de líquido en metal y termómetros eléctricos; no obstante, se pueden encontrar instrumentos como termómetros de mínimas y máximas, geotermómetros, termógrafos para la medición de la temperatura para otro fin específico (Allen et al., 2006; Haefke et al., 2011).

2.3.2. Humedad relativa del aire

Uno de los principales componentes de la atmósfera es el agua, el cual se puede encontrar en diferentes estados de agregación que dependen de condiciones físicas como la temperatura y la presión atmosférica, tales como: lluvia, niebla, escarcha, nieve y vapor de agua; siendo este último el gas con mayor presencia en la atmósfera con volúmenes que ascienden desde 0 a 4% contribuyendo a la regulación termodinámica de la superficie terrestre y la distribución de la precipitación sobre la misma (Haefke et al., 2011; Rodríguez Jiménez et al., 2004). En consecuencia, surge el concepto de humedad, definida como la cantidad de vapor de agua presente en el aire, cuyo valor depende de las precipitaciones en la zona, ubicación con respecto al mar, presencia de plantas, entre otros (Rodríguez Jiménez et al., 2004).

La Tabla 2 muestra las diversas formas de cuantificar la humedad atmosférica, de las cuales, la humedad relativa y la temperatura de punto de rocío suelen medirse por estaciones meteorológicas, mientras que las restantes se pueden expresar en función de las mencionadas anteriormente (Allen et al., 2006; Organización Meteorológica Mundial, 2008).

En términos de masa, la humedad relativa del aire representa la cantidad de vapor de agua que puede contener una determinada masa de aire antes con respecto a la máxima capacidad de saturación de la misma masa, estando dicha capacidad en función exponencial con la temperatura. (Haefke et al., 2011; Rodríguez Jiménez et al., 2004).

Entre los instrumentos de medición más comunes están los higrómetros, los psicrómetros y los higrómetros eléctricos o digitales de resistencia o de capacitancia. (Organización Meteorológica Mundial, 2008).

Tabla 2: Definiciones de las magnitudes utilizadas en la medición de la humedad

Parámetros	Descripción	Unidad
Razón de mezcla	Relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco.	kg kg ⁻¹
Humedad específica	Relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo.	kg kg ⁻¹
Temperatura del punto de rocío	Temperatura en la cual el aire húmedo, saturado con respecto al agua a una presión dada, tiene una razón de mezcla de saturación igual a la razón de mezcla dada.	K
Humedad relativa	Razón entre la presión de vapor observada y la tensión de vapor saturante con respecto al agua a la misma temperatura y presión.	%
Presión de vapor	Es la presión parcial de vapor de agua en el aire.	hPa
Tensiones saturantes del vapor	Son las presiones de vapor en el aire en estado de equilibrio con la superficie de agua o de hielo.	hPa

Fuente: (Allen et al., 2006; Organización Meteorológica Mundial, 2008).

2.3.3. Presión atmosférica

Denominada también presión barométrica, es la fuerza ejercida en una determinada superficie por el peso de la atmósfera que está por encima de dicha superficie, cuyo valor depende de factores como: principalmente la altitud sobre el nivel del mar, véase Figura 4, debido a que a mayores altitudes la columna de aire sobre la superficie será menor; la temperatura, ya que al calentarse el aire, aumenta su volumen y hace que sea menos denso; la humedad, debido a que el vapor de agua es menos pesado que el aire, generando así que una atmósfera con mayor humedad pese menos que una atmósfera seca; y la gravedad, ya que la fuerza de la gravedad varía sobre la superficie terrestre debido a la forma esférica irregular de la Tierra (Allen et al., 2006; Andrades Rodríguez & Muñoz León, 2012; Haefke et al., 2011). La unidad básica para la medición de la presión atmosférica es el pascal (Pa), sin embargo, es normal que se utilice la escala de hectopascales, y el

instrumento para determinar su valor se denomina barómetro, en la Figura 5 se muestran de izquierda a derecha variedades de barómetros resumidos en tres grupos: barómetros de mercurio, barómetros aneroides y barómetros electrónicos o digitales (Haefke et al., 2011; Organización Meteorológica Mundial, 2008).

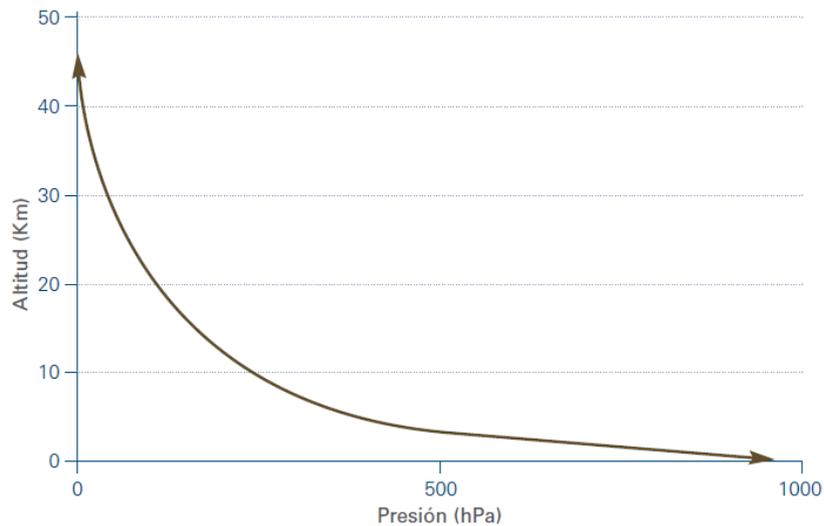


Figura 4: Variación de la presión atmosférica con la altitud.

Fuente: Rodríguez Jiménez et al. (2004, p. 17)



Figura 5: Barómetro de mercurio, aneroides y electrónico.

2.3.4. Velocidad y dirección del viento

El viento es resultado de la diferencia de presiones que existen entre dos zonas o puntos, cuya dirección tiene la misma orientación que la gradiente de presión en dichas zonas, que van de altas a bajas presiones, esta gradiente es causada por la temperatura del aire en dichas zonas, ya que el aire más caliente es menos denso y genera menor presión, y el aire

más frío lo contrario, a su vez estas diferencias de temperatura del aire están estrechamente relacionadas a las temperaturas del suelo con el que están en mayor contacto, provocadas por la irregular acción de la radiación solar en la superficie terrestre (Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012). En términos de agrometeorología, la velocidad y turbulencia del viento causa la remoción de vapor sobre una superficie en la que existe humedad, reemplazando el aire húmedo de la zona por aire seco causando que dicho espacio tenga la posibilidad de recibir partículas de vapor de agua provenientes de un cultivo mediante la evapotranspiración del mismo (Allen et al., 2006).

En meteorología se concibe al fenómeno del viento, siendo originalmente una magnitud vectorial tridimensional, como bidimensional de componentes polares definidas por dos magnitudes: la velocidad del viento y la dirección del viento; en donde, la primera es comúnmente medida en unidades de velocidad lineal como metros por segundo o kilómetros por hora, y la segunda, siendo referida como la orientación hacia donde el viento sopla, hace uso de los puntos cardinales de la rosa de vientos como unidad angular de orientación, véase Figura 6; adicionalmente, es muy común tener en cuenta las fluctuaciones de la magnitud de la velocidad del viento con la altura en el cálculo de la evapotranspiración, véase Figura 7. (Allen et al., 2006; Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012; Organización Meteorológica Mundial, 2008).

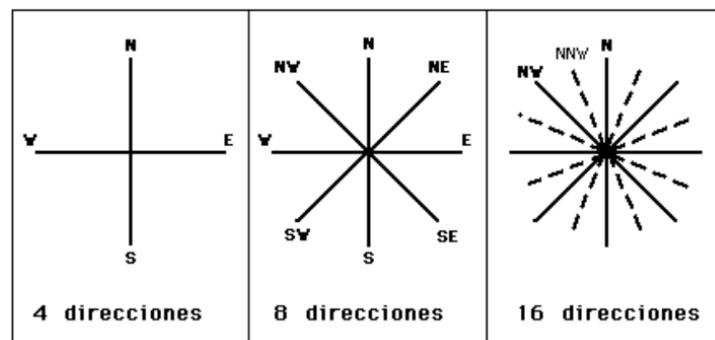


Figura 6: Rosa de los vientos con puntos cardinales.

Fuente: Andrades Rodríguez & Múñez León, 2012 (2012, p. 32).

El principal método para la medición de la velocidad del viento es el uso de anemómetros de diferentes tipos, tales como: de cazoletas y hélice, sónicos, de disco caliente, de hilo caliente; mientras que para la medición de la dirección del viento, comúnmente se usan las

veletas, no obstante, también se pueden medir ambos parámetros fusionando en una misma estructura los instrumentos mencionados o utilizar otros como: anemómetro de tubo de Pitot o de compresión con veleta, anemómetros de empuje o el método de estimación subjetiva, todo dependiendo de la precisión e importancia al momento de la medición (Organización Meteorológica Mundial, 2008; Villanueva Blas, 2014).

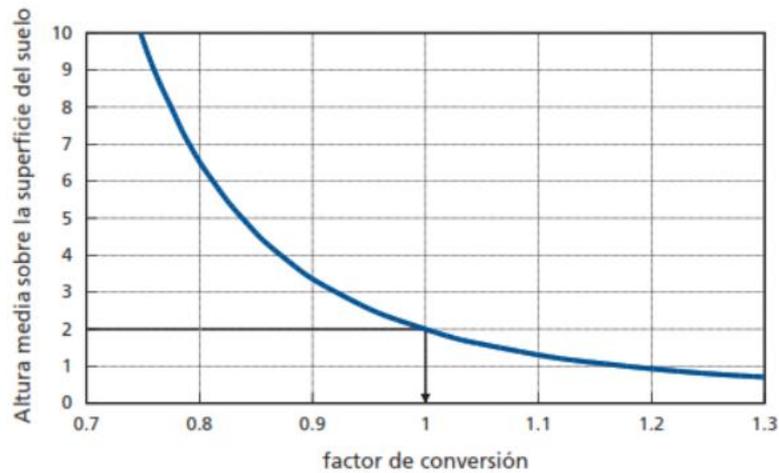


Figura 7: Factor de conversión ante la variación del viento según la altura.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2006, p. 56)

2.3.5. Radiación solar

La radiación solar es definida como la energía electromagnética emitida por el Sol, debido a su comportamiento como “cuerpo negro”, el cual emite radiación con una intensidad máxima posible y absorbe toda la que recibe a consecuencia de su alta temperatura cercana a 6000 K (Elías Castillo & Castelví Sentís, 2001). Las magnitudes de radiación se componen en dos según su origen, la energía solar y la energía terrestre, la primera es aquella radiación de onda corta que incide sobre el límite superior de la atmósfera, en la Figura 8 se muestra el espectro electromagnético de dicha radiación y está compuesta aproximadamente como sigue: 7% de radiación ultravioleta, 44% correspondiente al espectro visible y 48% al infrarrojo; y la segunda es la energía de onda larga emitida por la Tierra, los gases, aerosoles y nubes de la atmósfera, que posee el 99% de ondas largas superiores a 5000 nm (Organización Meteorológica Mundial, 2008, Capítulo 7; Rodríguez Jiménez et al., 2004).

Existen diferentes componentes de la radiación solar a considerar y por lo tanto, diferentes métodos para cada uno de ellos, por ejemplo: la radiación de onda corta y onda larga o la radiación neta se pueden determinar utilizando piranómetros térmicos o de fotodiodo, radiómetros, celdas fotovoltaicas calibradas y estándares, fotodiodos, o fototransistores; la duración del día, mediante heliógrafos; la radiación de un haz de luz dirigido, mediante pirheliómetros o heliómetros; la intensidad de luz, mediante sensores LDR; el albedo, la radiación relativa, la radiación extraterrestre mediante métodos matemáticos o ecuaciones predefinidas (Allen et al., 2006; Bayón Alonzo, 2018; Haefke et al., 2011; Villanueva Blas, 2014).

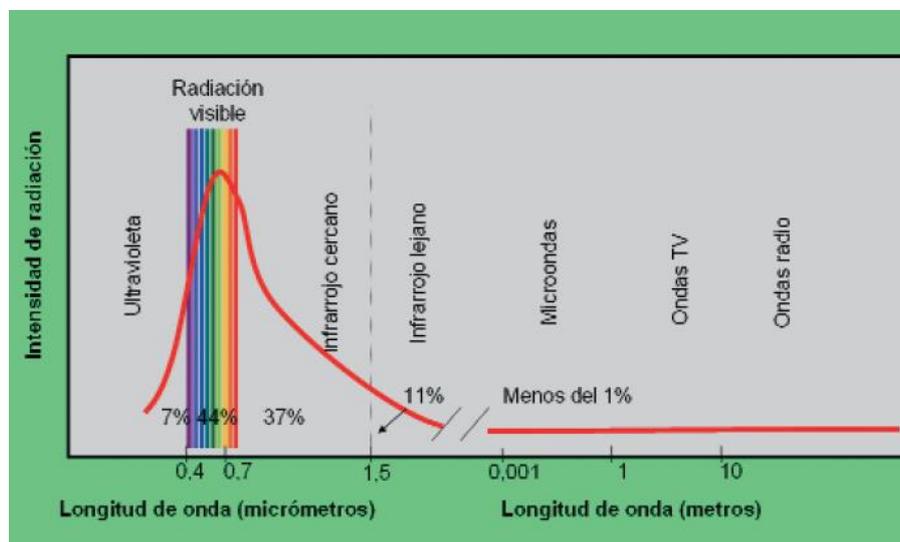


Figura 8: Espectro electromagnético de la radiación extraterrestre.

Fuente: Rodríguez Jiménez et al. (2004, p. 24)

2.3.6. Evapotranspiración

La evapotranspiración es definida como el flujo de partículas de agua producto de dos procesos que ocurren de manera simultánea; en primer lugar, la evaporación, que consiste en el proceso de remoción de partículas de vapor de agua desde una superficie, como un cuerpo de agua, el suelo, la cobertura vegetal; a causa de variaciones en las variables meteorológicas de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento; además de otros factores relacionados al suelo y el cultivo, como el grado de cobertura vegetal, la disponibilidad de agua en la superficie, el riego, la lluvia o el nivel freático; en segundo lugar, la transpiración, que es el proceso a través del cual se genera el flujo de vapor de agua a través de las aberturas estomáticas de la planta causada también

debido a factores climáticos, del suelo y factores adicionales como: capacidad del suelo para conducir el agua a las raíces, la salinidad, las características del cultivo, las prácticas del cultivo, entre otros (Allen et al., 2006, pp. 2–3). Dentro del concepto de evapotranspiración, es importante distinguir entre dos conceptos relevantes, los cuales son: la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real; el primero denominado también y preferentemente como evapotranspiración del cultivo de referencia, se refiere a la cantidad máxima de agua que puede evaporarse de una zona de cubierta vegetal continua sin restricciones de agua y que depende exclusivamente de las condiciones climáticas, por lo que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos; mientras que el segundo hace referencia a la evapotranspiración de cualquier cultivo bajo condiciones estándar y en determinados casos, a cultivos bajo condiciones no estándar (Allen et al., 2006; Organización Meteorológica Mundial, 2008).

Se define la evaporación como la cantidad en volumen o masa de agua que se evapora por unidad de superficie, en consecuencia, la unidad común para la medida de la evapotranspiración es la unidad de profundidad lineal por unidad tiempo, expresada generalmente como milímetros por horas, días o meses (Organización Meteorológica Mundial, 2008, sec. 10.1.2). Existen diversos métodos para estimar el valor de la evapotranspiración, como el uso de tanques evaporímetros, véase Figura 9, el uso de lisímetros, el método de balance energético, de balance de agua en el suelo y las ecuaciones matemáticas que utilizan variables meteorológicas medidas (Allen et al., 2006; World Meteorological Organization, 2010).



Figura 9: Tanque evaporímetro para la estimación de la evapotranspiración.

2.4. Ecuación FAO Penman-Monteith

La ecuación original de Penman-Monteith combina los métodos de transferencia de masa y el balance energético para obtener la Ecuación (1), la cual utiliza los conceptos de resistencia superficial (r_s) y resistencia aerodinámica (r_a); estos son específicos para cada cultivo, en consecuencia, dicha ecuación se utiliza para el cálculo directo de la evapotranspiración en cualquier cultivo, no obstante, con la finalidad de evitar el uso de dicha ecuación, debido a que requiere de parámetros únicos para cada cultivo y etapa de crecimiento, se derivó convenientemente la Ecuación (2) para el cálculo de la evapotranspiración potencial de una superficie de referencia, esta misma definida como “un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23” (Allen et al., 2006). Los parámetros meteorológicos que se utilizan para determinar las variables de la Ecuación (2) son obtenidos a partir de las lecturas que consisten en: temperaturas medias, máximas y mínimas del aire, humedad relativa del aire, velocidad de viento a dos metros de altura y radiación neta; y registrados en periodos diarios.

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

Donde:

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

G : flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

ρ_a : densidad media del aire a presión constante (kg m⁻³)

c_p : calor específico del aire (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

e_s : presión de vapor de saturación (kPa)

e_a : presión real de vapor (kPa)

γ : constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

T: temperatura media del aire a 2 metros de altura (°C)

u_2 : velocidad del viento a 2 metros de altura (m s⁻¹)

2.5. Sistema de una estación meteorológica automática

Una EMA puede consistir en un sistema automatizado de observación meteorológica (y sistema de adquisición de datos) integrado o en un conjunto de dispositivos de medición autónomos conectados a una unidad de recopilación y transmisión de datos. (Organización Meteorológica Mundial, 2008, p. II.1-4)

Asimismo, la Organización Meteorológica Mundial (2008) sugiere que una EMA está conformada por: sensores automáticos, una unidad de procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos; y un equipo periférico, que consiste en el suministro energético del sistema, el reloj de tiempo real y un equipo de verificación o visualización del estado del sistema y la información.

2.5.1. Microcontroladores y microprocesadores

La unidad central de procesamiento generalmente cumple las funciones de adquisición, procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos; los cuales pueden ser ejecutados a través de un microprocesador o varios de estos para cada función (Organización Meteorológica Mundial, 2008, pt. II).

En la Tabla 3 se detallan las principales diferencias entre los microcontroladores y microprocesadores, con el fin de comprender la razón de la preferencia de los microcontroladores desde el punto de vista de desarrollo de proyectos de control y domótica (apLOOP, 2017).

Tabla 3: Diferencias entre microprocesadores y microcontroladores

Características	Microprocesadores	Microcontroladores
CPU	Es una Unidad de Procesamiento Central en sí misma.	Depende de una CPU para realizar sus funciones.
Memorias (RAM y ROM)	Externos y complementarios.	Integrados en el circuito.
Velocidad de operación	Rápida.	Menor que la del microprocesador.
Tamaño	Circuito bastante engorroso y constituida de una gran cantidad de pines para las memorias y decodificar de direcciones.	Tamaño reducido por la integración y reducción de los circuitos externos.
Costo	Muy alto.	Menor que la del microprocesador.
Interferencias	Mayor susceptibilidad a la interferencia electromagnética debido al tamaño y mayor ruido por la complicada composición.	Reducido nivel de interferencia electromagnética gracias a la integración del circuito.

Fuente: (apLOOP, 2017)

A continuación, se detalla algunas familias de placas más comunes y el detalle de los microcontroladores o procesadores que utilizan para el desarrollo de proyectos de bajo costo, aplicados a campos del control, monitoreo, domótica y proyectos enfocados a Internet de las Cosas o en inglés conocido como Internet of Things (IoT).

a. Arduino

Son una serie de placas de circuito impreso o PCB que inicialmente tenían incorporados solo microcontroladores de la familia ATmega, los cuales son de bajo consumo energético y están basados en la arquitectura AVR, una mejora de la arquitectura RISC, los cuales son fabricados y desarrollados por la compañía Atmel. (Atmel Corporation, 2014).

En la Figura 10 se muestra la placa Arduino Mega 2560, que incorpora como unidad de procesamiento al microcontrolador ATmega2560, utilizado por Arango Mitma (2019); Simón Mori (2018) para el monitoreo y almacenamiento de datos de un sistema de riego

por goteo subterráneo a través de sensores y actuadores, demostrando que dicha placa puede interactuar con diversos sensores y transmitir la información a través de redes WiFi para visualizar dicha información en un aplicativo instalado en un dispositivo móvil.

Adicionalmente, Saini et al. (2016); Nozad et al. (2017); Netto & Arigony-Neto (2019) comprobaron la capacidad de la placa Arduino UNO, otro modelo de la familia Arduino basado en el microcontrolador ATmega328P, para formar parte de un sistema de bajo costo para la medición de variables climáticas, cumpliendo con las funciones de un microprocesador en una EMA mediante la interacción con diversos tipos de sensores para la medición de variables meteorológicas, módulos que simulan un sistema de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos, y la programación de la placa para generar predicciones o impulsar actuadores.

En la Figura 11, se muestra otra placa perteneciente a la familia Arduino MKR, los cuales diferencia de los modelos mencionados antes, estas tienen incorporado un procesador de la serie de microcontroladores SAM D21, además este modelo en particular tiene la capacidad de conectarse a redes inalámbricas de WiFi y BLE (Bluetooth de baja energía) por sí misma gracias al módulo NINA-W10, desarrollado por u-blox, y posee un microchip de encriptación ATECC5008 que garantiza la comunicación segura; estas características hacen que este módulo sea adecuado para realizar proyecto de IoT (Arduino S.R.L., 2021).

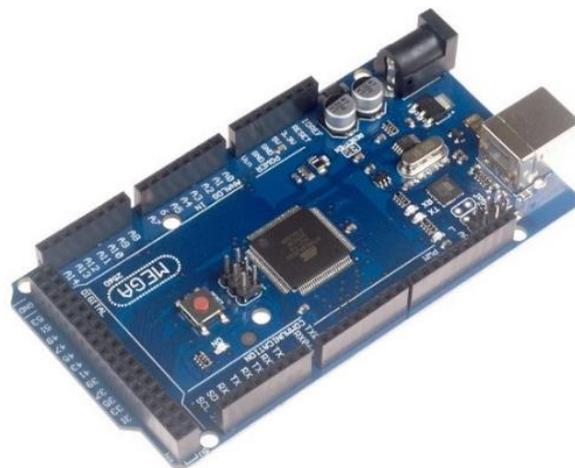


Figura 10: Placa programable Arduino modelo Mega R3.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2022)



Figura 11: Placa programable Arduino MKR WiFi 1010.

Fuente: (Arduino S.R.L., 2021)

b. ESP32

Son una familia de microcontroladores que tienen como fabricante a la empresa Espressif Systems, los cuales cuentan con la capacidad de operar sobre redes WiFi y Bluetooth, y fueron diseñados para realizar proyectos de electrónica y aplicaciones con Internet de las Cosas o comúnmente denominado IoT (Espressif Systems, 2020). Además, en la web se pueden encontrar variantes con características similares, tales como el grupo de microcontroladores ESP8266 o ESP32-WROOM-32, este último integrado a la placa de circuito impreso ESP32-DEVKITC, véase Figura 12, el cual, según Arango Mitma (2019), tiene la capacidad de conectar y monitorear sensores de humedad de suelo, generar comunicación inalámbrica por sí sola a través de una red WiFi y ser compatible con el software con las que las placas Arduino son comúnmente programadas.



Figura 12: Placa programable ESP32-DevKitC

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021i)

En la Tabla 4 se muestran las características de algunos de los microcontroladores señalados en este apartado, en donde, el microcontrolador ATmega está incorporado en la placa Arduino Mega 2560; el procesador ESP32-WROOM-32, en la placa ESP32 DEVKIT; y el procesador SAM D21, en la placa Arduino MKR WiFi 1010 (Atmel Corporation, 2014; Espressif Systems, 2019; Microchip Technology Inc., 2018).

Tabla 4: Características de los microcontroladores de las placas Arduino y ESP32

Características	ATmega2560	ESP32-WROOM-32	SAM D21
Arquitectura de CPU	8-bit AVR	2 microprocesadores low-power Xtensa 32-bit LX6.	32-bit ARM MCU
Memoria flash programable	256 KB.	SPI Flash Externo, hasta 16 MB.	256 KB
Memoria RAM	8 KB.	520 KB.	SRAM 32 KB
Memoria ROM	EEPROM 4 KB.	448 KB para funciones “booting” y “core”	-
Frecuencia de operación	16 MHz.	40 MHz.	48 MHz
Pines de I/O	86	28	52
Canales ADC (Convertidor Analógico-Digital)	16	16	20
Interfaces	USART, 2-Wire, SPI.	UART, SDIO, SPI, I2C, I2S, IR, DAC.	USART, UART, SPI, I2C, I2S, DAC.
Temperatura de Operación	-40 a 85 °C	-40 a 85 °C	-40 a 85 °C

Fuente: Elaboración propia.

2.5.2. Sensores

Los sensores son parte de un sistema automatizado de observación meteorológica y son los encargados de funcionar como transductores de entrada de las variables meteorológicas, ya que un transductor, definido como un dispositivo capaz de convertir una variable física en otra de dominio diferente como un movimiento, presión, flujo, señales eléctricas, entre otros; y además al ser de entrada cumple la función de sensor cuya salida en forma de señal eléctrica, es utilizada en un sistema de procesamiento como son las EMA (Corona Ramírez et al., 2014; Organización Meteorológica Mundial, 2008). Estos se clasifican en sensores

analógicos, los cuales registran la salida del sensor como señales de tensión que fueron convertidas a partir de diferencias de tensión, corriente, resistencia o capacitancia; sensores digitales cuya señal contiene pulsos o grupos de bits, y los sensores inteligentes que incluyen microprocesadores que proporcionan señales digitales en serie o paralelo (Organización Meteorológica Mundial, 2008). Además, según Corona Ramírez et al. (2014), se pueden clasificar los transductores según el principio de funcionamiento físico.

a. Sensor de temperatura y humedad

Estos funcionan mediante un mecanismo eléctrico, que transforma la variación de la temperatura en cambios de señales eléctricas, dentro de los cuales se identifican tres tipos principales: los termistores, basados en la reacción de algunos semiconductores frente a variaciones en la temperatura y necesitan de una ecuación no lineal que relacione el valor de la resistencia con el de temperatura; los RTD o Resistance Temperature Sensor, similares a los termistores pero están basados en la Ley de Ohm sobre conductores metálicos como el platino, el cobre o el níquel y presentan linealidad en su ecuación; y las termocuplas o termopares, basados en el fenómeno termoeléctrico, asociando el valor de la temperatura en función de la variación de tensión que producen los electrones en metales diferentes (Howells, 2018).

Según Corona Ramírez et al. (2014) existen sensores para medir la cantidad de vapor de agua o humedad contenida en diferentes sustancias o medios como el suelo, la celulosa o el aire; que hacen reaccionar a ciertos materiales, alterando sus propiedades físicas y químicas producto de la presencia de moléculas de agua. Sin embargo, para la humedad relativa, que se refiere a la humedad ambiental, se utilizan sensores capacitivos, cuyo funcionamiento se basa en la variación de la permitividad eléctrica de un dieléctrico ante cambios en la humedad del ambiente y modifica el comportamiento del condensador equivalente del sensor.

Murcia Almanza & Rojas Paternina (2015); Nozad et al. (2017) plantearon el uso del sensor de temperatura y humedad de bajo costo DHT11 mediante la conexión con placas con microcontroladores embebidos formando parte de sistemas de monitoreo meteorológico. Asimismo, Netto & Arigony-Neto (2019); Palaguachi Encalada (2018)

realizaron sistemas simulando a una estación meteorológica utilizando el sensor DHT22 para la medición de temperatura y humedad como elemento de medición de bajo costo y que provee resultados fiables y validados. Los sensores mencionados anteriormente pertenecen a la familia de sensores DHT, los cuales son utilizados comúnmente en proyectos que incluyen a los microcontroladores Arduino debido a su facilidad de conexión y grado de exactitud, no obstante, la familia de sensores SHT de Sensirion ofrece una gama de sensores para la medición de temperatura y humedad relativa, como el módulo SHT31 (ver Figura 13) que incluye en su circuito impreso el sensor SHT31 propiamente dicho, el cual es un sensor digital capaz de registrar información de temperatura ambiental y humedad relativa y posee características similares y más convenientes que los sensores DHT22 y DHT11, tales como su bajo costo, sencillez de integración, mejor resolución y precisión. (Barrios Díaz et al., 2018; SENSIRION, 2016)



Figura 13: Sensor de temperatura y humedad SHT31.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021k)

Características:

- Sensor de humedad basado en un polímero capacitivo con una estructura interdigitada y sensor de temperatura que contiene transistores BJT con brecha energética de silicio (*silicon bandgap temperature sensor* en inglés).
- Bajo consumo energético y facilidad de conexión.
- Alta exactitud en la medida de las variables de temperatura ambiental y humedad relativa.
- Bajo costo y facilidad de adquisición.
- Alta rapidez para su inicio y tiempo de mediciones.
- Calibrado completamente de fábrica.

- Rango de medición: 0 – 100 % para humedad relativa y -40 a 125 °C para temperatura ambiental.
- Resolución: 0.01 % para humedad relativa y 0.015 °C para temperatura ambiental.
- Exactitud: ± 2 % para humedad relativa y ± 0.3 °C para temperatura ambiental.
- Alimentación y consumo eléctrico: de 2.4 a 5.5 V y 800 μ A en cada medición.
- Conexión mediante protocolo I2C.

b. Sensor de presión barométrica

Corona Ramírez et al. (2014) describe diversos tipos de sensores de presión, sin embargo, sus aplicaciones se dividen principalmente en aquellos para uso industrial, basados en el principio de un diafragma que reacciona ante la fuerza de la presión; y los que se utilizan para meteorología, dentro de estos últimos tenemos a los sensores basados en la variación de la reluctancia de un circuito magnético, otros con materiales piezoeléctricos como elemento de detección transformando un esfuerzo a valores en voltaje y sensores basados en osciladores o fuelles, cuya vibración que capta la presión será relacionada a una señal de voltaje cambiante con el tiempo.

Palaguachi Encalada (2018); Murcia Almanza & Rojas Paternina (2015) demuestran que el sensor de presión BMP180, un sensor de bajo costo y compatible con dispositivos embebidos, puede formar parte de un prototipo de estación meteorológica. Además, Netto & Arigony-Neto (2019) utiliza el sensor de presión BMP280, perteneciente a la misma familia del sensor mencionado anteriormente, y demostrando que puede ser utilizado como componente para la medición de presión atmosférica en una estación meteorológica automática y es altamente compatible con la placa Arduino UNO.

En la Figura 14 se muestra el módulo de presión barométrica y temperatura BME280, cuyo diseño consiste en una placa de circuito impreso con agujero para la conexión respectiva y dentro de la placa se tiene al sensor propiamente dicho cuya característica es de ser un sensor piezorresistivo para la medición de la presión barométrica absoluta y posee prestaciones adicionales respecto a los sensores BMP280 y BMP180 como la inclusión de un sensor de temperatura ambiental y humedad relativa, y mayor grado de exactitud y precisión (Bosch Sensortec, 2021).



Figura 14: Circuito impreso BME280 para presión barométrica, humedad y temperatura

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021j)

Características:

- Bajo consumo energético.
- Posibilidad de conexión mediante protocolo I2C y SPI, compatibles con Arduino.
- Bajo costo y facilidad de adquisición en diferentes versiones, siendo ésta la más versátil.
- Calibrado de fábrica y provee también valores de altitud y temperatura.
- Rango de medición: 300 a 1100 hPa y -40 a 85 °C.
- Resolución: 0.0016 hPa y 0.01 °C.
- Exactitud: ± 1.0 hPa para 300 a 1100 hPa y 0 a 65 °C.
- Alimentación y consumo eléctrico: 1.2 a 3.6 V y 1120 μ A máx.

c. Sensor de velocidad y dirección de viento

Murcia Almanza & Rojas Paternina (2015); Villanueva Blas (2014) plantean el uso de anemómetro de cazoletas para la medición de la velocidad del viento, utilizando sensores de efecto Hall y elementos electrónicos para el acondicionamiento de la señal de salida, demostrando que mediante esta metodología se pueden conectar a microcontroladores o sistemas embebidos como sistemas de medición y adquisición de datos. Saini et al. (2016) propuso una estación meteorológica inalámbrica en la que se incluyó anemómetros y veletas conectadas a una placa Arduino UNO y se obtuvieron resultados de velocidad de viento con una correlación aceptable y valores de dirección de viento mostradas en una interfaz gráfica simulando a una rosa de vientos. Bravo Vecorena (2016); Murcia Almanza & Rojas Paternina (2015); Netto & Arigony-Neto (2019) propusieron el uso de un módulo

para la medición de velocidad y dirección de viento denominado Weather Meters de la compañía Sparkfun, véase Figura 15, el cual consiste en un anemómetro de cazoletas para medir la velocidad del viento y una veleta, para la dirección del viento como parte de una estación meteorológica automática y capaz de conectarse con facilidad a sistemas embebidos como Raspberry PI y Arduino.

El funcionamiento del anemómetro consiste en un interruptor magnético o “reed switch” en inglés, el cual está asociado al eje de las cazoletas, de tal manera que cuando este dé un giro accionado por el viento, se produzca una señal que active el interruptor debido a la presencia de un campo magnética; mientras que, con respecto a la veleta, cuyo eje está asociado a una resistencia variable o potenciómetro, identificando que para determinada posición se establezca un valor de resistencia que varía el voltaje que consume el instrumento. Estos valores obtenidos se correlacionarán luego a sus unidades respectivas en la programación del sensor.



Figura 15: Weather Meters, módulo de sensores de velocidad y dirección de viento, y precipitación.

Fuente: (SparkFun Electronics, n.d.).

Características:

- Bajo consumo energético.
- Facilidad de conexión mediante un único cable RJ11 (telefónico) para ambos módulos y compatibles con los pines digitales y analógicos de Arduino.
- Lectura mediante interrupciones por hardware para el anemómetro y analógico para la veleta.
- Costo relativamente bajo con respecto a otros equipos similares en el mercado.
- Resolución del anemómetro: cada rotación del anemómetro produce un valor de 1.492 MPH (2.4 Km/h o 0.667 m/s).
- Resolución de la veleta: posibilidad de obtener hasta 16 valores de resistencia, por lo tanto, es posible obtener hasta 16 puntos cardinales.
- Alimentación: 3.3 o 5 V, se ajustan los valores para determinado voltaje.

d. Sensor de radiación solar

Guerra Hidalgo et al. (2013), demuestra que es posible medir la radiación solar utilizando un fototransistor, el cual se puede obtener a bajo costo en el mercado, sin embargo, es necesario atenuar la radiación entrante utilizando capas de teflón, esto es necesario debido a que atenúa la radiación de una forma adecuada y evita la sobresaturación del sensor. Burgt (2020) utiliza múltiples sensores para la medición de la radiación solar en sus diferentes rangos del espectro electromagnético, tales como: el SII145, véase Figura 16; el ML8511, véase Figura 17; el GUVVA-S12SD, el TSL2591 y el BH1750; los cuales fueron comparados con un piranómetro de referencia, demostrando que los dos primeros ofrecen el mejor desempeño mediante un modelo de regresión lineal múltiple. Estos mismos, ofrecen sensibilidad ante diferentes rangos espectrales, el sensor SII145 registra información en los rangos visible, infrarrojo, UV-B y UV-A, mientras que el sensor ML8511 cubre el espectro ultravioleta (UV-B y UV-A); con dicha información es posible cubrir gran parte del espectro de la radiación solar, teniendo en consideración la información provista por la hoja de datos y cuyas características principales de cada sensor se presentan a continuación (LAPIS Semiconductor Cod., 2013; Silicon Laboratories, 2013).

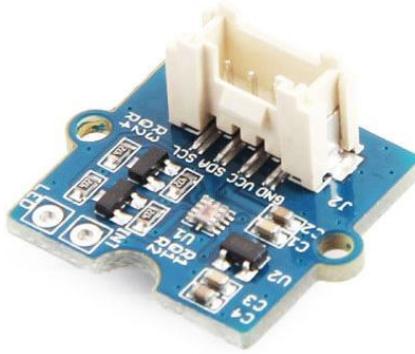


Figura 16: Sensor de luz solar Grove-SI1145.

Fuente: (Seed Technology, 2021).

Características:

- Conexión de cuatro cables (protocolo I²C).
- Costo bajo.
- Dimensión pequeña, adaptable y fácilmente reemplazable.
- Espectros: Rango visible, infrarrojo y ultravioleta.
- Sensibilidad espectral: 300 a 1100 nm con pico en 530 nm para el espectro visible, 300 a 1100 nm con pico en 800 nm para el espectro infrarrojo.
- Rango de medición para el espectro ultravioleta: índice UV 0 a 11.
- Voltaje de suministro: 1.71 V mínimo y 3.6 V máximo.
- Corriente de operación: 4.3 mA típico y 5.5 mA máximo.

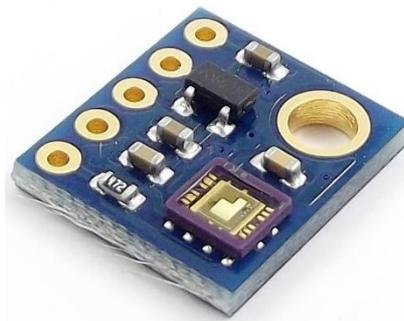


Figura 17: Sensor de radiación UV ML8511.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021g).

Características:

- Bajo consumo eléctrico (300 μ A típico y 500 μ A máximo).

- Conexión de tres cables (tierra, alimentación y accionador).
- Costo muy bajo.
- Dimensión pequeña, adaptable y fácilmente reemplazable.
- Sensibilidad espectral: 280 nm a 560 nm con pico en 365 nm.
- Voltaje de operación: 2.7 V mínimo, 3.3 V típico y 3.6 V máximo.
- Rango de medición: 0 W/m² a 150 W/m² de intensidad UV a 365 nm de longitud de onda.

2.5.3. Módulos externos

Según la Organización Meteorológica Mundial (2008), las estaciones meteorológicas automáticas utilizan elementos externos que ayuden a la gestión y manejo de la información como parte del equipo periférico, tales como:

- Dispositivos que provean información de tiempo durante las horas de funcionamiento del equipo mediante señales de radio, GPS o a partir de información provista por circuitos integrados como relojes de tiempo real (RTC).
- Dispositivos que operen con memorias externas para poder almacenar la información en tiempo real y cuando no se dispone de la transmisión de datos, ya que normalmente los microcontroladores y sistemas embebidos cuentan con memorias, pero estos se encargan exclusivamente de almacenar datos, constantes o programas con funciones para la operación del sistema.
- Dispositivos para introducción de datos y observaciones, como visualizadores numéricos con teclados en estaciones semiautomáticas, o dispositivos para la visualización de datos como apoyo al observador o al usuario mediante monitores digitales en estaciones meteorológicas simples.
- Dispositivos que operen como suministro eléctrico y dispositivos que garanticen la estabilidad y el funcionamiento sin interferencia, además de la regulación a voltajes adecuados para los dispositivos del sistema.

a. Módulo reloj de tiempo real

Según Mohd Alias & Mohyar (2017), un reloj de tiempo real o real-time clock (RTC, por sus siglas en inglés) es un sistema de reloj que provee valores de tiempo real útiles para

sistemas que operan con fechas y horas, además tienen la característica de funcionar por largos periodos de tiempo aún si se reprogramara el microcontrolador que lo acciona o se desconecta del conector de poder. Normalmente, estos dispositivos operan con un cristal oscilador que posee una frecuencia estándar de 32.768KHz (*kilohertz*), protocolo de comunicación I²C o SPI, consumo eléctrico reducido (desde 1 hasta 5.5V), temperaturas ambientales normales (0 a 70°C como mínimo) y poseen arquitecturas similares entre las diferentes marcas que proveen estos dispositivos como: SII-IC Semiconductor, Dallas Semiconductor, Maxim Integrated, NXP Semiconductor.

RezaKhan et al. (2012) plantea el uso de un módulo RTC DS1307, véase Figura 18, para crear funciones de gestión de tiempo para que se puedan mostrar en un módulo de visualización junto a valores de temperatura obtenidos de un sensor. Netto & Arigony-Neto (2019) utiliza el mismo módulo para una estación meteorológica, el cual se ubicó en el datalogger del sistema para mantener activo el sistema de calendario y reloj; además se conecta de manera satisfactoria a la plataforma Arduino.

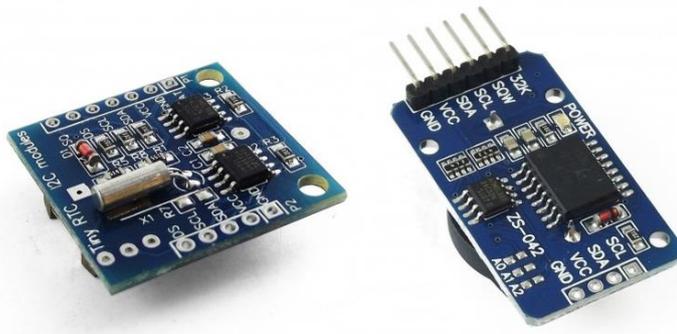


Figura 18: Módulos de reloj de tiempo real RTC, DS1307 y DS3231 respectivamente.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021f, 2021e).

b. Módulo de memoria externa

El concepto de registradores de datos o *datalogger*, como sistema de adquisición de datos o parte del mismo, consiste en un dispositivo con la capacidad de almacenar o registrar la información, eliminando la presencia de un operador en el proceso de la recolección de datos. (Chase et al., 2012)

Un aspecto fundamental de los sistemas de adquisición de datos, cuando no se dispone de la función de transmisión de datos a través de alguna red, es la necesidad de una memoria capaz de grabar la información, basado en esto, Azúa-Barrón et al. (2017); Netto & Arigony-Neto (2019) proponen el uso de módulos lector de tarjetas SD y microSD Arduino, véase Figura 19, y memorias externas compatibles como parte del datalogger, el cual cumple la función de almacenamiento de datos, considerando que el uso de memoria es reducido y facilita el transporte de datos a un ordenador personal; además demuestran su compatibilidad con la placa Arduino.



Figura 19: Módulos adaptadores de memoria externa SD y microSD respectivamente.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021d, 2021e)

c. Módulo de visualización

Según Reza Khan et al. (2012) existen dispositivos de visualización compatibles con microcontroladores como son los monitores de siete segmentos (SSD por sus siglas en inglés), monitores de matriz de puntos (dot-matrix display), pantallas de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) o pantallas LED (diodos emisores de luz). Es común que se utilicen los módulos LCD 20x4 o 16x2, véase Figura 20, para mostrar los parámetros registrados por los sensores en proyectos de estaciones meteorológicas con Arduino, demostrando que este sistema embebido es compatible con dichos módulos (Saini et al., 2016).

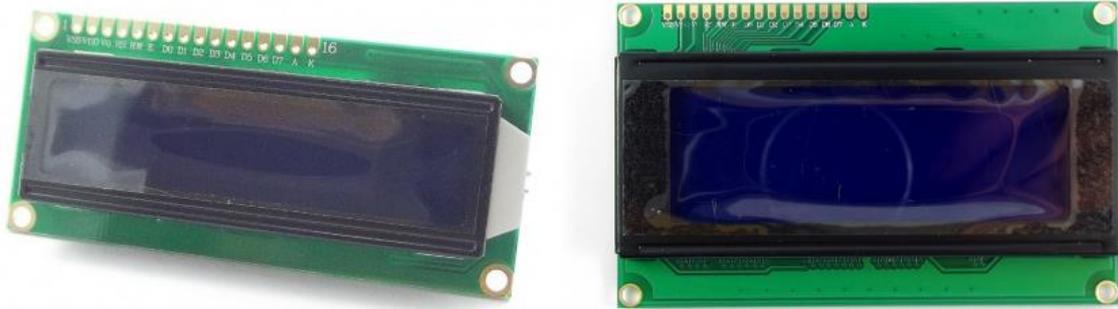


Figura 20: Display alfanumérico LCD 1602 y 2004, respectivamente.

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021b, 2021c).

d. Módulo convertidor de voltaje

En muchas investigaciones (Bravo Vecorena, 2016; Murcia Almanza & Rojas Paternina, 2015; Netto & Arigony-Neto, 2019) se han observado que los sensores, módulos y microcontroladores utilizados operan en rangos bajos de voltaje, niveles entre los 3 a 6 voltios; por ello se opta por utilizar fuentes externas de alimentación que proveen en promedio 5VDC (voltios en corriente continua) o sistemas de baterías con paneles solares para suplir de energía a todo el sistema y si hubiese componentes que requieren o soportan niveles de voltaje más altos que los mencionados anteriormente.

En el mercado es muy común observar diferentes tipos de convertidores de niveles de voltaje, ya sea AC-DC (de corriente alterna a corriente continua) o DC-DC (niveles en corriente continua); siendo un tipo de estos últimos, los convertidores de voltaje step-down los más convenientes cuando se trabajan con fuentes de energía como las mencionadas en el anterior párrafo, ya que estos reducen niveles de voltaje que podrían alterar o dañar a los dispositivos o sensores, a diferencia de los convertidores step-up que hacen lo inverso. En la Figura 21 se muestra un convertidor de voltaje step-down que opera con corrientes máximas de 3A (amperios), tolera voltajes desde 4.5 a 40 VDC (voltios en corriente continua) y produce voltajes desde 1.23 a 37 VDC, siempre y cuando el voltaje de entrada supere en 1.5 V como mínimo al voltaje de salida.

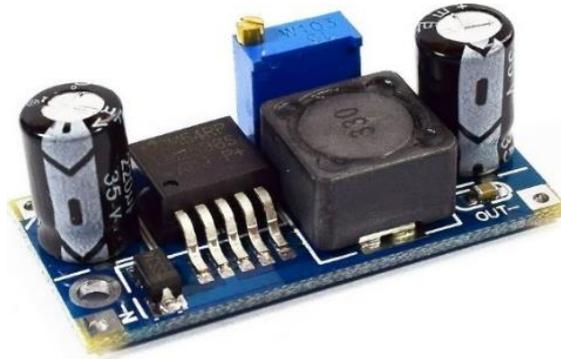


Figura 21: Módulo conversor de voltaje DC-DC Step-Down LM2596

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2021a)

2.6. Sistemas fotovoltaicos

Según Castañeda Santa Cruz (2016), un sistema fotovoltaico está conformado principalmente por tres unidades: unidad de generación, unidad de control y conversión, y unidad de almacenamiento; en donde, la primera unidad utiliza el recurso de irradiancia solar para convertirla en energía eléctrica y las dos restantes regulan y gestionan el flujo de dicha energía para su uso en dispositivos que operan con corriente continua y, con ayuda de un inversor, con corriente alterna; esto hace que el dispositivo sea autónomo en términos de energía eléctrica y se pueda optar este sistema como una solución alternativa a la necesidad energética.

2.6.1. Panel solar

Alternativamente conocidos como módulos fotovoltaicos, celdas solares o células solares, los cuales son dispositivos compuestos de materiales semiconductores que transforman la irradiancia incidente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico; generando niveles de tensión nominal y corriente eléctrica según la cantidad de celdas conectadas y la disposición de la irradiancia respectivamente (Villanueva Blas, 2014).

La eficiencia de los paneles está determinada por factores como: la intensidad de la irradiancia solar, que a su vez depende del ángulo de incidencia, duración del día, nubosidad y variaciones según las estaciones del año; la temperatura del módulo solar que determinan una curva típica de intensidad-voltaje de paneles solares; y el tipo de sistema a dimensionar, que puede ser autónoma, semiautónoma o no autónoma (Castañeda Santa

Cruz, 2016; Mansur et al., 2014). En consecuencia, el dimensionamiento de los paneles solares está sujeto a muchas variables en función del recurso solar disponible y la cantidad de energía que será emitida a la red de cargas, buscando un máximo punto de eficiencia y potencia eléctrica.

Según Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería [OSINERGMIN] (2015), en la etapa de dimensionamiento, ya sea por cualquier método, se tiene en consideración la disponibilidad de los módulos fotovoltaicos en el mercado y sus especificaciones técnicas, clasificadas según sus características como:

- Características físicas: dimensiones del panel, peso, número de células en serie y en paralelo, y tamaño de las células.
- Características eléctricas: tensión nominal, potencia máxima o potencia pico, corriente de corto circuito, tensión en circuito abierto e intensidad en el punto de máxima potencia.
- Características constructivas: tipo de celdas, material del marco, presencia de toma de tierra, certificación y tiempo de vida o garantía de potencia.

2.6.2. Regulador de carga solar

Este elemento forma parte de la unidad de control y conversión en el sistema fotovoltaico, su función es la de ser el elemento intermediario entre los módulos fotovoltaicos o paneles solares y la unidad de almacenamiento para poder mantener los ciclos de carga y descarga de las baterías a utilizar de manera adecuada con la finalidad de evitar problemas de sobrecarga y descargas excesivas, es decir, es un elemento de gestión de la energía generada por el panel solar (Castañeda Santa Cruz, 2016).

En la Tabla 5 se muestran las características que se toman en cuenta en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para un regulador de carga, conocido también como controlador de carga.

Tabla 5: Características técnicas de un regulador o controlador de carga solar

Característica	Descripción
Capacidad del controlador o corriente nominal	Valor de capacidad para controlar la máxima corriente producida por el módulo, se recomienda un valor menor a 1.25 veces la corriente de corto circuito.
Voltaje del controlador o voltaje nominal	Valor que se especifica de acuerdo al voltaje nominal del módulo fotovoltaico.
Voltaje de corte	Valor superior para proteger una batería en estado de carga plena, que oscila entre los 13.3 y 13.8V.

Fuente: Adaptado de (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2015, p. 37).

2.6.3. Batería solar

El elemento que conforma la unidad de almacenamiento en sistemas fotovoltaicos es la batería de plomo-ácido, la cual es la encargada de almacenar la energía eléctrica producida por los módulos durante las horas de sol, normalmente las baterías tienen las siguientes características: ser la fuente energética ante la ausencia de sol o cuando la energía solar ya no está disponible, por ejemplo, en las noches o en periodos nublados, lo que traduce en días de autonomía del sistema; tener ciclos de carga y descarga, lo que en el dimensionamiento se expresa como la profundidad de descarga que viene a ser la máxima descarga tolerable para el buen funcionamiento de la batería; y finalmente, tener una capacidad de trabajo, que es la magnitud que determina su capacidad, medida en *amperios-hora* y que determina cuánto tiempo el sistema puede operar uno o varios dispositivos sin necesidad de recarga (Castañeda Santa Cruz, 2016; Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2015).

2.7. Software y programación

Según Juganaru Mathieu (2014), los programas, o también denominados software en el mundo de la computación son una serie de instrucciones agrupadas en dicho que se ejecutan en un formato que una máquina o computadora pueda procesar, dichos programas resuelven tareas que el usuario requiere que se hagan con la mayor eficiencia posible y

para esto, debe precisar que el software sea desarrollado o elaborado, a esta acción se la denomina como programación. Un lenguaje de programación es la forma gramatical de las instrucciones de un programa para que determinado software pueda funcionar de acuerdo al objetivo planteado, es así que está definido por una sintaxis, la cual propone las reglas gramaticales, y la semántica, referida a los elementos que constituyen el programa, como son los tipos de datos, instrucciones o definiciones.

2.7.1. Estructura de programación

Un paradigma de programación determina la visión y métodos para desarrollar la estructura de un programa, por ejemplo: paradigma imperativo, declarativo, estructurado, orientado a objetos, etc.; los cuales determinan la presencia y organización de elementos informáticos, como las variables, constantes, expresiones, funciones y bloques estructurados que determinan el flujo de un programa (Juganaru Mathieu, 2014).

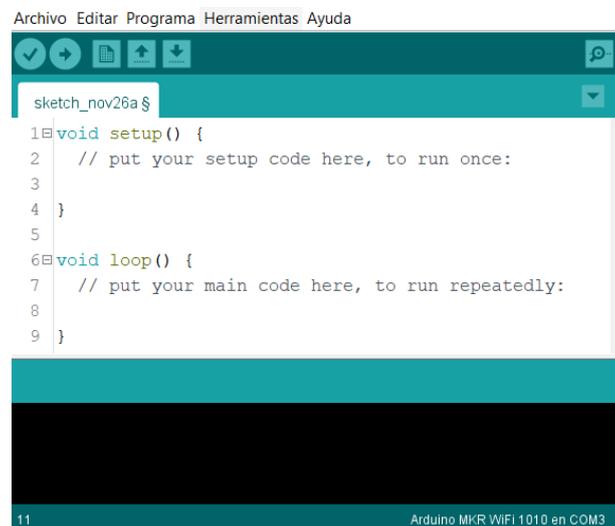
2.7.2. Arduino

Los microcontroladores utilizados en los diferentes modelos de placas Arduino son programables, lo que quiere decir que permiten grabar en sus memorias algún programa ejecutable, como recibir información de sensores y procesarla o enviar señales a actuadores de manera permanente o hasta que se sobrescriba por otro programa; esto se realiza a través de un Entorno de Desarrollo Integrado o IDE (Integrated Development Environment), el cual es un software que permite escribir, editar y probar programas definidos por el usuario, verificar errores de sintaxis, y grabar el programa en la memoria del microcontrolador (Torrente Artero, 2013). Además, dicho IDE o entorno de programación de Arduino, véase Figura 22, permite compilar el código a través de la conversión del programa escrito en lenguaje Arduino, cuyo lenguaje realmente está basado en el lenguaje de programación C/C++, a una serie de instrucciones codificadas en bits o llamado lenguaje máquina, el cual es compatible con los microcontroladores incorporados en las placas Arduino. La estructura del IDE de Arduino está basada en tres componentes principales:

- la sección de declaración de variables globales al inicio del programa escrito (denominado comúnmente “sketch”).

- La sección de la función “void setup”, cuyas instrucciones se ejecutan una sola vez y sirve para inicializar señales periféricas.
- La sección de la función “void loop”, cuyas instrucciones se ejecutan luego de la función “void setup” de manera repetida o en bucle, empezando secuencialmente desde la primera hasta la última instrucción dentro de dicha sección.

Además, es posible crear funciones definidas por el usuario, que se pueden ejecutar en las funciones “void loop” o “void setup”, estas funciones forman parte del programa y se definen en una sección diferente a las anteriormente mencionadas (Torrente Artero, 2013).



```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_nov26a $
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
11
Arduino MKR WiFi 1010 en COM3

```

Figura 22: IDE o entorno de programación de Arduino.

2.8. Internet de las cosas

Es un término, mejor conocido por sus siglas en inglés IoT (Internet of Things), el cual consiste en una tecnología contemporánea considerada como una revolución del Internet, ya que permite la interconexión y comunicación entre entidades virtuales, objetos o máquinas y las personas, a través de conexiones por cableado o inalámbricas y una arquitectura compuesta por las capas de sensores, de redes y portales, de manejo de datos y de aplicaciones (K Patel & M Patel, 2016). En la actualidad existen una variedad de plataformas IoT dedicadas al procesamiento de datos y automatización en procesos industriales y residenciales, las cuales proveen de interfaces que permiten interactuar con lenguajes de programación de alto nivel como Matlab, Python, LabView; es así como

Quiñones-Cuenca et al. (2017) logra la recopilación y procesamiento de información meteorológica usando una red de sensores inalámbricos, y enviarlos a una plataforma IoT para la gestión y visualización de la información. Arango Mitma (2019) demostró que es posible conectarse a plataformas IoT como Blynk a partir de la placa Arduino Mega 2560 con un módulo adicional, el Ethernet Shield para la conexión a internet, y la placa ESP32 DEVKIT V1, para poder interactuar con sensores de humedad de suelo y enviar impulsos programados a un sistema de riego, automatizando dicho sistema y monitoreando las variables en tiempo real a través del aplicativo Blynk instalado en un dispositivo móvil.

2.8.1. Blynk

Es una plataforma diseñada para el IoT, la cual fue diseñada para el control de sistemas embebidos o hardware de manera remota y está compuesta básicamente por tres componentes principales, véase Figura 23, estos son: la aplicación Blynk, la cual permite la creación de una interfaz gráfica instalable en dispositivos móviles mediante widgets definidos por la plataforma; el servidor Blynk, el cual permite la comunicación inalámbrica entre determinado dispositivo con acceso a internet y el móvil con la aplicación instalada a través de la nube de la plataforma (Blynk Cloud); y las librerías Blynk, para la comunicación con el servidor y procesar los comandos de ejecución del dispositivo a través de la programación (Blynk, 2020). Esta plataforma permite diferentes tipos de conexiones, tales como: WiFi, Bluetooth, BLE, Ethernet, USB, GSM, etc; y además es compatible con microcontroladores de diferentes familias como ATmega, ESP32, ESP8266, etc.

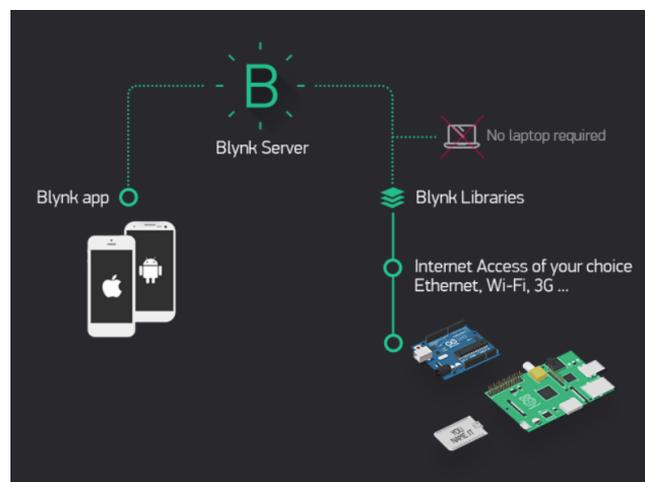


Figura 23: Componentes de la plataforma Blynk.

III. METODOLOGÍA

3.1. Ubicación del proyecto

La ubicación del prototipo fue previamente definida, teniendo en consideración que la finalidad de la presente investigación es la determinación de parámetros climáticos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. En consecuencia, la ubicación predefinida está localizada en la Universidad Nacional Agraria La Molina, véase Figura 24, cuya localización política y geográfica se describe a continuación:

- País : Perú
- Departamento : Lima
- Provincia : Lima
- Distrito : La Molina
- Longitud : 12°04'55" S
- Latitud : 76°56'53" O
- Altitud : 235 m.s.n.m

La zona de instalación específica del prototipo se definió en referencia a los lineamientos establecidos por el “Protocolo para la Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas, Agrometeorológicas e Hidrológicas”, en efecto, tomando las siguientes consideraciones:

- Lugar en el cual, el registro de las variables a medir sea representativo de las condiciones atmosféricas comunes del área monitoreada.
- Área que no esté rodeado de interferencias u obstáculos que afecten las mediciones de las variables, tales como: edificaciones y fuentes artificiales de calor, humedad y/o contaminación.

- No estar ubicado sobre una topografía accidentada que impidan la correcta instalación de los equipos o instrumentos de medición, ni de una superficie como la del hormigón, asfalto o roca triturada.



Figura 24: Ubicación de la zona de instalación del prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

- La orientación del prototipo debe garantizar que los instrumentos o equipos de medición que lo requieran, como los anemómetros, la veleta, instrumentos para medir la radiación solar, entre otros; estén en una posición adecuada.
- Como estación agrometeorológica, debe estar ubicada en una zona representativa de las condiciones agrícolas y naturales de la zona, las cuales son afectadas por los factores climáticos que serán medidos.

Adicionalmente, se consideró la ubicación del prototipo en una zona que garantice su funcionamiento adecuado y simule a una estación automática, por lo tanto, se tomaron los siguientes criterios:

- Zona habilitada, o por mejorar, con las condiciones de medición de evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0): cultivo hipotético de pasto,

con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23; pasto extenso, regado semanalmente, altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra al suelo. (Allen et al., 2006)

- Acceso a una red de internet y electricidad en un radio máximo de 30 metros, con la finalidad de poder instalar un equipo emisor de red WiFi y cuya área de influencia abarque el área de instalación del prototipo.
- Contar con estaciones de referencia cerca de la zona de instalación para realizar la calibración y validación de datos generados por el prototipo, estos pueden ser estaciones meteorológicas convencionales o estaciones automáticas.
- Debido al diseño portable del prototipo y con la finalidad de garantizar la protección del mismo, este debe ser ubicado en una zona cuya área esté cercada o delimitada por una estructura que no altere o interfiera las variables climáticas que serán medidas.

3.2. Variables agrometeorológicas

El prototipo adoptó un modelo de observación agrometeorológica, específicamente el de una Estación Meteorológica Agrícola Principal con observaciones de carácter meteorológico, por lo que las variables meteorológicas a medir son: temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, radiación solar, presión atmosférica y precipitación pluvial. En la Tabla 6 se muestra las características operacionales de las variables meteorológicas que se consideraron, tales como las unidades de medición, exactitud, rango de medición, frecuencia de observaciones (Organización Meteorológica Mundial, 2008; Protocolo Para La Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas, 2013; World Meteorological Organization, 2010).

Tabla 6: Descripción de las variables meteorológicas a considerar

Parámetro	Unidad	Rango	Resolución	Exactitud	Frecuencia de observaciones
Temperatura del aire	°C	-40 a 60	0.1	±0.2	Promedios horarios de muestreos cuyas frecuencias sean menores a 1 minuto.
Humedad Relativa	%	0 a 100	1	±3	Promedios horarios de muestreos cuyas frecuencias sean menores a 1 minuto.
Velocidad	m/s	0 a 50	0.5 o menos	±0.5 para ≤5	Periodos horarios

Parámetro	Unidad	Rango	Resolución	Exactitud	Frecuencia de observaciones
del viento				m/s y $\pm 10\%$ para > 5 m/s	
Dirección del viento	Grado sexagesimal	0 a 359	1	± 5	Periodos horarios
Radiación solar	W/m ²	0 a 1000	10	$\pm 10\%$	Totales diarios para una calidad moderada
Presión atmosférica	hPa	500 a 1050	0.1	± 0.3	Periodos horarios
Evapotranspiración de referencia	mm	0 a 100	0.1	± 0.1 para cantidades menores a 5 mm	Periodos diarios

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Consideraciones generales

Previamente al diseño e instalación de la estación meteorológica, se identificaron algunos aspectos importantes referidos a la exposición del equipo, tales como:

- Estructuralmente, el prototipo debe basarse en las estaciones meteorológicas automáticas disponibles en el mercado, tales como los de las marcas Davis, Rainbird, Sparkfun, entre otros; quienes ofrecen una gama de diseños estructurales que tienen en común el uso de una estructura de soporte y montaje de los elementos y sensores que componen la estación, circuitos protegidos por cajas de protección eléctrica y en su mayoría, fuentes de alimentación independientes a la red; tales como: pilas, paneles solares, baterías, etc.
- La fuente energética debe ser independiente a la red para poder garantizar la portabilidad del equipo y su independencia de una fuente de corriente eléctrica instalada, además deberá operar a un voltaje nominal de 12 voltios para asegurar la alimentación eléctrica de todas las cargas que conforman el prototipo, debido a que los sensores, módulos y circuitos electrónicos en el mercado operan con voltajes menores al mencionado anteriormente.

- Como se mencionó en el párrafo anterior, los circuitos eléctricos trabajan comúnmente con voltajes de operación menores a 12 voltios, no obstante, estos mismos circuitos podrían ser dañados si se someten a ese valor o un valor diferente, el cual es especificado en sus hojas técnicas de datos. Por ello, es necesario implementar reguladores de carga para valores de 5 y 3.3 voltios, los cuales son los rangos comunes sobre los que operan los dispositivos electrónicos (sensores, módulos, etc.) que se conectan con microcontroladores.
- Es imprescindible utilizar lenguajes de programación y software de código abierto para la programación de los microcontroladores utilizados para el registro y control de las mediciones.
- El equipo debe tener la capacidad de almacenar la información tanto de manera local mediante el almacenamiento en una tarjeta de memoria externa o datalogger, como de manera inalámbrica utilizando una red WiFi, la cual deberá ser provista para cumplir este aspecto.

3.4. Selección de componentes electrónicos del prototipo

Los elementos electrónicos y eléctricos del prototipo fueron clasificados de acuerdo a su funcionalidad de la siguiente manera: los sensores, que son dispositivos que reaccionarán ante los cambios en las variables climáticas de interés; los módulos y periféricos, que son aquellos elementos que complementan las funciones del prototipo según sus características como el almacenamiento de datos, el control de tiempo o la visualización en tiempo real; el microcontrolador quien se encarga de interactuar con los dos tipos de elementos anteriores para intercambiar información en forma de señales eléctricas y a su vez se encarga de adquirir, procesar y transmitir la información generada; y la fuente energética que se encarga del suministro energético del equipo de manera constante.

3.4.1. Selección de sensores

Los sensores seleccionados para cada variable agrometeorológica de interés fueron escogidos principalmente de acuerdo a los siguientes criterios:

- Cumplir los requisitos establecidos en la Tabla 6 del apartado 3.2 para la lectura de las variables de interés.
- Tener compatibilidad con el microcontrolador utilizado, tanto en el aspecto de hardware (protocolo de comunicación y suministro energético) como de software (código o librería disponible).
- Ser de bajo costo o de un costo relativamente inferior al de los sensores utilizados en estaciones meteorológicas disponibles en el mercado.
- En caso de no cumplir o no especificar alguna característica, como se manifiesta en el primer punto, deberá tener un respaldo bibliográfico en cuanto a su desempeño.

3.4.2. Selección de módulos y periféricos

Estos módulos o periféricos son necesarios para complementar las funciones del prototipo y deberán tener compatibilidad con el microcontrolador utilizado de la misma manera que los sensores, además de ser de bajo costo y cuya disponibilidad en el mercado esté asegurada.

El módulo de reloj de tiempo real, fue necesario para el control y gestión del tiempo real e instantáneo del sistema, debido a que cada dato adquirido por el microcontrolador, tiene que estar asociado con una referencia temporal para evaluar el cambio de las variables meteorológicas en el tiempo y su cuantificación.

El módulo datalogger permitió al equipo almacenar la información en una memoria externa extraíble, con la finalidad de poder generar la base de datos y contar con la información para las fases de calibración y validación, se utilizó una placa con un circuito electrónico que utiliza una tarjeta de memoria fija o extraíble con capacidad de almacenamiento digital y pueda conectarse al microcontrolador, de tal manera que la información recibida por el mismo sea almacenada instantáneamente.

El módulo visualizador local fue instalado con la finalidad de proveer al operador del equipo información acerca de los registros de los sensores y el estado operacional de los módulos ante cualquier falla energética o de los elementos mismos.

3.4.3. Selección del microcontrolador

La selección de este elemento obedece a tres funciones principales descritas a continuación:

Adquisición de datos: el microcontrolador seleccionado fue capaz de conectarse a los sensores y módulos o periféricos que proveen de información importante a través de protocolos de comunicación como: transmisión de datos digitales o analógicos, UART, SPI, I²C, entre otros; además fue posible programarlo mediante el IDE Arduino en un ordenador de escritorio con ayuda de librerías existentes.

Procesamiento de información: el microcontrolador permitió la inclusión de funciones nuevas para la ejecución de tareas definidas por el usuario como: la conversión de la información adquirida a valores con las unidades o formatos correspondientes, la inclusión de factores de calibración para la modificación de datos, cálculo de evapotranspiración, verificación del funcionamiento de los sensores y módulos, entre otros.

Transmisión de datos: el microcontrolador fue capaz de transmitir la información a través de dos medios: el primero, a través de conexiones a módulos periféricos de visualización en tiempo real o de generación de base de datos; y el segundo, a través de una red WiFi, por lo que dicho dispositivo pudo conectarse a una red inalámbrica e interactuar con el servidor de la plataforma Blynk, para transmitir la información por dicho medio para la visualización en dispositivos móviles y almacenamiento de datos en la nube.

3.4.4. Selección de la fuente energética

La fuente energética seleccionada fue un sistema fotovoltaico que está compuesto de un panel solar, una batería de carga solar y un controlador o regulador de carga, además fue necesario la inclusión de dos módulos reguladores de voltaje, para reducir el voltaje de entrada provisto por el módulo fotovoltaico y dividirlo en dos líneas principales y fijas de voltaje requeridos por el microcontrolador, los módulos y los sensores utilizados. La disposición de la fuente energética es la siguiente: el panel solar, la batería de almacenamiento de energía, el regulador o controlador de carga y dos módulos convertidores de voltaje; cuyas consideraciones y diseño se basaron en la metodología

planteada según Castañeda Santa Cruz (2016), considerando que aquella fue desarrollada para el consumo energético en edificaciones y en elevadas cantidades de energía, por ello se obviaron algunos aspectos y se orientó la metodología a componentes electrónicos utilizados en la presente investigación.

a. Panel solar

La fuente de energía que se utilizó es un panel solar comercial cuyos parámetros serán definidos de acuerdo a tres aspectos secuenciales.

Primero, el cálculo de la demanda energética o cargas, que consiste en identificar todas las cargas que utilizan la energía que el panel genera; para efectos prácticos, se estimó midiendo con un multímetro la corriente demandada en amperios en la simulación de las conexiones del microcontrolador y todos los sensores montados sobre una placa de pruebas, luego, el voltaje de trabajo se consideró como único y el de mayor valor, es decir, 5 voltios; luego, el producto de ambos valores, la cantidad de horas de trabajo (24 horas) y un factor de seguridad de 1.1 dieron como resultado la demanda energética o consumo diario del sistema en unidades de watt-hora/día.

Luego, el recurso solar e inclinación del módulo fotovoltaico se identificaron de acuerdo a lo planteado en Castañeda Santa Cruz (2016) tal como se muestra en la Tabla 7, estos valores se tomaron en cuenta ya que corresponden al recurso solar en la zona de estudio de la referencia y ésta es cercana a la zona de instalación del prototipo, dichos valores se obtuvieron de un portal web perteneciente a La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés); para una inclinación horizontal y valores promedio en 22 años de información.

Tabla 7: Recurso solar promedio mensual en kWh/m²/día - 22 años en promedio.

Lat -12.079													
/Lon - 76.948	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Incl 0	6.48	6.6	6.73	6.16	5.04	3.86	3.75	4.1	4.84	5.82	6.31	6.51	

Fuente: Castañeda Santa Cruz (2016).

Se escogió el mes más desfavorable y se multiplicó por un factor por inclinación recomendado para un ángulo de 45°, cuyo valor equivale a 0.62, así se obtiene el valor de las Horas Solar Pico (HSP) que representa a la oferta del recurso solar.

Finalmente, se calculó una relación denominada factor del mes desfavorable que equivale a la relación entre los valores de demanda y oferta más críticos, es decir, el mes de mayor demanda y el mes de menor recurso solar respectivamente, con dicha relación multiplicada por un factor de seguridad de 1.1 se pudo calcular la potencia pico (Wp) de diseño, considerando que solo se utilizará un panel solar por la simplicidad del prototipo y beneficiar a su característica de portabilidad.

b. Batería solar

La batería solar, tiene que ser compatible con el panel solar en términos de voltajes, por lo que se tuvo que escoger un valor de tensión nominal de la batería igual a Vbat (voltios) con el mismo valor que la tensión nominal del panel.

Se identificaron los parámetros esenciales para el cálculo, que son: el número de días de autonomía (Nd), la profundidad de descarga máxima (Pd) que usualmente toma el valor del 60% y un factor de seguridad Fs igual a 1.1. Con dichos valores se procedió a calcular la capacidad de trabajo igual a Ct Ah (amperios-hora) utilizando la Ecuación (3).

$$Ct = \frac{Eelec * Nd * Fs}{Pd * Vbat} \quad (3)$$

El valor a considerar se obtuvo redondeando el valor calculado al inmediato superior y tomando en consideración los valores ofrecidos comercialmente en unidades de amperios-hora.

c. Regulador de carga

Este componente es el encargado de gestionar la energía del sistema, considerando que existen variaciones de voltaje y amperaje provistas por el panel solar principalmente. El

valor de tensión nominal del regulador igual a V_{reg} (voltios) tendrá que ser el mismo que el del panel solar y la batería.

Para la determinación de la corriente nominal del regulador, I_{reg} amperios, se procedió a determinar las corrientes máximas que circulan por el sistema, estos fueron la corriente que proporciona la batería al sistema, el cual estaría determinado por la demanda energética multiplicado por un factor de seguridad de 1.25; y la corriente de corto circuito del panel solar, I_{sc} en amperios, el cual se obtiene a partir de las especificaciones técnicas del panel solar adquirido; de estos valores se escoge el mayor y se redondea al inmediato superior según los reguladores disponibles en el mercado para identificar el valor de corriente nominal que dicho regulador debería tolerar.

d. Módulos convertidores de voltaje

Finalmente, se optó por utilizar estos módulos para poder regular los valores de voltaje proporcionados por el sistema fotovoltaico, ya que, por lo general, estos sistemas trabajan a valores nominales de 12 voltios o 24 voltios; y los componentes del sistema electrónico trabajan con valores entre 3 a 5 voltios.

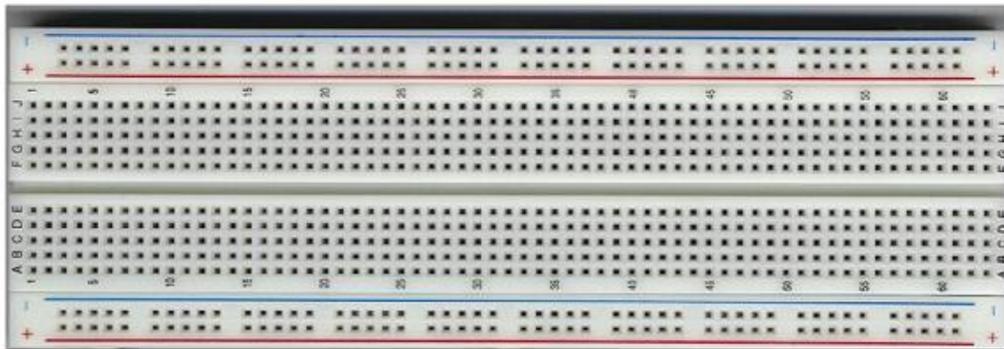
Por ello, se consideraron dos de estos módulos para asegurar los dos voltajes de trabajo más comunes, es decir se generaron dos líneas de tensión, una de 5 voltios y otro de 3.3 voltios, los cuales fueron los voltajes de operación comunes para el microcontrolador, módulos y sensores seleccionados, según se evidencian en sus respectivas hojas de datos.

3.5. Diseño de la arquitectura electrónica

Luego de seleccionar los elementos principales que componen el prototipo, como sensores y módulos o periféricos, se elaboró esquemas de conexiones para cada uno de ellos y para ello se utilizó el software de código abierto Fritzing, que permitió generar vistas en placas de pruebas (breadboard, en inglés) o comúnmente conocidas en el mercado como protoboard, véase Figura 25, el cual es una placa con agujeros conectados internamente entre sí, de manera horizontal en el centro y de manera vertical en los extremos, y sobre los cuales se pueden montar cables, componentes eléctricos o dispositivos electrónicos con la finalidad de simular un circuito. Dichos esquemas se desarrollaron con la finalidad de

simular las conexiones correspondientes a cada módulo como los protocolos de comunicación de los componentes con el microcontrolador, la cantidad de líneas de transmisión para cada una y las líneas de alimentación energética; los cuales se encontraban especificados en la hoja de datos de cada elemento, para posteriormente realizar dichas conexiones en pruebas reales de laboratorio, verificando que cada elemento por individual funcione adecuadamente.

VISTA EXTERIOR DEL PROTOBOARD



VISTA INTERIOR DEL PROTOBOARD

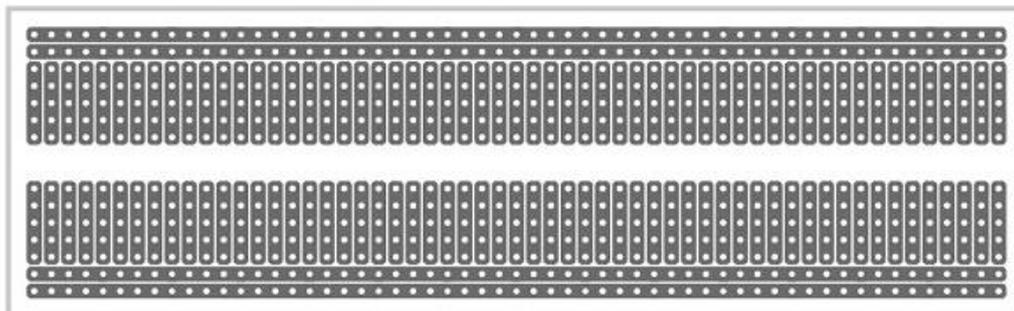


Figura 25: Detalle de protoboard o placa de pruebas o ensayos.

A continuación, se elaboró un esquemático general con todos los componentes electrónicos y eléctricos utilizados, con la finalidad de determinar conexiones en común o cruces no deseados, de igual manera se desarrolló dicho esquema general en el software Fritzing. Posteriormente, se llevó a pruebas reales de laboratorio que consistieron en conectar el microcontrolador con un ordenador y poder conectar cada uno de los componentes de manera individual y luego en conjunto, según el esquemático general, para ello se hizo uso del software Arduino IDE, el cual es compatible con microcontroladores de la familia Arduino y cuenta con una gama de librerías para la interacción con módulos de bajo costo y cuya interface permite modificar los programas para las condiciones necesarias en esta

fase de pruebas y visualizar la información final en el monitor digital que presenta el mismo software; comprobando así el funcionamiento general del prototipo en cuanto a arquitectura electrónica.

Finalmente, en base a dicho esquema general de conexiones y el respaldo generado por las pruebas en laboratorio, se elaboró un plano de conexiones eléctricas en el software Eagle, que sirvió para diseñar la placa de la unidad central de procesamiento del prototipo, el cual representa la arquitectura electrónica del prototipo.

3.6. Diseño definitivo para la construcción del prototipo

Luego de elaborarse la arquitectura electrónica del prototipo, se procedió a construir y ensamblar el prototipo teniendo como base las conexiones eléctricas y componentes electrónicos mostrados en el esquemático y plano de conexiones. Esta actividad involucró que se considere al prototipo como un sistema, es decir, un grupo de partes o componentes que se relacionan entre sí para realizar una función predefinida, dichas partes se contemplaron como subsistemas, los cuales son aquellos espacios físicos donde se agruparon los diferentes componentes electrónicos seleccionados según sus condiciones de emplazamiento e instalación y las estructuras o elementos complementarios que permitieron desarrollar su función de manera adecuada según los requerimientos y conectarse con la unidad central de procesamiento y con la fuente energética. En la Figura 26 se aprecia un diagrama de los subsistemas considerados para el diseño definitivo del prototipo, además de la relación que guarda cada uno de ellos con otros, dichos subsistemas son los siguientes:

- Subsistema de medición de temperatura y humedad
- Subsistema de medición de presión
- Subsistema de medición de viento y radiación solar
- Subsistema de gestión de datos
- Subsistema de alimentación y regulación energética

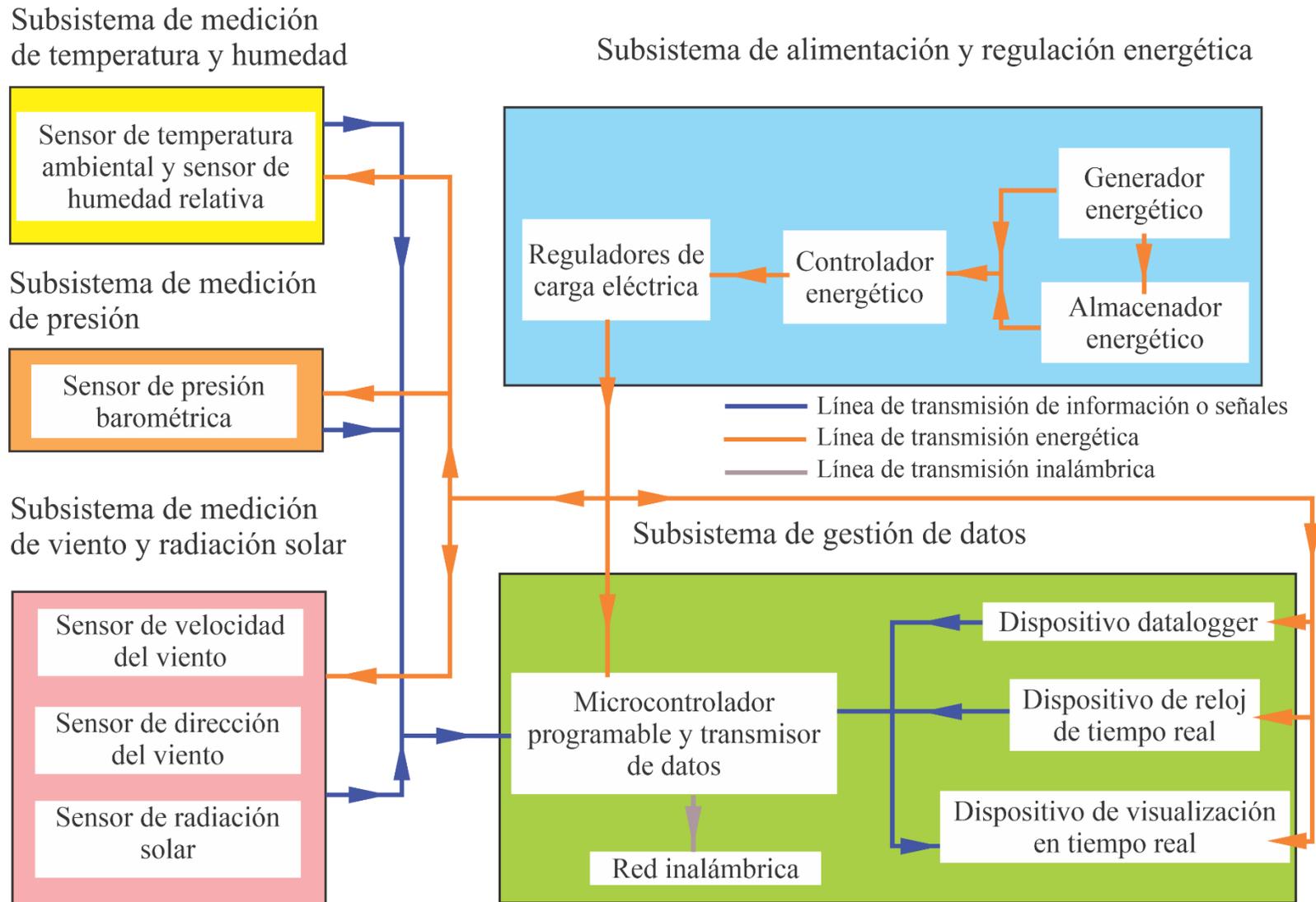


Figura 26: Esquema de componentes del prototipo.

3.6.1. Subsistema de medición de temperatura y humedad

Este subsistema está conformado por los sensores de temperatura del aire y de humedad relativa del aire, los cuales fueron incluidos en un solo circuito o módulo como los sensores descritos en la sección 2.5.2.

Este módulo se acondicionó para que los sensores puedan tomar lecturas con la menor interferencia posible. Caro Vega (2011) establece lineamientos y sugerencias para la construcción de un abrigo meteorológico, véase Figura 27, que posee las características de una pantalla de Stevenson, cuyo color blanco provoca la reflexión de las ondas de radiación solar para evitar el aumento de la temperatura interna, lo que podría alterar las lecturas del sensor, y además, permite el flujo libre de aire para simular el ambiente exterior e impide el ingreso directo de luz solar, viento y lluvia a los sensores ubicados el interior. En consecuencia, la caseta o estructura que contiene a los sensores tuvo la siguiente configuración física: diseño con discos de color blanco superpuestos uno sobre otro y dejando una cámara interna libre donde se aloje el sensor en lugar de las persianas como en un abrigo convencional, y una estructura de soporte que permita al abrigo sujetarse de un poste metálico o algún soporte para estar sobre una altura determinada; este modelo es adoptado del diseño convencional de estaciones meteorológicas automáticas en el mercado.

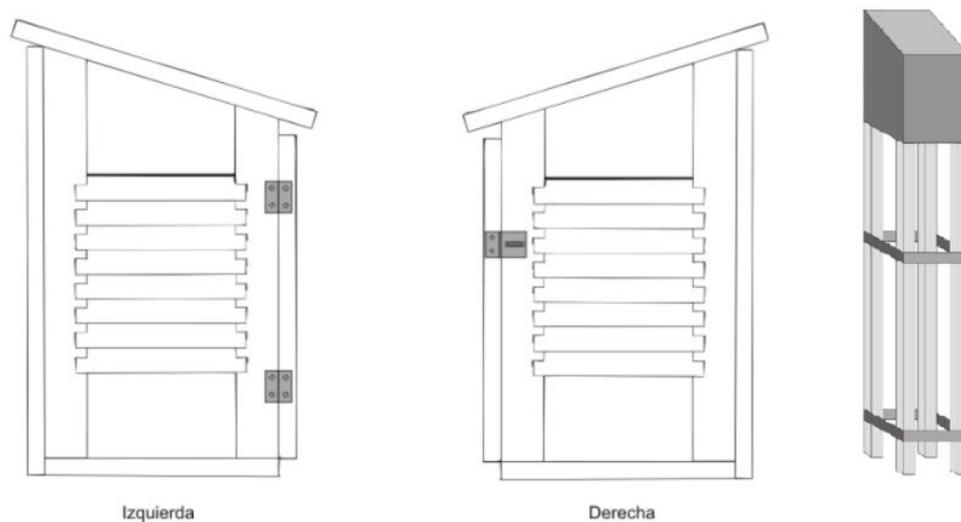


Figura 27: Esquema gráfico de un abrigo meteorológico usado en estaciones meteorológicas convencionales

Fuente: Caro Vega (2011)

Luego, el sensor fue ubicado en la parte interna de dicho contenedor y además con una cobertura igual a la del sensor DHT21 para proteger los sensores propiamente dichos de cualquier agente externo que pudiera ingresar a la cámara y, finalmente, se conectaron con cables los pines del sensor a una roseta telefónica que adaptó la salida del sensor a un conector del tipo RJ11 llevando las cuatro líneas de conexión de acuerdo a lo planteado en el esquemático y plano de conexiones.

3.6.2. Subsistema de medición de viento y radiación solar

Este subsistema se planteó de manera separada al anterior por la única razón de que ambos se dispusieron en diferentes bloques físicos. Este subsistema se conformó por los sensores de velocidad del viento, dirección del viento y radiación solar; cuyas estructuras y ubicaciones se dispusieron como sigue:

Los sensores escogidos para la medición de velocidad del viento y dirección del viento formaban parte de un mismo módulo y estructura, ya que ambos miden variables físicas relacionadas al viento, no obstante, como se muestra en la Figura 15, algunos módulos constan de otros sensores incluidos, como en este caso, el sensor de precipitación pluvial. En consecuencia, el módulo escogido con los sensores que contiene no presentó la dificultad de acondicionarlo debido a que contaba con las características de protección de las placas que contienen los elementos sensoriales electrónicos, la estructura para el soporte de dichas protecciones y un tipo de conexión estándar como el conector tipo RJ11.

En contraste, los sensores de radiación solar seleccionados fueron ubicados cada uno dentro de un contenedor, véase Figura 28, cuyo diseño fue realizado en un software para modelado en tres dimensiones y posteriormente sería materializado mediante impresión 3D, además los sensores fueron acomodados de tal manera que se encuentren dirigidos hacia el cenit para captar la radiación solar en un ángulo sólido de 2π estereorradianes o lo que corresponde a una semiesfera y luego se cubrió la parte superior de la cobertura diseñada con una lámina transparente que evita el paso de agentes externos como la lluvia, la humedad o el polvo, sin alterar u opacar el paso de la radiación solar. Luego, cada sensor fue adaptado a una conexión de salida del tipo RJ11 mediante una roseta telefónica que se encontrará próximo al contenedor protector del sensor.

Finalmente, cada grupo de sensor, contenedor y adaptador fue soportado con una estructura similar al del módulo de velocidad y dirección del viento, que posteriormente serían unidos mediante elementos de sujeción y dispuestos de tal manera que ningún sensor se vea interferido por el otro.

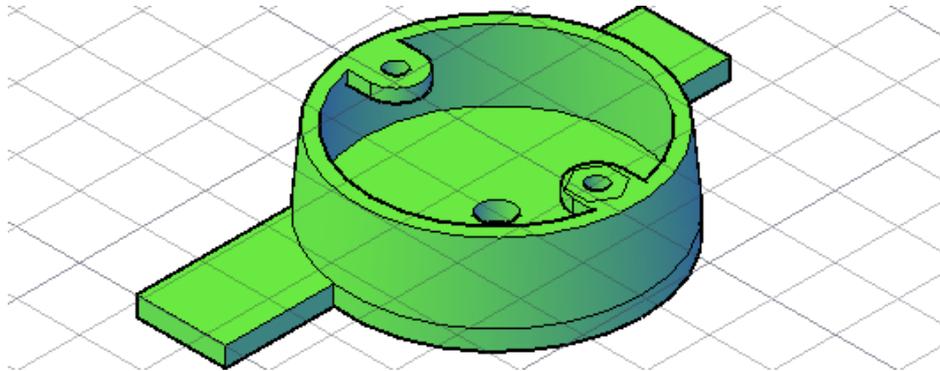


Figura 28: Diseño digital de estructura del sensor de radiación solar.

3.6.3. Subsistema de gestión de datos

Este subsistema fue desarrollado para ser el encargado de realizar la adquisición, procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos mediante el ensamblaje de cuatro módulos principales, los cuales son: los dispositivos datalogger, de reloj de tiempo real, visualización en tiempo real y el microcontrolador. Sin embargo, en el aspecto físico este subsistema es representado por la unidad central de procesamiento, ya que se dispuso en un mismo espacio físico a los módulos conformantes del presente subsistema, a los elementos que permiten la conexión con los elementos de los otros subsistemas y las líneas de conexión que unen todos los elementos mencionados a través de cables o pistas conductoras; lo cual se realizó de la siguiente manera:

Primero, en base al plano de conexiones, se realizó un plano de circuito electrónico en el software Eagle, en el cual se visualiza el microcontrolador, los componentes externos (sensores, módulos, alimentación eléctrica) y las pistas conductoras o líneas de conexión entre todos estos elementos.

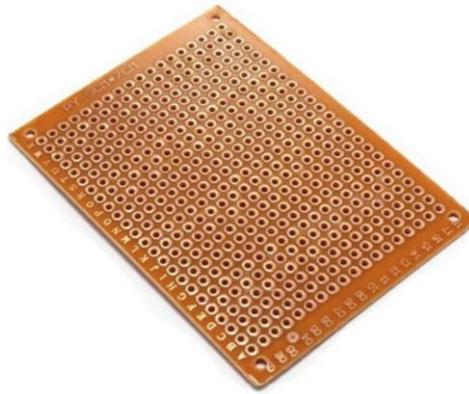


Figura 29: Placa de circuito del tipo matriz de puntos de baquelita y cobre.

Luego, dicho plano de circuito electrónico se plasmó en una placa de circuito del tipo matriz de puntos, véase Figura 29, donde fueron incluidos los módulos componentes de este subsistema, componentes electrónicos pasivos requeridos como resistencias y, conectores para placas como: headers, borneras y adaptadores de cable tipo RJ11, véase Figura 30; para recibir y adaptar las líneas de conexión de los elementos de los otros subsistemas (sensores y alimentación energética), los módulos mencionados anteriormente y el sensor de presión barométrica. A continuación, de acuerdo al plano de circuito electrónico, se realizaron todas las conexiones necesarias en la placa de circuito mediante cables del calibre #16 como mínimo y pistas conductoras compuestas de soldadura de estaño y plomo en la cara opuesta de la placa.



Figura 30: Conectores adaptadores para protoboard: roseta RJ11, header hembra y bornera de dos hilos.

Finalmente, la placa de circuito electrónico fue colocada dentro de un contenedor hermético para evitar el ingreso de agentes externos perjudiciales como el polvo, la lluvia,

la humedad, la radiación solar directa, bichos, entre otros; ya que la presencia de cualquiera de ellos podría deteriorar el circuito principal y causar errores a nivel de hardware, el contenedor seleccionado fue una caja de pase eléctrica de PVC, al que se le perforaron algunos puntos para el paso de los cables conductores y se le incluyó una estructura para poder montarse a una columna o un mástil de soporte. El módulo de visualización, a excepción de los demás módulos que componen este subsistema, fue colocado en la tapa de dicha caja de tal forma que el usuario pueda observar dicho elemento directamente e *in situ*.



Figura 31: Caja de pase eléctrica de PVC con tapa de 200x200x80 mm.

3.6.4. Subsistema de medición de presión

El motivo por el que este subsistema se aisló de los demás se debe a que es un sensor que no requirió de alguna protección especial o posición que condicione sus medidas, ya que los cambios en la medida de la presión atmosférica son mínimos ante variaciones de altura relativas a la altura de una estación meteorológica automática. Luego, este módulo fue ubicado en el mismo espacio físico que el microcontrolador, en otras palabras, dentro de la placa de la unidad central de procesamiento, por los siguientes motivos: primero, generalmente los módulos para la medición de presión barométrica, como los descritos en la sección 2.5.2, poseen conexión directa y sencilla con el microcontrolador, y segundo, debido a que son módulos electrónicos que deben estar protegidos ante la intemperie para evitar ser dañados y dicho subsistema se encontrará protegido.

3.6.5. Subsistema de alimentación y regulación energética

En la Figura 32, se muestra el esquema de conexiones de los componentes de este subsistema, el cual es el encargado de proveer de la energía eléctrica que requieren todos los módulos, sensores y el microcontrolador para que el sistema funcione sin necesidad de una fuente externa limitada o que deba ser conectada a la red; es decir, que funcione de manera autónoma, constante y con la capacidad de regular la energía para evitar sobrecargas o daños a los dispositivos.

El panel solar seleccionado fue unido a una estructura de soporte que le permita tener un ángulo de inclinación con respecto a la superficie horizontal y además pueda montarse sobre un poste o alguna otra estructura de soporte vertical.

La batería de carga solar y el regulador de carga se ubicaron dentro de una caja de pase de PVC, véase Figura 31, ya que de la misma manera que la placa central de circuito, esta también debe ser protegida rigurosamente ante agentes externos, sobre todo por la naturaleza química de la batería solar. Además, se le incorporó una estructura de soporte que le permitió montarse a un soporte vertical y de esa manera se encuentre lo más cerca posible al panel solar para evitar pérdidas por resistencia de conductores eléctricos.

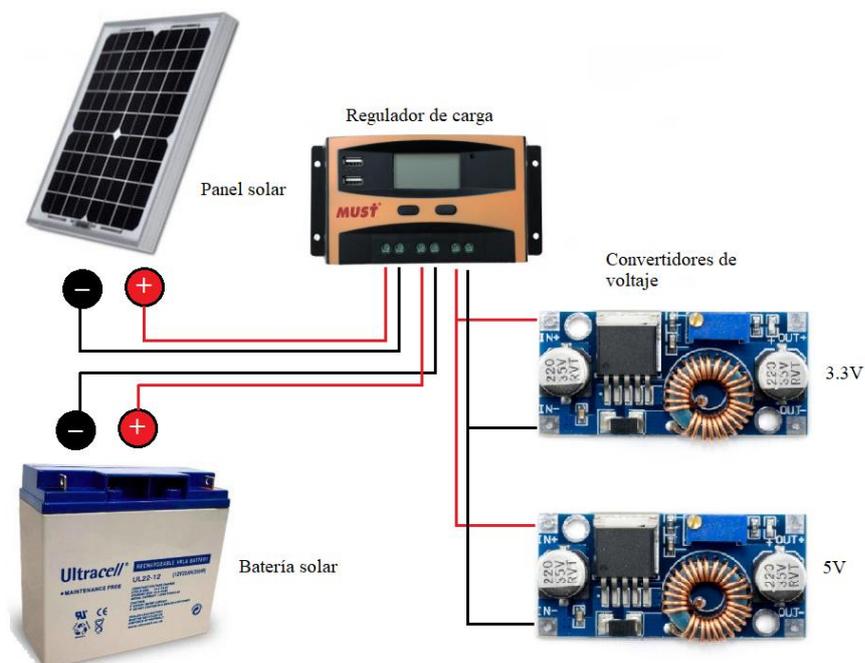


Figura 32: Esquema del sistema fotovoltaico.

Finalmente, los convertidores de voltaje seleccionados fueron ubicados en la placa de circuito principal, mediante el uso de conectores tipo headers y sus líneas de conexión se generaron con pistas de conducción de soldadura de plomo, mientras que la línea de voltaje principal proveniente del regulador de carga se conectó a la placa mediante una bornera y se repartió de manera paralela a los convertidores.

3.6.6. Estructura de soporte general

Como aspecto físico final del diseño definitivo y con la finalidad de garantizar las consideraciones planteadas en el apartado 3.3 en cuanto a portabilidad y estructura, se planteó el uso de una estructura metálica como soporte y anclaje para todos los componentes del prototipo a las alturas y posiciones correspondientes según las condiciones de emplazamiento, instalación y exposición; dicha estructura fue un trípode de montaje para estación meteorológica con un mástil de suficiente altura para montar todos los componentes de todos los subsistemas mencionados anteriormente, véase Figura 33.

Finalmente, cada subsistema fue acoplado a la estructura metálica de soporte mediante elementos de sujeción y anclaje como abrazaderas metálicas sinfín o en caso que los componentes cuenten con un elemento de anclaje o soporte, solo fue necesario su adecuada instalación.



Figura 33: Trípode de montaje de estación meteorológica de la marca Davis Instruments.

Fuente: Davis Instruments (2022a)

3.6.7. Costo del prototipo

Luego de haber finalizado con el diseño físico definitivo del prototipo, se procedió a recolectar la información acerca de los costos de los componentes utilizados en el prototipo para determinar un costo referencial del mismo, teniendo en cuenta que los elementos se subdividen en electrónicos, del sistema fotovoltaico, eléctrico y estructurales; donde en los primeros se incluyen todos los sensores y módulos seleccionados, los segundos incluyen los elementos del subsistema de alimentación y regulación energética, los terceros a todos aquellos elementos eléctricos complementarios que se utilizaron para lograr la conexión e interacción eléctrica de todos los componentes anteriormente mencionados y finalmente, los cuartos son todos aquellos elementos que permiten emplazar todos los elementos en sus posiciones y garantizar la estabilidad del equipo con estructuras fijas y elementos de sujeción y soporte.

3.7. Programación del microcontrolador

El microcontrolador fue programado mediante el IDE Arduino, software para computadora en el cual se escribieron todos los códigos y algoritmos necesarios para poder ejecutar las funciones de adquisición de datos de los sensores y el módulo de reloj, almacenamiento de estos en la memoria externa y su transmisión a través de un visualizador local y de la red. El programa escrito fue grabado en la memoria disponible del microcontrolador del Arduino MKR WiFi 1010 a través de un cable USB tipo micro B a USB que se conectará al ordenador. Los códigos desarrollados y plasmados en el software fueron escritos utilizando la sintaxis del lenguaje de programación C/C++.

Como se mencionó en la sección 2.7.2, el software Arduino IDE está basado en tres componentes principales, la sección de declaración global de variables, clases u objetos, constantes y funciones definidas por el usuario, la sección de la función por defecto “void setup” y la sección de la función por defecto “void loop”. Para la programación mediante la escritura del programa fuente se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

Primero, en la sección de declaración de variables globales se inicializaron y declararon todas las variables y constantes necesarias para el funcionamiento del programa tales como:

- Macros o constantes, que son grupos de tres elementos, donde el primero es una directiva precedida por el símbolo “#”, seguido por un identificador o nombre y, finalmente su valor; de tal forma que cuando dicho identificador sea colocado en cualquier parte del código, aquel será reemplazado por su valor definido al inicio al momento de la compilación y ejecución del programa.
- Librerías, las cuales son un mecanismo de inclusión de códigos o colección de funciones sin necesidad de escribirlos en el programa principal. El software Arduino IDE cuenta con una serie de librerías instaladas por defecto y también es posible descargar otras a través de internet, los cuales son necesarios para permitir la compatibilidad y funcionalidad de sensores y módulos utilizados en el proyecto y que se comunicarán con el microcontrolador.
- Objetos, los cuales son entes digitales que generalmente están incluidos en librerías o algunos están por defecto en el software, los cuales poseen características representadas por variables o constantes y funciones especiales.
- Variables globales, los cuales constan de un identificador o nombre y un valor que puede ser modificado en el transcurso de la ejecución del programa, estos pueden ser variables para las operaciones matemáticas requeridas, variables de apoyo y control de tiempo, variables estructurales que contienen un grupo de variables en su interior, entre otros.

Luego, en la función “void setup”, se establecieron los tipos de conexiones de los pines de la placa Arduino a los que se conectaron los sensores y módulos, las funciones de inicialización para aquellos componentes, la comprobación de la operatividad de algunos de ellos, garantizar la conexión a la red inalámbrica y establecer los temporizadores para la lectura, promedio y transmisión de la data adquirida a los medios de visualización y almacenamiento.

A continuación, en la función “void loop” se implementó el algoritmo para la lectura de los datos correspondientes a las variables agrometeorológicas, de tal manera que se pudieron obtener lecturas de los sensores y del módulo de reloj de tiempo real, con una frecuencia de 10 segundos para posteriormente calcular un valor representativo en intervalos de 1 minuto, dicho valor corresponde al promedio de datos para todas las variables de interés a excepción de la evapotranspiración, cuyo valor representativo es la suma de las lecturas en

dicho periodo, y la dirección del viento, cuyo valor es el valor instantáneo o correspondiente a la última lectura en dicho periodo. Posteriormente, se incluyó en el código, el algoritmo que permite: el almacenamiento y registro de la información en el dispositivo datalogger, la visualización de datos a través de un visualizador local y la transmisión de la información a la red inalámbrica y a su vez a la plataforma Blynk.

Finalmente, se escribieron los códigos correspondientes a las funciones definidas por el usuario, que consistieron en la obtención de los valores numéricos de las variables de interés desde los sensores, procesamiento de dichos valores para generar valores concordantes a la resolución y unidades de las variables, comprobación del funcionamiento de los sensores y módulos que se utilizaron al inicio del programa y algunas funciones necesarias durante el programa como advertencias, registro de datos, comprobación de la conexión, transmisión a la red.

3.8. Calibración de los sensores

Se realizó la calibración de los sensores de temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento y radiación solar, mediante el método de comparación entre los datos obtenidos por el prototipo respecto a datos obtenidos de instrumentos patrones que conforman una estación meteorológica automática calibrada.

El prototipo registró la información de las variables en intervalos de un minuto, los cuales fueron almacenados en la tarjeta de memoria extraíble del módulo datalogger y también fueron cargados a la nube mediante la plataforma Blynk, por lo que fue posible acceder a los datos por ambos medios en formatos digitales como “txt” o “csv”. Luego, la estación de referencia escogida fue la EMA marca Davis Instruments modelo Vantage Pro2 ubicada en la misma zona de instalación del prototipo, la cual registró información de las variables de interés en periodos de 15 minutos, obtenidos a partir de la descarga virtual desde el portal web especificado por la empresa Davis Instruments (<https://www.weatherlink.com>) y con el usuario y contraseña provistos por dicha empresa.

El método de calibración considerado consistió en la comparación estadística de los datos de todas las variables del prototipo con respecto a los datos de la estación de referencia

para un periodo de tiempo común de un mes, en el cual se determinaron modelos de regresión lineal que ajustaron cada una de las variables observadas por el prototipo, considerándolas como variables independientes, a una línea recta simétrica. Se obtuvieron indicadores como: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y la función de calibración que incluía los coeficientes de la ecuación de la recta y la intersección de esta con el eje de las ordenadas. Además, se realizaron gráficos para la visualización de la información, tales como: gráficos de dispersión con el ajuste a un modelo de regresión lineal simple y gráficos de series de tiempo para cada grupo de variables evaluadas.

Para ello se desarrolló un programa escrito en lenguaje Python que fue capaz de tratar la información agrometeorológica tanto del prototipo como de la estación de referencia. De manera específica dicho programa permitió lo mencionado a continuación:

- Resumir la información del prototipo a periodos de 15 minutos con la finalidad de ponerla en las mismas condiciones temporales que la estación de referencia, además de verificar que ambos registros se encuentren dentro de un mismo rango de tiempo de medición.
- Detectar los valores faltantes o incoherentes por posibles fallas o pérdidas de energía en ambos equipos, con el fin de considerarlos como valores nulos en el registro de tiempo correspondiente para ambos equipos.
- Calcular los parámetros estadísticos y realizar los gráficos considerados, todo ello para cada variable evaluada.

Finalmente, se presenta las consideraciones específicas para cada variable de interés al momento de realizar la calibración.

3.8.1. Sensor de temperatura y humedad relativa

Debido a que los sensores de temperatura y humedad relativa fueron ubicados dentro de un encapsulado, y este a su vez, dentro de un abrigo meteorológico, se planteó la hipótesis de que exista algún sesgo o desviación en los valores obtenidos, por ello fue necesario calibrarlo con la estación de referencia mediante el ajuste a un modelo de regresión lineal

simple. Adicionalmente, la información de estas variables fue resumida calculando el promedio de datos de periodos de un minuto dentro de cada periodo de 15 minutos y el análisis estadístico se realizó para cada variable de manera independiente.

3.8.2. Sensor de presión barométrica

El sensor de presión escogido fue uno que se encontraba calibrado desde fábrica debido a que presenta indicadores métricos de fiabilidad como la exactitud y la resolución, sin embargo, de la misma manera que el sensor de temperatura y humedad relativa, se calibró comparándolo con los datos de presión barométrica de la estación de referencia para compensar cualquier variación causada por la diferencia de posición vertical u horizontal del sensor. De la misma manera que se hizo para los sensores de temperatura y humedad, el resumen de datos a periodos de 15 minutos será calculado a través del promedio de los datos involucrados en dicho periodo.

3.8.3. Sensor de velocidad del viento

La variable de velocidad del viento es un parámetro que no disponía con laboratorios nacionales que certifiquen su calibración, por ello, se procedió a realizar dicha actividad mediante la comparación de los valores de velocidad del viento generados por el anemómetro del prototipo a partir del promedio de valores para determinados periodos de tiempo, tomando como factor de velocidad unitaria el indicado en la hoja de datos del sensor seleccionado, con respecto a los valores proporcionados por la estación de referencia para los mismos periodos. De la misma manera que se hizo para los sensores mencionados anteriormente, el resumen de datos a periodos de 15 minutos fue calculado a través del promedio de los datos involucrados en dicho periodo.

3.8.4. Sensores de radiación solar

Para la medición de la variable de radiación solar, se hizo uso de más de un sensor, cuyas hojas de datos no presentan valores de exactitud, pero cuenta con referencias bibliográfica de respaldo que prueban su adecuado desempeño, sin embargo, siendo este otro tipo de clima, el desempeño de las variables obtenidas por estos sensores fue verificado mediante métodos de comparación con respecto al sensor de radiación solar de la estación de referencia.

Asimismo, ya que se cuenta con más de un sensor y, por ende, con más de una variable correspondiente a la radiación solar, la calibración de esta variable se determinó a partir de la determinación de un modelo de regresión lineal múltiple que contó con múltiples variables independientes provistas por los sensores considerados, las cuales corresponden a diferentes rangos del espectro electromagnético de la radiación solar y se planteó la hipótesis de que en conjunto podrían estimar el valor de radiación solar como tal de manera más precisa que individualmente, y una variable dependiente correspondiente a las observaciones de la estación de referencia.

De la misma manera que los sensores mencionados anteriormente, cada variable registrada de los sensores seleccionados fueron resumidos a periodos de 15 minutos mediante el promedio de datos de un minuto incluidos en dichos periodos.

3.8.5. Sensor de dirección del viento

La hoja de datos del sensor de dirección de viento proporcionó una serie de valores de resistencia eléctrica asignados a cada uno de los 16 puntos cardinales disponibles, los cuales fueron verificados mediante la medición de resistencia en su placa de circuito impreso. Este módulo, a diferencia del resto, se calibró mediante un método manual que consistió en el registro de los valores analógicos a medida que se orientaba la veleta manualmente a cada punto cardinal y se mantenía estática por aproximadamente un minuto para luego ser girado a su posición consecutiva en sentido antihorario desde el norte magnético. Luego, dichos valores fueron almacenados en el módulo datalogger del prototipo para que posteriormente se analicen mediante la determinación de medidas de dispersión y tendencia central. Este análisis permitió conocer cuáles serían los valores analógicos correspondientes a cada posición de la veleta considerando el algoritmo de medición de la dirección del viento, el cual consiste en un bucle que itera cada uno de dichos valores hasta encontrar aquel que sea inmediatamente superior al registrado por el sensor. Por ello, se escogió el valor referencial que se utilizará en el programa del prototipo para cada punto cardinal tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Ser mayor a medidas de tendencia central del grupo de datos tomados como: media, mediana, moda y al tercer cuartil.

- Ser menor al valor máximo del grupo de datos, a excepción del valor que se encuentre más próximo a 255, por ser este el límite de la resolución considerada de 8 bits.
- Ser menor al valor mínimo del grupo de datos de la posición de la veleta con valor promedio inmediatamente superior al evaluado, no obstante, puede considerarse mayor a dicho valor siempre y cuando aquel sea considerado como un valor extremo inferior.

Los valores de esta variable, a diferencia del resto, fueron resumidos escogiendo el último valor del grupo de registros tomados cada 1 minuto dentro del periodo de 15 minutos, en otras palabras, el valor escogido fue aquel que correspondía a la medición en intervalos de 15 minutos.

3.9. Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia

3.9.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

Luego de calibrar cada uno de los sensores, se procedió a calcular la evapotranspiración potencial haciendo uso de la Ecuación (2) presentada en la sección 2.4 mediante la inclusión de dicha fórmula en la memoria del microcontrolador acoplándolo al programa, no obstante, debido a que el prototipo calculó las variables agrometeorológicas en periodos de un minuto, dicha ecuación fue modificada, de acuerdo a lo planteado por la FAO. El procedimiento se describe con mayor detalle a continuación. (Allen et al., 2006)

Primero, se definieron las constantes utilizadas para el cálculo de los parámetros que intervienen en la determinación de la evapotranspiración potencial, tales como: la latitud de instalación en radianes (LATITUD), la longitud de instalación en grados sexagesimales (LONGITUD), la elevación a la que se encuentra la estación en m.s.n.m. (ELEVACIÓN) y la altura de medición del anemómetro con respecto a la superficie en metros ($ALTURA_{ANEM}$) y la frecuencia de toma de datos en minutos (PERIODO).

Luego se procedió con los cálculos de todos los parámetros requeridos para la determinación de la evapotranspiración para periodos de toma de datos menores a una hora, utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 22 del ANEXO 1.

A continuación, se modificó la fórmula original de la Ecuación (2) tal como se aprecia en la Ecuación (4), la cual es la fórmula para el cálculo de la evapotranspiración de referencia para periodos horarios. Sin embargo, dicha fórmula también aplica para periodos menores como aquellos de un minuto registrados por el prototipo, pero para determinar el valor real de la evapotranspiración del cultivo de referencia en el periodo definido, se debió continuar con la Ecuación (5).

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{37}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e^o(T) - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (4)$$

$$ET_{o,min} = \frac{ET_o}{\left(\frac{60}{PERIODO}\right)} \quad (5)$$

Donde:

$ET_{o,min}$: evapotranspiración de referencia para periodos de un minuto (mm minuto^{-1}).

Finalmente, esta secuencia de cálculo fue resumida en un diagrama de flujo, el cual posteriormente fue traducido en términos de lenguajes de programación en C/C++ para la programación del microcontrolador Arduino del prototipo.

3.9.2. Comparación de la variable de evapotranspiración

Esta variable fue calibrada mediante el método de comparación debido principalmente a la ausencia de instrumentos y laboratorios de calibración para dicho parámetro y en los periodos horarios requeridos.

Primero, el valor de evapotranspiración calculado a partir del algoritmo desarrollado en el apartado anterior fue verificado a través de un gráfico comparativo y métricas de dispersión como: R^2 , RMSE, pendiente de la curva e intersección al eje; entre la suma horaria de datos de evapotranspiración calculados por el método de Penman-Monteith de la

FAO para periodos de 15 minutos con la información climática de la estación de referencia, como variable independiente, y los datos observados de ET_0 registrados por la misma estación en periodos horarios como variable dependiente; todo ello para verificar si era necesario la aplicación de una función de calibración al método.

Luego, se determinó el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia con los parámetros del prototipo mediante su cálculo en gabinete, con el algoritmo desarrollado en el apartado anterior y la función de calibración determinada, en caso de ser necesario, y se comparó con la información registrada por la estación de referencia determinando el grado de correlación obtenido (R^2), el error (RMSE) y la función de calibración; todo ello mediante un modelo de regresión lineal simple. Adicionalmente, los valores de evapotranspiración calculados fueron resumidos a periodos horarios mediante la suma de todos los valores registrados en periodos menores y que se encontraban incluidos en aquellos, con la finalidad de poder comparar en igualdad de condiciones con los valores de referencia.

Finalmente, los valores de evapotranspiración del cultivo de referencia se calcularon para periodos diarios mediante la suma de los datos que estaban comprendidos dentro de dichos periodos, por lo que el prototipo determinó dichos valores a partir de periodos de 15 minutos y la estación de referencia, en periodos horarios; para luego ser comparados mediante un gráfico de regresión lineal simple y evaluar el valor de R^2 y RMSE.

3.10. Validación de datos

Se realizó la validación de los sensores de temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento, radiación solar y evapotranspiración; mediante la comparación de los datos registrados por el prototipo con los datos obtenidos por la misma estación de referencia utilizada en la fase de calibración.

La obtención de datos se realizó de la misma forma que en la fase de calibración, véase apartado 3.8, tanto para el prototipo de estación agrometeorológica como para la estación de referencia Davis Vantage Pro2. No obstante, el programa utilizado en el prototipo fue

modificado de tal forma que para el cálculo de cada variable se incluyó la función de calibración determinada anteriormente.

Luego, los datos obtenidos por el prototipo fueron descritos y resumidos a través de medidas de dispersión y tendencia central para el conjunto de datos obtenidos, tales como: la media, la desviación estándar, el valor mínimo, el primer cuartil, la mediana o segundo cuartil, el tercer cuartil, y el valor máximo; esto para el conjunto de datos registrados por el prototipo en periodos de un minuto, el cual fue el periodo de registro inicial. Posteriormente, también fueron descritos los datos resumidos y procesados en gabinete en periodos de 15 minutos para todas las variables, con excepción de la evapotranspiración que fue resumida a periodos de 1 hora, ya que dichos periodos son con los mismos para la estación de referencia.

Adicionalmente, el método de validación empleado consistió en la comparación estadística de datos obtenidos por el prototipo y los observados por la estación de referencia para un periodo de una semana aproximadamente. Se determinaron gráficos de dispersión de datos con los registros observados por el prototipo como variable independiente en el eje de las abscisas y los registros observados por la estación de referencia como variable dependiente en el eje de las ordenadas, de forma idéntica a como se realizó en la fase de calibración, sin embargo, se determinaron indicadores estadísticos para el análisis de los conjuntos de datos comparados, los cuales se indican en la Tabla 8, con sus respectivas fórmulas para su determinación y teniendo en consideración que “O” hace referencia a los datos observados por la estación de referencia y “P”, a los valores predichos u observados por el prototipo con los factores de calibración.

De manera similar que en la fase de calibración, para esta fase se utilizó un programa desarrollado en lenguaje Python para tratar la información agrometeorológica de las siguientes formas: los datos observados por el prototipo para cada variable en periodos de 1 minuto se resumieron a rangos de tiempo de medición iguales a sus análogos observados por la estación de referencia, se detectaron y eliminaron los datos faltantes o incoherentes detectados en el conjunto de datos, se realizaron los gráficos de dispersión y de series temporales y finalmente, se calculó los indicadores estadísticos.

A continuación, se procedió a organizar los indicadores estadísticos calculados para cada variable de manera ordinal, es decir de mayor a menor valor, con la finalidad de certificar si los modelos de validación fueron adecuados o no en términos de correlación, correspondencia, linealidad y grados de error.

Tabla 8: Ecuaciones de los indicadores estadísticos utilizados en la fase de validación

Indicador estadístico	Ecuación
Coeficiente de determinación	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (6)$
Índice de concordancia o Willmott	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$
Índice de Nash-Sutcliffe	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (9)$
Máximo error	$ME = \max(O_i - P_i)_{i=1}^n \quad (10)$
Error absoluto medio	$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (11)$
Gradiente de la recta de tendencia	$m = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (12)$
Intersección de la recta de tendencia	$b = \bar{O} - m * \bar{P} \quad (13)$

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se analizó cada variable por individual de acuerdo a sus indicadores estadísticos obtenidos y sus gráficos correspondientes, ello incluye también la comparación de los errores obtenidos con las exactitudes requeridas en la Tabla 6. Es importante mencionar que para las variables de radiación solar y evapotranspiración fue necesario hacer un resumen de datos a escala diaria para poder realizar la comparación del error obtenido.

3.11. Desarrollo de la base de datos

La base de datos es el archivo informático o digital que contiene la información agrometeorológica que el prototipo registró y continuará haciéndolo en adelante, desde el momento en que se instaló hasta que se decida detenerlo o realizar algún mantenimiento.

Para ello, se dispuso en el prototipo el módulo datalogger que consiste en el módulo de memoria externa microSD conectado al microcontrolador, el cual empezó a almacenar la información generada en una memoria extraíble de tipo microSD mediante un archivo de texto creado en el proceso de funcionamiento del prototipo. Se escogió un archivo de texto con extensión “.txt” debido a que es el formato más sencillo de visualizar y manipular a través de diferentes programas informáticos de edición de texto, de manejo de tablas e incluso lenguajes de programación para la manipulación de la información y proceso de datos.

La estructura del archivo que contiene la información se desarrolló de tal manera que se mantenga ordenada en una matriz, cuyas columnas separen las diferentes variables observadas por el prototipo y sus filas independicen cada registro por fecha y hora. Dicha estructura se logró a través de tres pasos: el primero consistió en definir una constante para el programa del microcontrolador, el cual almacena una cadena de texto correspondiente al encabezado, que a su vez consiste en una serie de títulos para cada variable y separados por comas, empezando desde la variable de fecha y hora y cuyo último carácter sea un salto de línea para continuar con el primer registro del prototipo; el segundo, en captar y procesar la información generada por los sensores, de tal manera que cada registro de cada variable estuviese separado por comas, en el orden correspondiente a cada título del encabezado, finalizado por un carácter de salto de línea y, que toda la información generada para dicha fila fuese para un periodo en concreto; y tercero, en realizar el anterior paso en bucle para cada registro en el intervalo preestablecido.

Finalmente se manipuló un fragmento de la información generada en el software de manejo de tablas Microsoft Excel, a través de su función de conversión de un archivo de texto separado por comas en columnas.

3.12. Desarrollo de la interface de visualización

Con la finalidad de tener a disposición la información agrometeorológica registrada por el prototipo en tiempo real, se desarrolló una interface de visualización virtual o digital que sea compatible con el microcontrolador utilizado. La plataforma utilizada para desarrollar dicha interface se denomina Blynk, la cual a su vez cuenta con un aplicativo que se puede instalar en dispositivos móviles desde los cuales se puede observar la información en tiempo real con ayuda de redes inalámbricas como el WiFi. Para lograr ello se realizaron las siguientes acciones:

- El aplicativo Blynk se descargó desde la web y se instaló en un dispositivo móvil según se indica en las guías disponibles en su página web oficial, y luego se creó una cuenta con un correo electrónico seleccionado.
- Se creó un nuevo proyecto, se personalizó a la preferencia del usuario y se asoció a un dispositivo compatible, el cual fue el Arduino MKR WiFi 1010; con la finalidad de contar con un autenticador del proyecto, el cual sería incluido posteriormente en el programa del prototipo.
- Se crearon cinco ventanas independientes, cada uno correspondiente a un sensor o módulo utilizado en el prototipo y cuya información será registrada por el microcontrolador.
- En cada ventana se incluyó herramientas de visualización de la información actualizada en tiempo real de la variable correspondiente y de visualización de series de tiempo, todo ello para cada variable registrada.

Finalmente, para contar con la información observada por el prototipo, se implementaron las funciones de inclusión de herramientas del aplicativo Blynk y una función de transmisión de datos por dicho medio en el código de programación principal, véase ANEXO 4, el cual permitió captar los valores procesados por el microcontrolador a partir de los sensores y enviarlos a través de un canal virtual diferente para cada variable utilizada, que a su vez estuvo operando mediante una red inalámbrica, en este caso la red seleccionada fue una red WiFi.

3.13. Manual de instalación, operación y mantenimiento

Se elaboró un manual de instalación, operación y mantenimiento del equipo con la finalidad de preservar su funcionalidad a largo plazo y además pueda demostrar su rentabilidad en la agricultura. Se compone de los siguientes ítems:

- Aspectos de seguridad referentes a los accidentes o riesgos más frecuentes y evidentes.
- Datos generales, características y especificaciones de cada uno de los elementos que componen al equipo y del mismo en general.
- Verificación del emplazamiento, es decir, las características de la zona para una adecuada instalación.
- Pasos para el ensamblaje del prototipo y su implementación.
- Esquema y plano de conexiones del prototipo.
- Operación del equipo para la extracción de información.
- Mantenimiento del equipo, principalmente el desensamblaje y la limpieza del mismo.
- Verificación de la funcionalidad en el aspecto eléctrico y electrónico de los módulos utilizados.
- Códigos de programación de cada uno de los sensores que serán escritos a través del IDE de Arduino.
- Métodos de calibración.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Ubicación del proyecto

El prototipo se ubicó en el lugar descrito en la sección 3.1, es decir, dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Luego, la zona específica de instalación se encuentra dentro de un área de aproximadamente 16 m², perteneciente al área experimental de riego y drenaje del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola. Dicho espacio, como se puede apreciar en la Figura 34, cuenta con las características de emplazamiento requeridas para el prototipo, ya que se pueden observar las siguientes características:



Figura 34: Ubicación del del prototipo y de las estaciones automáticas de referencia

- La zona representa al área agrícola experimental que existe alrededor y su microclima.
- No existen interferencias que alteren significativamente el microclima de dicha zona.

- Se encuentra sobre una superficie nivelada de grass americano, el cual representa al cultivo hipotético para el cálculo de la evapotranspiración.
- Permite orientar y reubicar el prototipo dentro de dicha zona en caso se requiera.
- Estando dentro del campus universitario, se cuentan con redes eléctricas y redes WiFi en un radio menor a 30 metros.
- Cuenta con estaciones de referencia instaladas en dicha área, como la Davis Vantage Pro2.
- Se encuentra protegida por un cerco perimetral que impide el acceso libre y no interfiere en las mediciones agroclimáticas.

4.2. Componentes electrónicos del prototipo

En este apartado se muestran los elementos que fueron seleccionados para componer el prototipo y que este cumpla las funciones requeridas para simular una estación agrometeorológica automática.

4.2.1. Sensores

En la Tabla 9 se muestran los sensores utilizados para el desarrollo del prototipo y las variables que cada uno es capaz de medir, ya que algunos de ellos reaccionan ante más de una variable como el sensor SHT31 que mide la temperatura y humedad relativa del aire; el módulo Weather Meter, la velocidad y dirección del viento; y el sensor SI1145 que mide la variable de radiación en tres rangos del espectro electromagnético. Además, se muestran los protocolos de comunicación que requieren cada uno para conectarse con un microcontrolador y transmitirle la información; esto determinará las líneas de conexión utilizadas al momento de realizar la arquitectura electrónica. Asimismo, se muestran los costos de adquisición de los sensores, los cuales fueron extraídos de tiendas comerciales especializadas en electrónica y están sujetos a fluctuaciones que dependen de la demanda del producto (Naylamp Mechatronics, 2021k, 2021j, 2021h; Seeed Technology Co., 2021; SparkFun Electronics, s/f).

Tabla 9: Sensores seleccionados para la medición de las variables de interés

Sensor	Variable	Protocolo de comunicación	Costo de adquisición	Exactitud
SHT31	Temperatura del aire	I2C	S/ 40.00	± 0.3 °C
	Humedad relativa del aire	I2C		± 2 %
BME280	Presión barométrica	I2C o SPI	S/ 50.00	± 1.0 hPa
Weather Meter	Velocidad del viento	Interrupciones digitales	S/ 320.00	Por determinar
	Dirección del viento	Analógico		$< \pm 22.5^\circ$
Grove-SI1145	Radiación solar (Espectros visible, infrarrojo y ultravioleta)	I2C	S/ 52.00	Por determinar
ML8511	Radiación solar (Espectro ultravioleta)	Analógico	S/ 35.00	Por determinar

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los sensores seleccionados registran las variables agrometeorológicas consideradas en el apartado 3.2, de tal forma que el desempeño de cada sensor, respaldados por sus características descritas en el apartado 2.5.2 o referencias de otras investigaciones, cumplen con las características operacionales sugeridas por instancias como el SENAMHI y la OMM, caracterizando al prototipo como una estación meteorológica agrícola principal con observaciones de carácter meteorológico, no obstante, no todas las variables de este tipo de estaciones fueron consideradas, principalmente por el motivo de que no intervienen en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia por el método de FAO Penman-Monteith como la altura de la capa freática, la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la precipitación; o en su defecto se puede prescindir de algunos como la temperatura del suelo a diferentes niveles, insolación o registro de hidrometeoros, ya que pueden ser estimados a partir de las variables ya consideradas. Es importante mencionar que la variable de precipitación no interviene en el valor de la evapotranspiración, pero si es un componente importante en el balance hídrico para aplicaciones agrícolas, no obstante, fue obviada por presentar registros poco significativos o iguales a cero en todo el año para

la zona específica de instalación ubicada en la UNALM, por lo que su evaluación estadística tampoco sería significativa ni representativa (Allen et al., 2006; Organización Meteorológica Mundial, 2010; Protocolo Para La Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas, 2013).

4.2.2. Módulos y periféricos

Estos dispositivos fueron instalados para cumplir las funciones descritas en la Tabla 10, aquellos dispositivos fueron escogidos debido a su comprobado desempeño en otros proyectos o referencias bibliográficas como se puede revisar en el apartado 2.5.3, además se puede apreciar el protocolo de comunicación bajo los cuales estos módulos operan y se conectan a un microcontrolador para intercambiar la información según se requiera.

Finalmente, se detallan los costos de adquisición de los periféricos en tiendas comerciales, los cuales son bajos y, aunque pueden estar sujetos a variaciones en el mercado por la demanda de los productos, el costo es considerablemente alcanzable (Naylamp Mechatronics, 2021g, 2021d, 2021c).

Tabla 10: Módulos y periférico seleccionados para control de funciones del prototipo

Módulo o periférico	Función	Protocolo de comunicación	Costo de adquisición
RTC DS3231	Gestión del tiempo en términos de fecha y hora	I2C o SPI	S/ 24.00
Adaptador de memoria externa microSD	Datalogger o almacenamiento de información (base de datos)	SPI	S/ 12.00
Display alfanumérico LCD 2004	Visualización local en tiempo real	I2C (requiere adaptador)	S/ 34.00

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Microcontrolador

De antemano fue considerado el uso de un microcontrolador de la familia Arduino para el desarrollo del prototipo, ya que este cuenta con costos considerablemente bajos en el mercado, facilidad de adquisición y, además, son comúnmente usados en proyectos de electrónica como se aprecia en los apartados □ y 2.5.1. En consecuencia, se optó por utilizar la placa Arduino MKR WiFi 1010, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 4 del apartado 2.5.1, ya que este mismo fue capaz de cumplir con las principales funciones requeridas como: adquisición de datos, ya que el microcontrolador compatibilizó con los sensores seleccionados mediante sus protocolos de comunicación y dispone de las librerías necesarias; procesamiento de datos, porque pudo ser programado a criterio del usuario y con diferentes tipos de tareas o cálculos a través del software Arduino IDE de la misma compañía fabricante; y transmisión de datos, debido a que fue capaz de conectarse a los módulos y periféricos seleccionados y además, se pudo conectar a una red inalámbrica WiFi y establecer conexión con la nube del aplicativo Blynk.

4.2.4. Fuente energética

Para la selección de los componentes de la fuente energética se desarrollaron cálculos para cada uno, cuyos resultados fueron aproximados a los valores más cercanos encontrados en las características de productos disponibles en el mercado.

a. Panel solar

Los principales resultados para la determinación del panel solar se aprecian en la Tabla 11, los cuales son la demanda y la oferta energética para el prototipo, en consideración a los elementos electrónicos considerados y la zona de instalación, los mismos que dan resultado a un cociente que, multiplicado por un factor de seguridad y considerando un solo panel para garantizar la portabilidad del prototipo, determina la potencia requerida del equipo, sin embargo, dicho valor no es uno comercial, por lo que se optó por redondear al valor inmediatamente superior disponible en el mercado, que corresponde a 20 watts, con ello se puede garantizar que el sistema cuente con suficiente suministro de energía ya que se sobreestima el valor de la potencia pico de diseño.

Adicionalmente, el voltaje de operación para dicho panel será de 12 voltios, dicho valor fue escogido porque es el valor mínimo de voltaje de operación con el que disponen los paneles solares comerciales y fácilmente accesibles.

Tabla 11: Resultados del cálculo para la selección del panel solar

Variable	Descripción	Valor	Unidad
E_{elec}	Consumo máximo diario de energía eléctrica o demanda energética	26.40	Watt-Hora/día
HSP	Horas solar pico (recurso u oferta solar)	2.33	Hora/día
Y	Factor del mes desfavorable	11.35	Watt
W_p	Potencia pico de diseño	12.49	Watt
$W_{p\ final}$	Potencia pico final	20	Watt

Fuente: Elaboración propia.

b. Batería solar

En la Tabla 12 se muestran los principales parámetros utilizados para la selección de la batería solar, el primero correspondiente al voltaje de operación tiene un valor de 12 voltios que es el mismo para todo el sistema, el número de días de autonomía fue seleccionado para garantizar la operatividad energética de la batería por esa cantidad de días y con dichos valores, la demanda energética seleccionada en el anterior apartado y la Ecuación (3); se determinó que la capacidad de trabajo de la batería es igual a 12.1 amperios-hora, valor que tuvo que ser llevado al superior más próximo correspondiente a las baterías solares encontradas en el mercado, tal valor es igual a 17 amperios-hora.

Tabla 12: Resultados del cálculo para la selección de la batería solar

Variable	Descripción	Valor	Unidad
V_{bat}	Voltaje nominal de la batería	12	Voltios
Nd	Número de días de autonomía	3	Día

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Ct	Capacidad de trabajo de diseño	12.1	Amperios- hora
C _t final	Capacidad de trabajo final	17	Amperios- hora

Fuente: Elaboración propia.

c. Regulador de carga

El regulador de carga requiere de un voltaje o tensión nominal y una corriente nominal, el primero fue determinado de tal manera que sea el mismo para todo el sistema, es decir, igual a 12 voltios, mientras que el segundo se determinó comparando la intensidad de corto circuito del panel seleccionado y la corriente de la demanda energética. Se estimó un valor de 200 mA como el valor que la batería proporciona al sistema para funcionar y se seleccionó un panel solar con un valor de 1.2 A de corriente de corto circuito, dichos valores aún multiplicados por el factor de seguridad no superan el valor de 10 A, el cual es el valor mínimo con el que cuentan los reguladores de carga disponibles en el mercado, por ello, este mismo fue el valor considerado para la selección de este elemento.

d. Módulos convertidores de voltaje

El módulo seleccionado para reducir el voltaje de entrada proveniente del sistema fotovoltaico fue el módulo convertidor de voltaje LM2596, ya que este tolera el voltaje de operación del sistema fotovoltaico igual a 12 V como voltaje de entrada, ya que el rango para el módulo está entre 4.5 V y 40 V y, además, el rango de voltajes de salida (1.23 V a 37 V) cubre los voltajes de operación de todos los componentes electrónicos seleccionados para el funcionamiento del prototipo (Naylamp Mechatronics, 2021a). Adicionalmente, el amperaje de tolerancia máximo de dicho módulo es igual a 3 A, el cual está sobre los 200 mA de valor estimado para la carga requerida por el sistema.

En la Tabla 13 se muestra la disposición de las cargas del sistema, en términos de voltaje, esto con la finalidad de crear dos líneas de voltaje fijas para todo el sistema y que cada uno de los módulos, sensores o el microcontrolador se encuentren energizados correctamente,

todo ello basado en sus hojas técnicas para evitar sobrecargas o deterioro de los mismos. Es importante considerar que algunos dispositivos se pudieron conectar a cualquiera de las dos líneas sin problema alguno.

Tabla 13: Disposición de los módulos y sensores de acuerdo a la carga que demandan

Dispositivos del sistema	5V	3.3V
Arduino MKR WiFi 1010	✓	
Sensor SHT31	✓	✓
Sensor BME280		✓
Módulo Weather Meter	✓	✓
Sensor SI1145	✓	✓
Sensor ML8511	✓	✓
Módulo RTC DS3231	✓	✓
Módulo adaptador microSD	✓	
Módulo display LCD 2004	✓	

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Arquitectura electrónica del prototipo

4.3.1. Esquemas de conexiones individuales

a. Módulo SHT31

Este módulo requirió de cuatro líneas, que se conectaron como se muestra en la Figura 35, utilizando el protocolo de comunicación I²C, en donde los cables verde y amarillo corresponden a las líneas SCL y SDA, respectivamente; mientras que los cables rojos y negros corresponden a las líneas de voltaje (3.3 voltios) y tierra (GND) respectivamente.

b. Sensor BME280

Se optó por conectar este sensor a través del protocolo I²C, el cual únicamente requiere de dos líneas de conexión para entablar comunicación entre dicho módulo y la placa que contiene el microcontrolador, estas son las líneas SCL y SDA, los cuales en la Figura 36 se muestran de color verde y amarillo respectivamente, mientras que la alimentación

corresponde a las líneas de color rojo y negro para voltaje (Vcc) y tierra (GND) respectivamente.

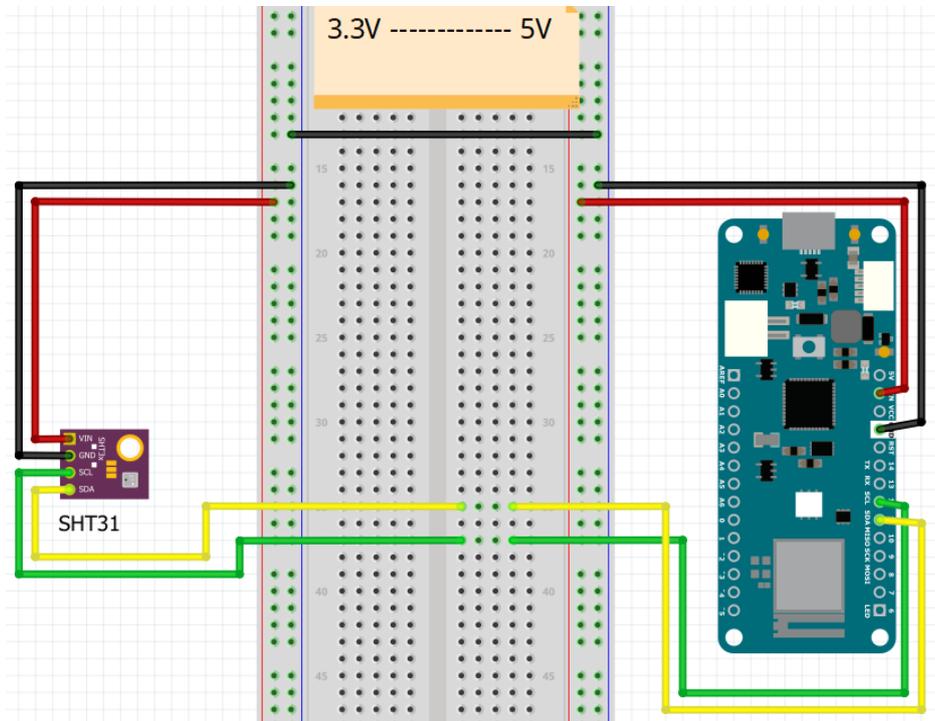


Figura 35: Esquemático en protoboard del módulo SHT31

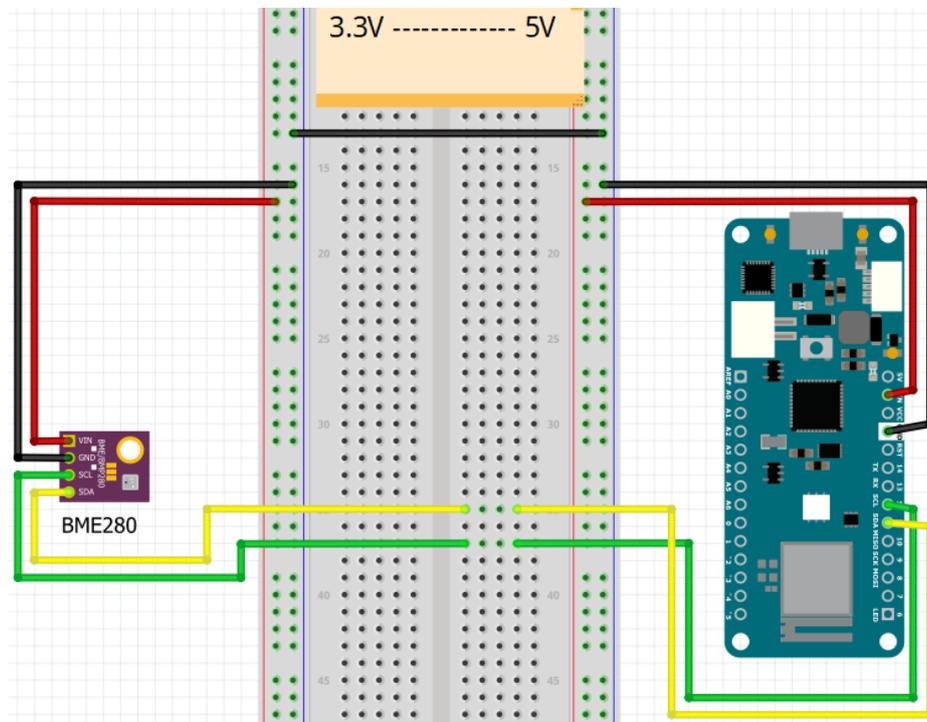


Figura 36: Esquemático en protoboard del sensor BMP280

c. Módulo Weather Meter

Este módulo posee tres sensores, de los cuales dos fueron utilizados para el desarrollo del prototipo y corresponden a la velocidad del viento y dirección del viento, los cuales tenían salidas del tipo RJ11, en otras palabras, cables de 4 hilos con un conector tipo telefónico.

En la Figura 37 se aprecia lo siguiente: primero, el arreglo octogonal corresponde a la placa interna de la veleta, que tiene dicha composición para que en cada orientación de la veleta permita el cierre del interruptor magnético normalmente abierto correspondiente y a su vez, cierre el contacto entre la línea de color verde (GND) y la línea de color negro, que corresponde al pin analógico número 5 (A5) y que está también conectada a una resistencia (cuyo valor es diferente entre cada uno), el cual también se conecta al otro extremo del mencionado interruptor; segundo se tiene un interruptor magnético individual que representa a la placa interna del anemómetro, donde un extremo se conecta a GND (cable rojo) y el otro, al pin digital número 4 (D4).

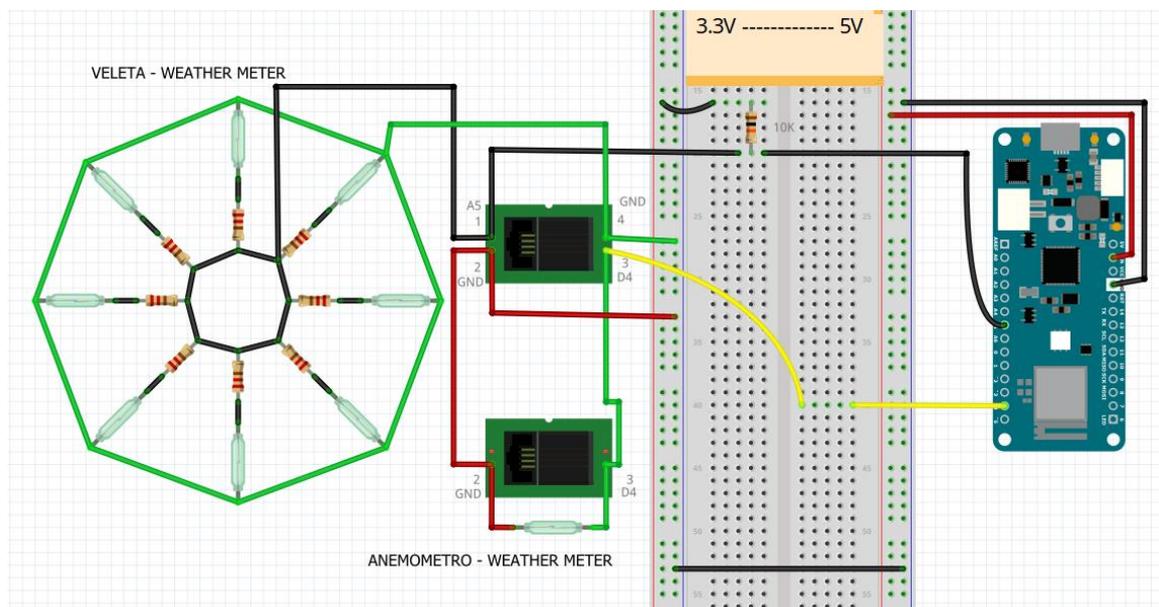


Figura 37: Esquemático en protoboard del módulo de velocidad y dirección de viento.

Adicionalmente es importante mencionar que el arreglo de la veleta requiere de una resistencia adicional con un valor igual a $10\text{ K}\Omega$ (kiloohmios) que sirve como divisor de voltaje conectándose por un lado a la línea de tensión positiva (3.3 V) y por otro, al pin analógico del microcontrolador y el cable de color negro de la placa de la veleta.

Finalmente, se muestran dos placas rectangulares que representan los cables del tipo RJ11, uno de ellos que conecta al sensor del anemómetro se conecta a la otra placa que conecta también con el sensor de la veleta, esto debido a que el módulo Weather Meter conecta primero el anemómetro con la veleta, y luego este último se conecta con un solo cable al microcontrolador llevando ambas señales.

d. Sensor ML8511

Se decidió conectar este sensor mediante protocolo de señales analógicas y además, cuenta con 5 pines de conexión, de los cuales solo 4 líneas se utilizan de la siguiente manera: el pin EN del sensor se conecta al pin 3V3 del mismo (rojo), esto garantiza que el sensor se encuentre en estado activo cuando se le suministre corriente; luego el pin OUT se conecta a través de la línea de color verde al pin analógico número 6 (A6) del microcontrolador; el pin GND se lleva a la línea de tierra (GND) con la línea de color negro; y finalmente, el pin 3V3 del sensor corresponde a la alimentación (3V3) del sistema a través de la línea de color rojo.

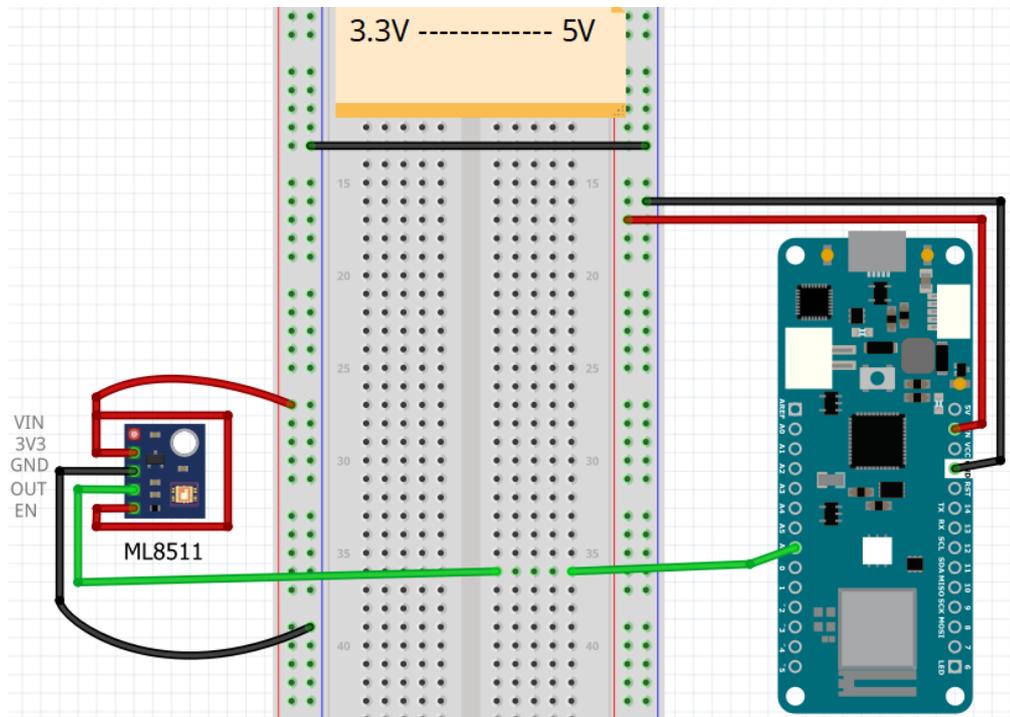


Figura 38: Esquemático en protoboard del sensor ML8511 del módulo piranómetro.

e. Sensor SI1145

Este sensor se conectó a través del protocolo I²C, el cual únicamente requiere de dos líneas de conexión para entablar comunicación entre dicho módulo y la placa que contiene el microcontrolador, sin embargo, debido a que la dirección de este sensor coincide con otro ya utilizado por el microcontrolador, no se utilizarán las líneas comunes SCL y SDA, sino los pines 0 y 1 del microcontrolador que crearan un nuevo puerto I²C, por ello se crean las líneas 1-SCL y 0-SDA, los cuales en la Figura 39 se muestran de color verde y amarillo respectivamente, y se conectan a los pines 1 y 0 del microcontrolador respectivamente, mientras que la alimentación corresponde a las líneas de color rojo y negro para voltaje (VCC) y tierra (GND) respectivamente.

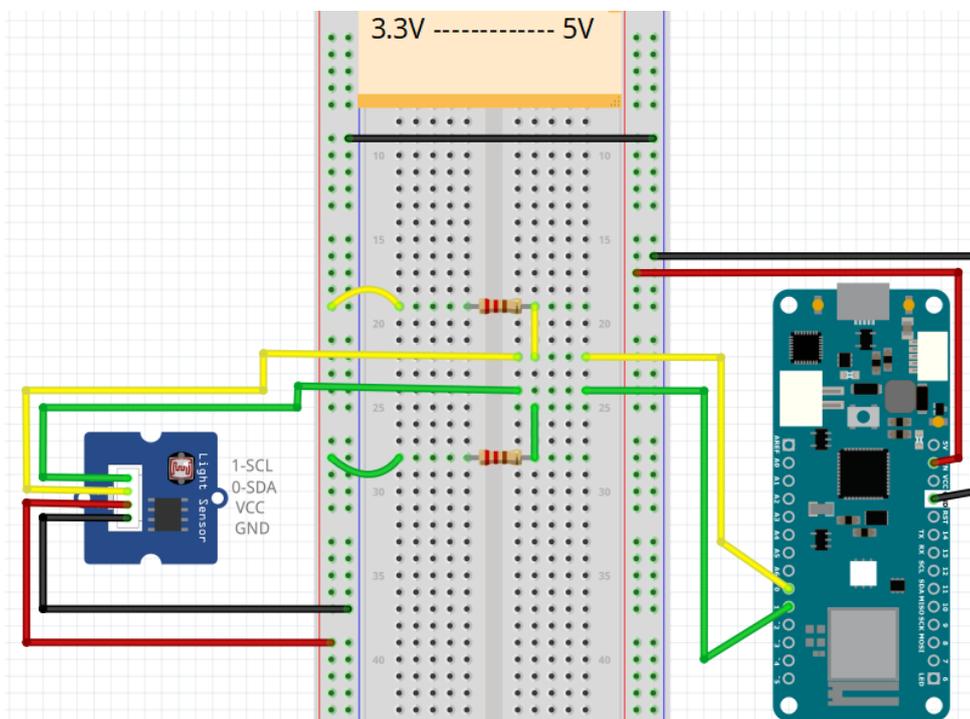


Figura 39: Esquemático en protoboard del sensor SI1145 del módulo piranómetro.

f. Módulo de control de tiempo RTC

El control de las fechas y horas está a cargo de este módulo, el cual se optó por conectar a la placa Arduino mediante el protocolo de comunicación I²C como se muestra en la Figura 40, es decir, solo requiere dos cables de alimentación, voltaje y tierra (3.3V y GND) mediante las líneas rojo y negro respectivamente; y además dos cables para la

comunicación entre ambos dispositivos, las líneas SCL y SDA (verde y amarillo respectivamente).

Adicionalmente, estas líneas pueden compartir su conexión con cualquier dispositivo que opere bajo dicho protocolo, como el sensor de presión o el display; estas se diferencian al momento de la programación en sus respectivas librerías creando sus propias direcciones de comunicación.

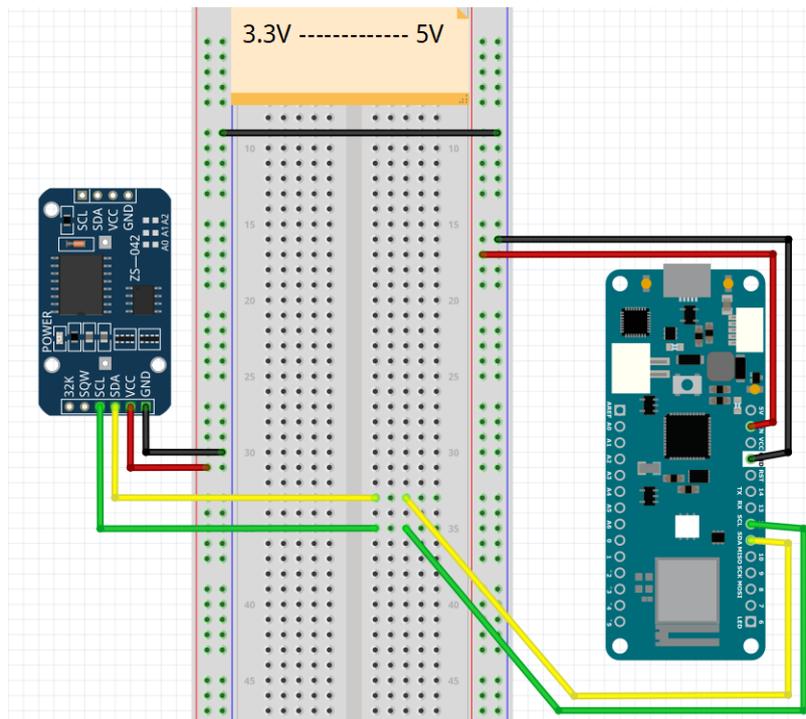


Figura 40: Esquemático en protoboard del módulo Real Time Clock DS3231.

g. Módulo adaptador de memoria microSD

Este módulo de almacenamiento de información opera bajo el protocolo de comunicación SPI, es por esto que requiere de seis líneas, de las cuales dos son de alimentación (rojo y negro), que preferiblemente se conectan a la de 5 voltios y las otras cuatro representan la comunicación entre ambos dispositivos; estas líneas son: MISO, MOSI, SCK y CS; que están señalizadas en las placas, a excepción de la última que solo está señalizada en el módulo y se conecta al pin digital número 7 (D7) para comprobar el funcionamiento del módulo; dichas líneas se conectan como se muestra en la Figura 41, con los colores verde, azul, morado y amarillo respectivamente.

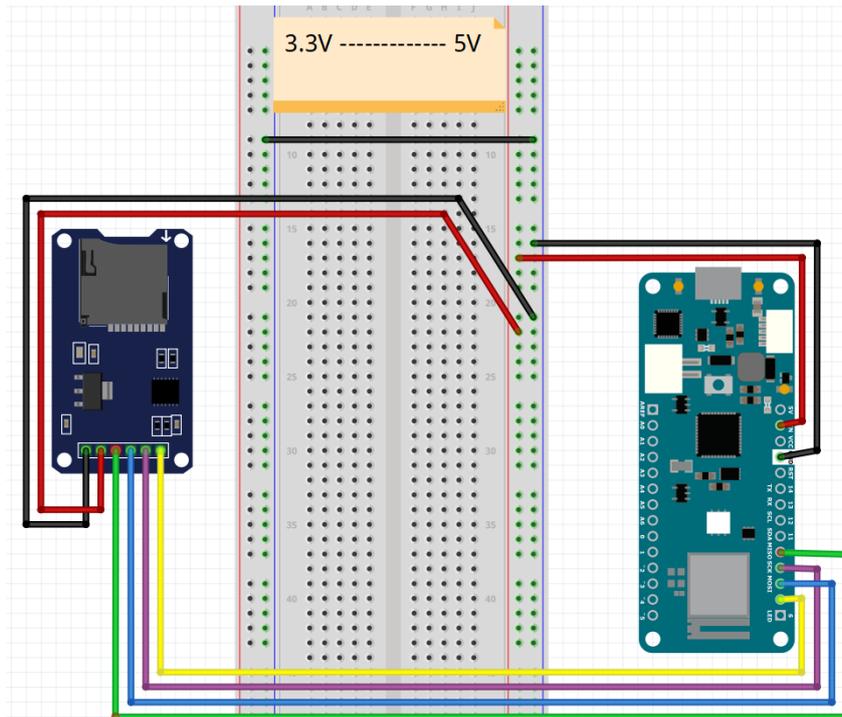


Figura 41: Esquemático en protoboard del módulo de memoria externa microSD.

h. Módulo LCD

El módulo display de 20x04 (20 columnas y 4 filas), originalmente contaba con 16 líneas de conexión, sin embargo, con ayuda de un módulo adaptador se reducen a cuatro, véase Figura 42, cuyo protocolo de comunicación es I²C, por lo que solo requiere dos líneas de alimentación de 5 voltios (rojo y negro) y las otras dos líneas correspondientes a la transmisión y recepción de datos, SCL y SDA (verde y amarillo respectivamente).

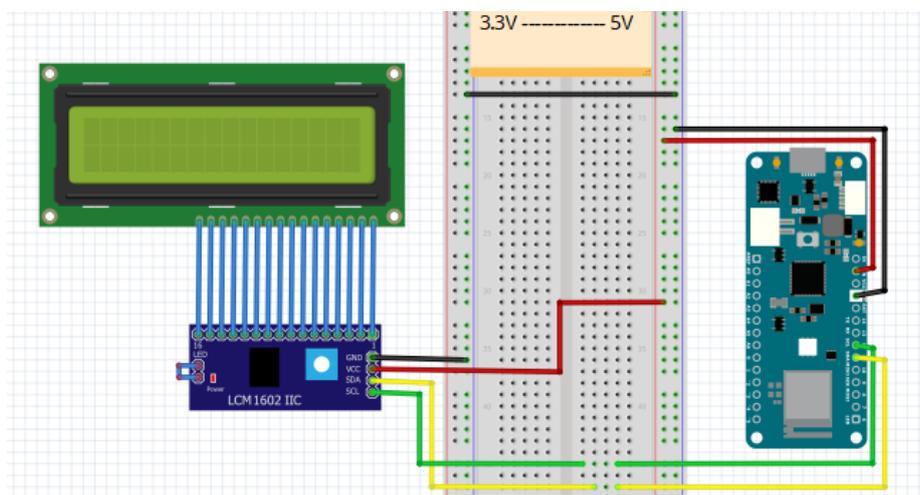


Figura 42: Módulo de visualización, display LCD 16x02

i. Módulos convertidores de voltaje

Estos módulos se insertaron separados en otra placa protoboard, en cuyas entradas reciben la conexión desde el regulador de carga solar (12 voltios) a través de una bornera que luego distribuye de manera paralela su voltaje a los dos módulos y así genera las dos líneas de tensión de 3.3V y 5V como se muestra en la Figura 43, en donde se muestra el arreglo para esta disposición de módulos de manera conveniente, en el cual los cables rojos representan a la línea positivo o de voltaje y los cables negros corresponden a la línea negativa o GND.

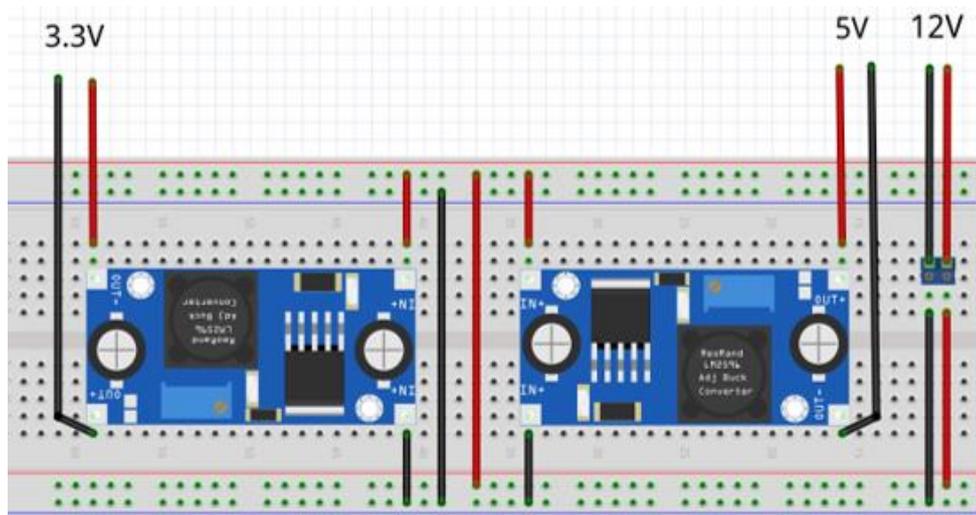


Figura 43: Esquemático en protoboard de los convertidores de voltaje LM2596.

4.3.2. Esquema final de conexiones

A continuación, se elaboró un esquema general de los componentes del prototipo montados en protoboard donde se incluyeron todos los sensores, módulos y microcontrolador utilizados, véase Figura 44, la cual se describe de la siguiente manera:

Primero, el sistema se provee de energía a través de un sistema fotovoltaico de 12 voltios cuyos polos se conectan de manera paralela a los dos módulos convertidores de voltaje, que están ubicados en la placa de pruebas del lado derecho, con el fin de reducir dicho voltaje de entrada a dos líneas de 5 y 3.3 voltios, los cuales, según la Tabla 13 son los voltajes de trabajo más comunes en el sistema y que se reparten en la placa de pruebas del lado izquierdo en ambos extremos laterales. Luego, todos los módulos y sensores se conectaron de acuerdo a lo manifestado en los esquemas de conexión previamente

mostrados y aquellos dispositivos que comparten el protocolo de comunicación I²C fueron conectados en los mismos puntos. Finalmente, dicho esquema se utilizó como referente para el diseño y elaboración del plano de conexiones eléctricas como se aprecia en la Figura 45, el cual a su vez se utilizó para desarrollar la placa central de procesamiento del prototipo, que fue el lugar donde se conectaron el microcontrolador, los sensores y los módulos seleccionados.

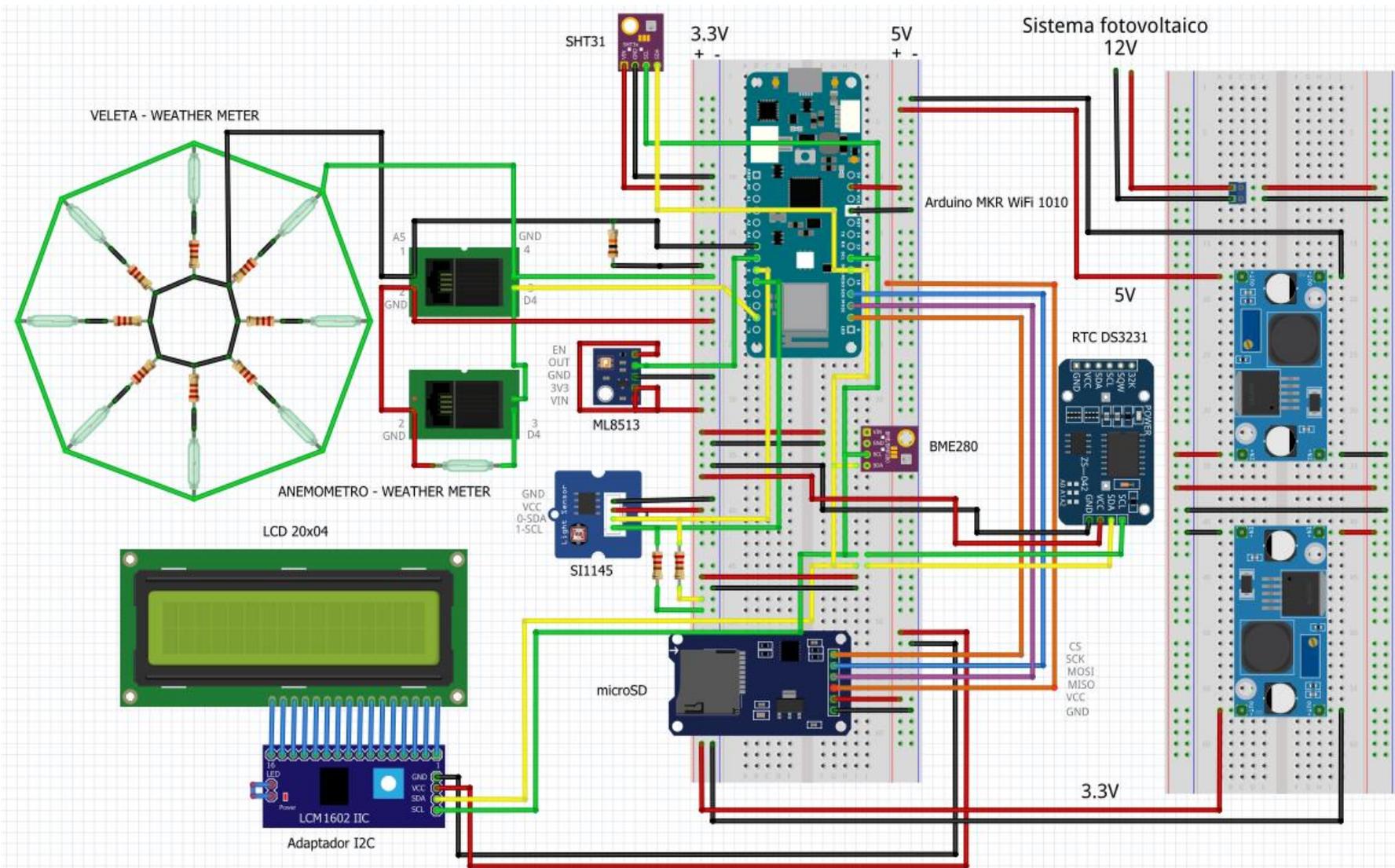


Figura 44: Esquema general de conexiones elaborado en el software Fritzing.

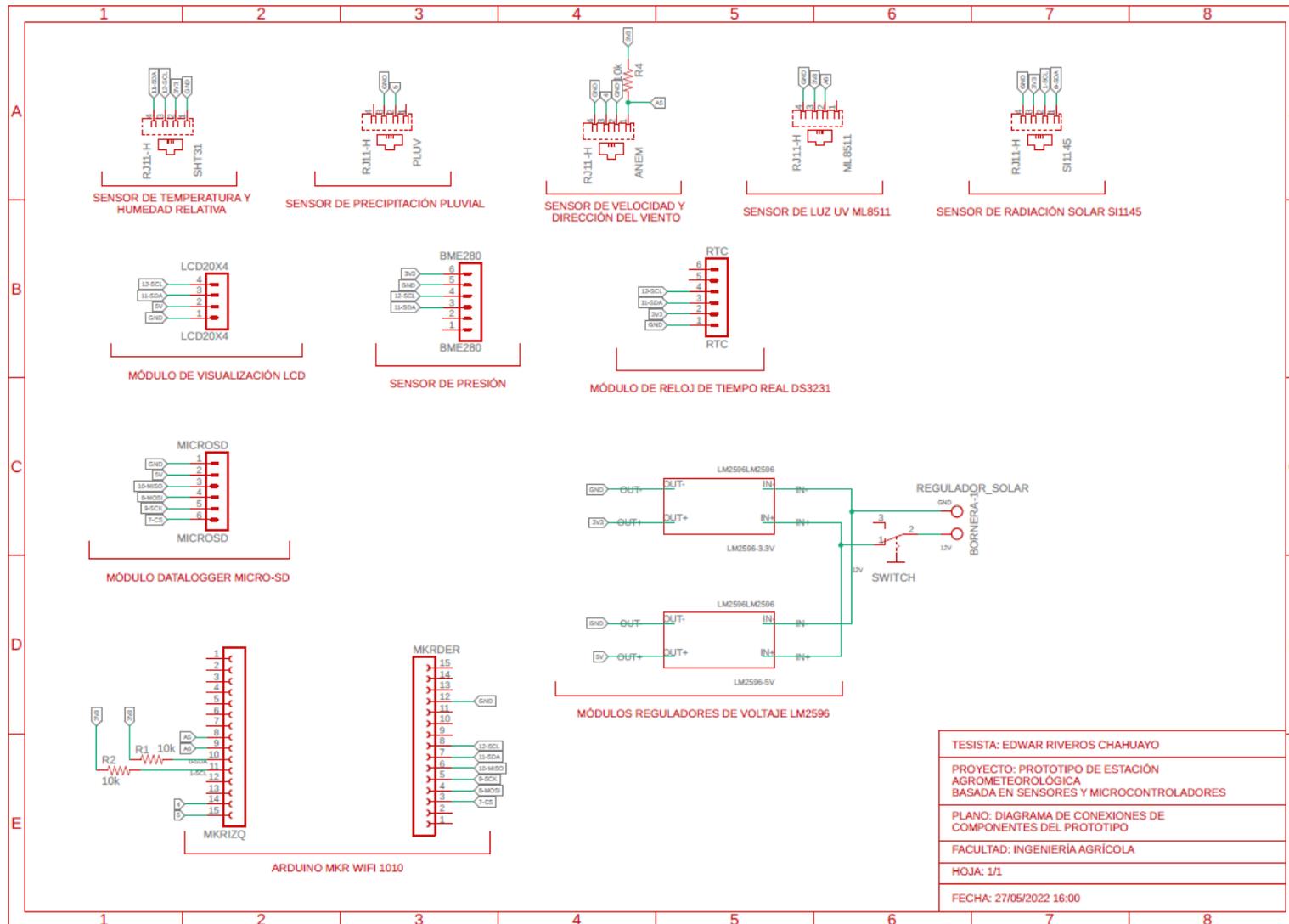


Figura 45: Plano de conexiones eléctricas del prototipo, elaborado en el software Eagle.

4.4. Diseño definitivo del prototipo

De acuerdo al diagrama de subsistemas generado, el esquemático y plano de conexiones eléctricas y las consideraciones generales descritas en la sección 3.3, se logró que el prototipo fuese desarrollado de acuerdo a las características predefinidas y se pudiera instalar adecuadamente en la zona decidida para que pudiera realizar las mediciones respectivas con el fin de poder calibrarla, validarla y asegurar su funcionamiento a largo plazo. A continuación, se muestran los detalles de la composición final del prototipo separado según su distribución en subsistemas.

4.4.1. Subsistema de medición de temperatura y humedad

En primer lugar, el sensor SHT31 se ubicó dentro de una cobertura idéntica al del sensor DHT21, luego se colocó un pequeño soporte cilíndrico, el cual fue empotrado al plato base del abrigo y sirvió como soporte para el sensor SHT31 con su cobertura y la roseta telefónica, los cuales se ubicaron de manera opuesta, esto de tal manera que ambos estén en el mismo espacio ya que el sensor requiere de dicha roseta para adaptar los cables del mismo a una salida del tipo RJ-11, véase Figura 46.

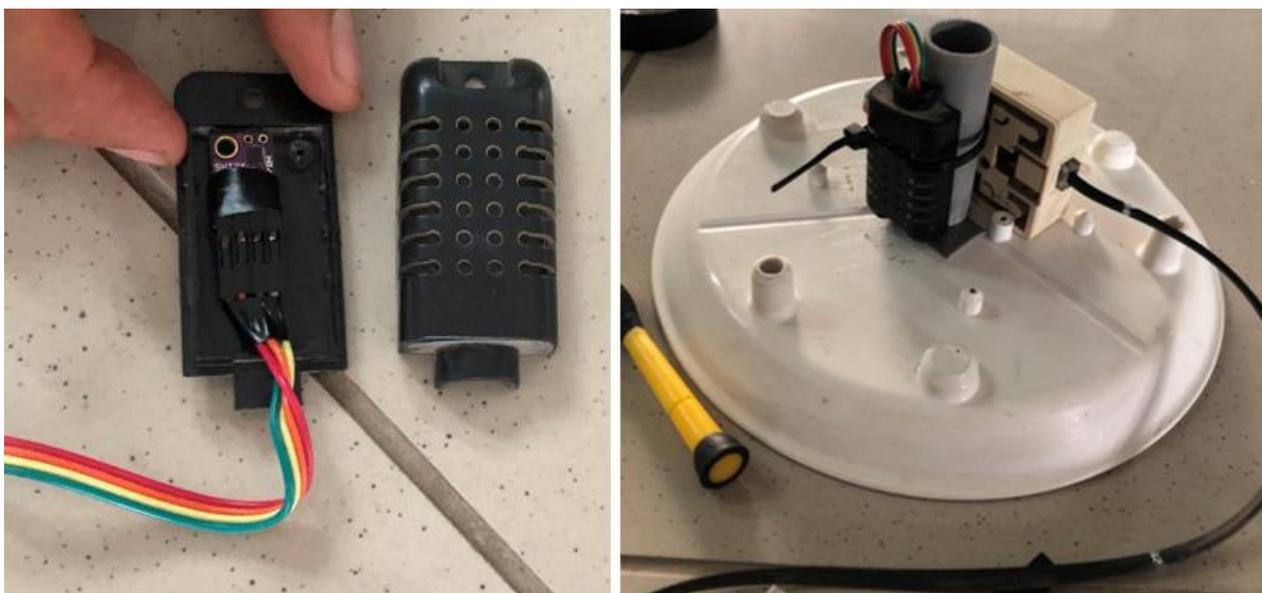


Figura 46: Al lado izquierdo, el sensor SHT31 dentro de su cobertura y al derecho, el sensor ubicado en el plato base.

Luego, el protector es un abrigo meteorológico con las características idénticas a la de una pantalla de Stevenson, el cual consta de una serie de seis platos en total, de los cuales cuatro tienen una abertura en el interior y los otros dos carecen de ella, de tal forma que al superponerlos uno sobre otro, colocando en primer y último lugar los platos que no tienen la abertura, generen una cámara en donde se puede colocar el sensor.

Finalmente, como se muestra en la Figura 47, se unió el abrigo meteorológico con una estructura metálica con perfil L que sirvió de soporte y este a su vez se unió a un corto tubo metálico soldado que permite que se pueda montar al mástil del módulo Weather Meter (anemómetro y veleta).



Figura 47: Abrigo meteorológico contenedor del sensor de temperatura y humedad.

4.4.2. Subsistema de medición de viento y radiación solar

En la Figura 48 se puede apreciar los sensores de velocidad del viento y dirección del viento a la derecha e izquierda respectivamente, los cuales poseen en su interior las placas que contienen el circuito que genera las señales generadas por el accionar del viento sobre dichos sensores (anemómetro y veleta). La conexión que poseen cada uno es del tipo RJ11 por defecto y tienen la siguiente disposición: el anemómetro posee una salida con conector del tipo RJ11 con solo dos líneas activas que corresponden al interruptor magnético interno de dicho componente, este conector va dirigido hacia la veleta, el cual posee una salida del tipo RJ11 que contiene las cuatro líneas activas y corresponden a las líneas de conexión que contaba el anemómetro y aquellas que fueron necesarias para el circuito de la veleta.

Luego, en Figura 49 se muestran los sensores de radiación solar ML8511 para el espectro UV al lado derecho y SI1145 para los espectros visible, infrarrojo y ultravioleta al lado izquierdo, los cuales están en sus respectivas coberturas y con cables que unen los pines de cada sensor a una roseta telefónica que adapta las líneas de conexión a un cable con conector del tipo RJ11.



Figura 48: Anemómetro y veleta del módulo Weather Meter.

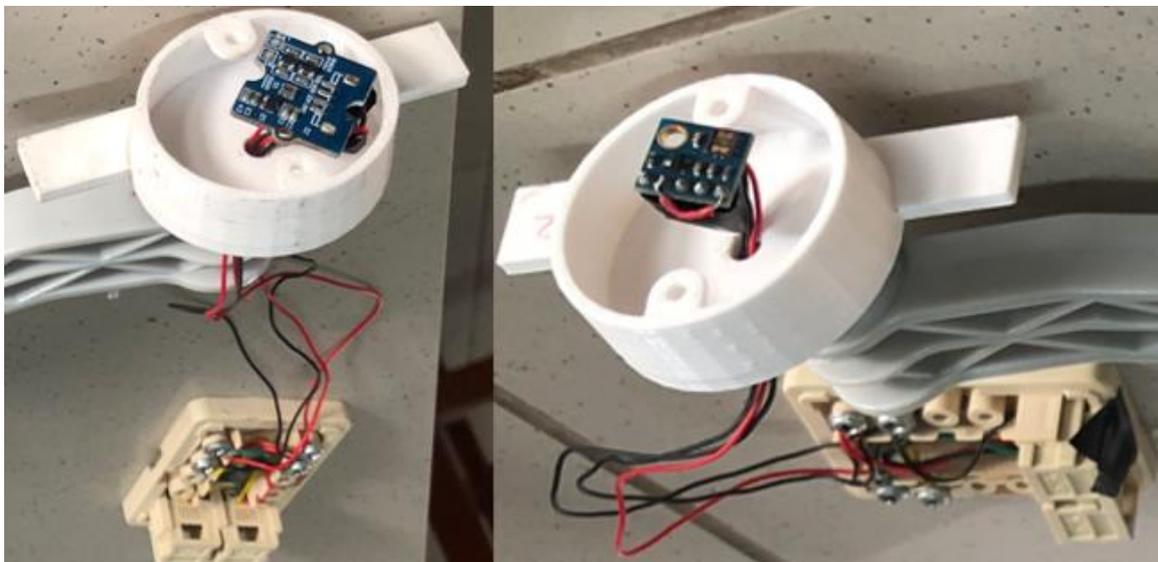


Figura 49: Sensores de radiación ML8511 y SI1145 en sus respectivos contenedores.

A continuación, la veleta y el anemómetro fueron colocados en opuestos extremos de una viga que es soportada por un mástil de aluminio, y forman parte de la estructura que viene de fábrica para la instalación del módulo Weather Meter, además, se utilizó otra estructura

idéntica para soportar los sensores de radiación solar ML8511, SI1145 y sus respectivos adaptadores, de la misma manera, ubicados en externos opuestos de la viga que también posee un mástil de aluminio, luego, con la finalidad de evitar interferencias entre los cuatro sensores, se dispusieron las vigas de manera perpendicular y el módulo de radiación se instaló a una altura superior de tal manera que no perjudique el giro del anemómetro ni de la veleta. Finalmente, la estructura de los sensores de velocidad y dirección del viento fue unida a la estructura de los sensores de radiación mediante la sujeción de sus mástiles con abrazaderas metálicas sinfín, véase Figura 50.



Figura 50: Estructuras de soporte de los sensores de velocidad y dirección del viento, y de radiación ML8511 y SI1145.

4.4.3. Subsistema de gestión de datos

En la Figura 51 se aprecia el plano de circuito electrónico que está basado en el plano de conexiones y es una representación gráfica de cómo se plasmó físicamente este subsistema, en este plano se aprecian elementos como:

- Adaptadores o conectores de cables tipo RJ11, que permitirán conectar esta placa con los sensores correspondientes a los subsistemas de medición de temperatura y humedad y medición de viento y radiación solar.

- Conectores tipo headers para el montaje de los módulos RTC DS3231, LCD 2004, adaptador de microSD y convertidores de voltaje; del sensor BME280 y del microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010.
- Componentes electrónicos como resistencias, switches y borneras para el empalme de este subsistema con la alimentación energética proveniente del sistema fotovoltaico.
- Pistas de conducción para la conexión entre todos los elementos según se requiera, los cables rojos corresponden a los conductores en la parte superior de la placa, donde se encuentran todos los componentes mencionados, y los azules, a los conductores ubicados en la cara posterior de la placa.

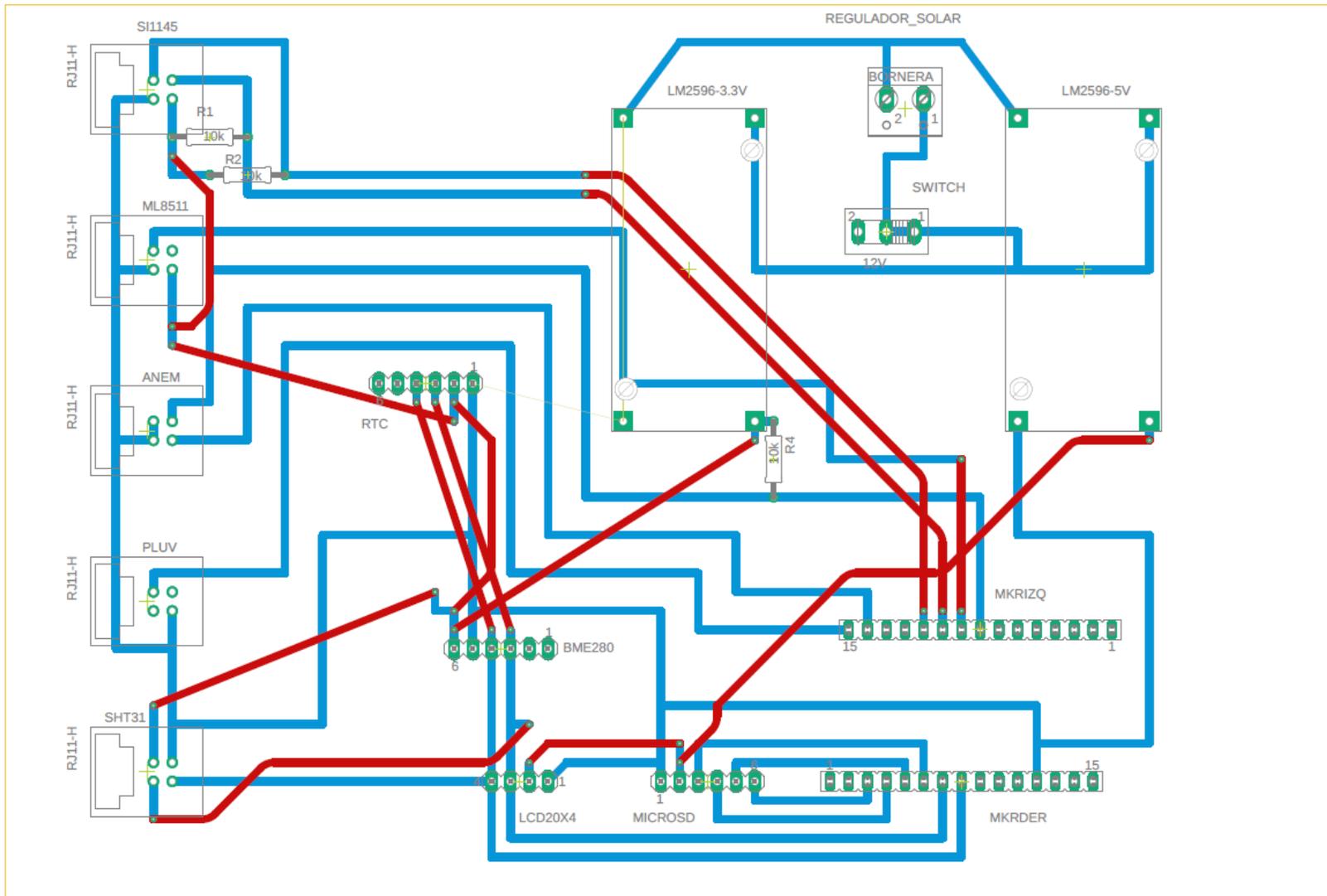


Figura 51: Plano de circuito electrónico de la unidad central de procesamiento.

En la Figura 52 se aprecian las vistas superior y posterior de la placa de circuito electrónico de la unidad central de procesamiento, es cual fue desarrollado en base al plano de circuito electrónico. Se puede apreciar que en la parte superior se encuentran los conectores para el montaje de los módulos que conforman el subsistema de gestión de datos, los módulos convertidores de voltaje, una bornera, un switch, resistencias eléctricas y los cables de conexión; mientras que en la parte posterior se aprecia únicamente los contactos de cobre de la placa perforada y las pistas conductoras hechas de soldadura de estaño y plomo, según el plano de circuito electrónico.

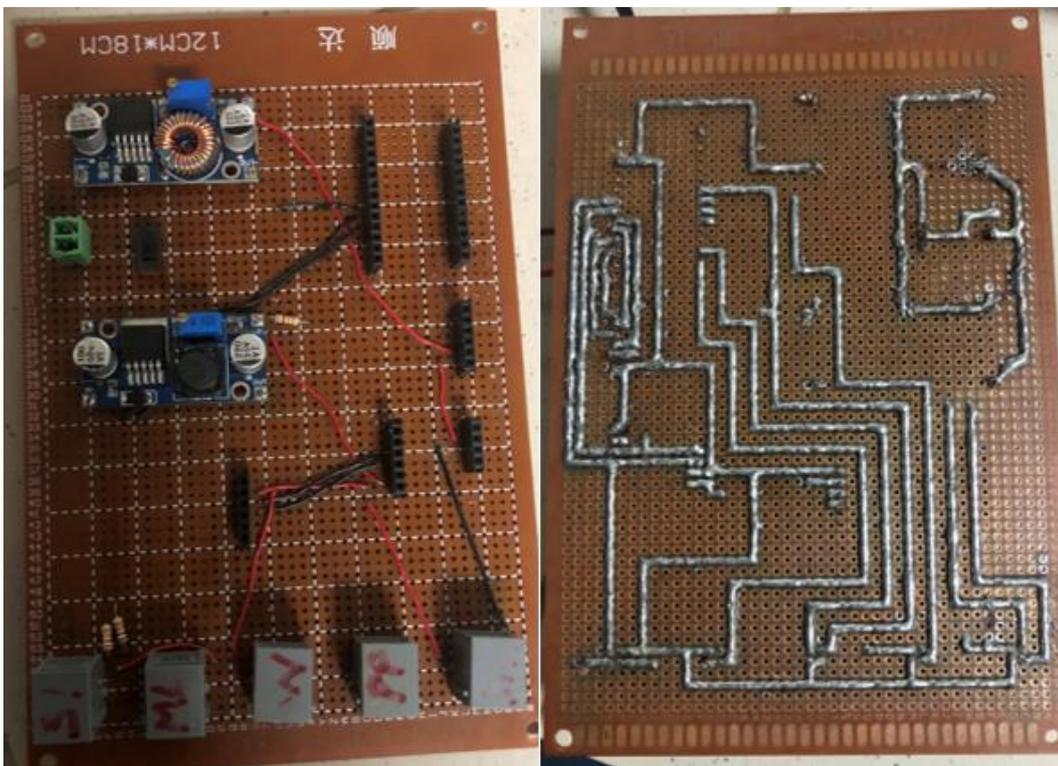


Figura 52: Placa de circuito electrónico de la unidad central de procesamiento, al lado izquierdo está la vista superior y al lado derecho, la vista posterior.

Finalmente, en Figura 53, se aprecia en el lado derecho la placa de circuito electrónico principal, dentro de la caja de pase de PVC abierta, el cual le sirve como protección ante agentes externos, y en el lado izquierdo, se muestra la tapa de la misma caja con el módulo de visualización display LCD incorporado y la placa, sin su cobertor, en funcionamiento. Además, se puede observar que los módulos y el microcontrolador se encuentran montados sobre la placa y los conectores RJ11 están conectados a los cables que provienen desde los subsistemas que incluyen los sensores.

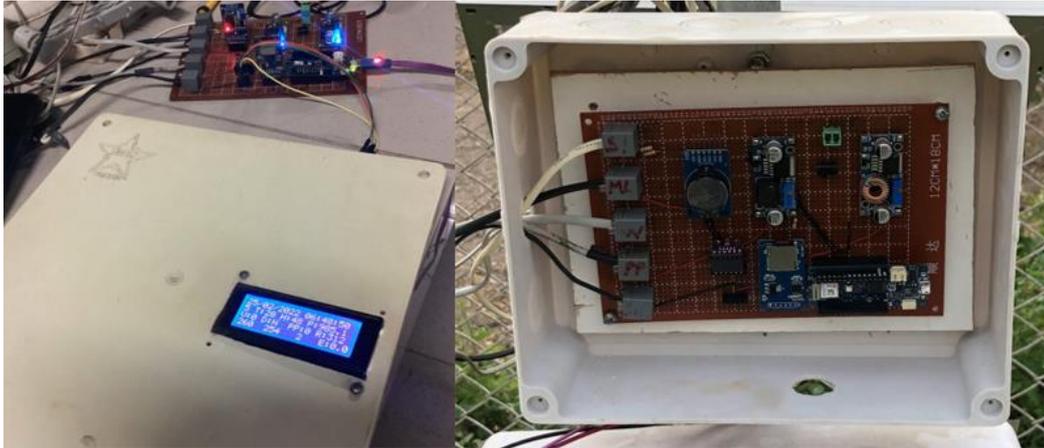


Figura 53: En el lado izquierdo está la tapa de la caja de pase de PVC y la placa en funcionamiento y en el derecho, la placa dentro de la caja de pase.

4.4.4. Subsistema de medición de presión

Este subsistema está conformado únicamente por el sensor de presión atmosférica BME280, el cual se ubicó en la placa de circuito electrónico principal, el cual a su vez se encuentra dentro de una caja hermética de PVC, el cual también servirá de protección para dicho sensor, ya que este es capaz de registrar los cambios en la variable independientemente si se encuentra en contacto directo con la intemperie y en caso lo estuviera, podría deteriorarse rápido por lo agentes ambientales externos. Sus líneas de conexión son llevadas al microcontrolador a través de las pistas de conducción de estaño y plomo que se encuentra en la cara posterior de la placa.

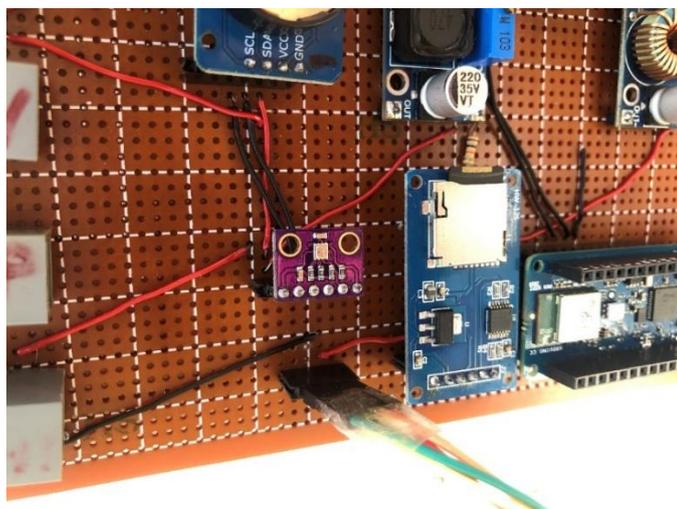


Figura 54: Sensor de presión barométrica montado sobre la placa de circuito principal.

4.4.5. Subsistema de alimentación energética y regulación

En la Figura 55 se aprecia en el lado izquierdo el panel solar de 12 voltios y 20 watts unido a una estructura que le permite tener el ángulo planteado en el diseño del mismo, mientras que en el lado derecho se tienen al controlador de carga de 10 amperios como tolerancia máxima y a la batería solar de 17 amperios-hora de capacidad de trabajo, los cuales operan a un voltaje de 12 voltios y es la tensión que se suministra a los convertidores de voltaje. Estos últimos se encuentran dentro de la placa de circuito principal, véase Figura 52.

El controlador de carga cuenta con tres pares de polos de conexión, uno de ellos va hacia el panel solar, otro hacia la batería solar y el otro a la carga, es decir, a la placa del circuito principal que es adaptado mediante una bornera de dos polos.



Figura 55: A la izquierda está el panel solar con su estructura de sujeción y soporte, y a la derecha, la batería solar y el controlador de carga conectados entre sí.

En la Figura 56 se observa a la batería de carga solar y el regulador de carga dentro de una caja de pase de PVC abierta y el panel solar con su estructura de anclaje, ambos montados sobre un mástil, garantizando que este subsistema se puede montar en una estructura vertical de soporte.

Finalmente, además de los cables mencionados anteriormente para el controlador de carga, se aprecia un cable de color rosado que es uno del tipo USB, el cual se conecta directamente al microcontrolador para abastecerlo de suficiente energía eléctrica, ya que

hacerlo por medio de los convertidores de voltaje impedía la conexión a redes inalámbricas WiFi y su funcionamiento continuo.



Figura 56: Vista posterior del panel solar y frontal de la caja de protección de la batería y el regulador de carga.

4.4.6. Estructura de soporte general

La estructura metálica elegida fue el trípode de montaje para estación meteorológica, véase Figura 33, de la empresa Davis Instruments S.A. sucursal Perú, el cual fue seleccionado como estructura sobre el cual se montarían los componentes de todos los subsistemas para darle al prototipo las características de portabilidad y resistencia. Este soporte es una estructura de acero galvanizado compuesto de dos mástiles, de 0.92 metros de longitud, que se pueden encajar entre sí para formar uno único de 1.77 metros y patas para el apoyo e incluso anclaje (Davis Instruments, 2022a).

En la Figura 57, se muestran dos vistas del prototipo de estación agrometeorológica, una de ellas correspondiente a su ensamblaje en laboratorio y el otro a su instalación en campo. El anclaje se realizó de la siguiente manera: el grupo de componentes del subsistema de medición de temperatura y humedad fue anclado al mástil de aluminio del módulo de

medición de viento del subsistema de medición de viento y radiación solar, mediante un sistema de pernos y tuercas que sujetan verticalmente dicho mástil con un tubo de mayor diámetro soldado al perfil L del abrigo meteorológico. Luego desde la parte inferior del mismo mástil de aluminio mencionado, se sujeta con abrazaderas metálicas sinfín al mástil superior y finalmente, entre el mástil superior e inferior del trípode se anclan las estructuras del panel solar, de la caja contenedora de la unidad central de procesamiento y de la caja contenedora de la batería y regulador de carga solar.

Por último, en dicha disposición se lograron las siguientes características:

- El sensor de temperatura y humedad se encuentra a una altura de 2.0 metros sobre la superficie de instalación.
- Los sensores de velocidad y dirección del viento se encuentran a una altura de 2.5 metros sobre la superficie de instalación.
- El panel solar y el punto cardinal norte de la veleta se encuentran orientados hacia el norte magnético.
- Los sensores de radiación solar se encuentren nivelados horizontalmente, así como los demás componentes, cuya nivelación no es tan imprescindible, pero proporciona estética.



Figura 57: Vistas del prototipo: a la derecha ensamblaje en laboratorio y a la izquierda, instalación en campo.

4.4.7. Costo del prototipo

En la Tabla 23 del ANEXO 2 se muestra el desgregado de costos de los elementos utilizados para la construcción y ensamblaje de prototipo, en el cual, los costos de los elementos electrónicos ascienden a S/ 766.00; los del sistema fotovoltaico, a S/ 260.00; los eléctricos, a S/ 340.00; los estructurales a S/ 1829.00; y finalmente un total de S/3195.00. Es importante mencionar que el costo de todos aquellos elementos está sujeto a variaciones generadas principalmente por la situación económica y social del país, además algunos de ellos fueron estimados por precios obtenidos por fuentes de información informáticos o

referenciales. Luego, el costo de los elementos estructurales representa el 57% del costo total, ya que se utilizaron con la finalidad de que cumplan en sobremanera las especificaciones técnicas, pero pueden ser reemplazados por otros de diferente material o forma de manera que los costos se reduzcan e incluso considerar obviar el trípode y mástil utilizando algún soporte disponible en la zona de instalación.

Finalmente, el costo del prototipo es considerablemente reducido en comparación a estaciones meteorológicas automáticas comerciales, cuyos precios oscilan entre los S/ 6000 a USD 10000 para aquellas con sensores de alta gama, teniendo en cuenta que la comparación se realiza en el aspecto funcional del equipo ya que dichos costos representan a los elementos funcionales como sensores, datalogger y accesorios; los cuales por parte del prototipo ascienden a un valor de S/ 1366.00 equivalente a la suma de los tres primeros componentes del desagregado de costos.

4.5. Programación del microcontrolador

El microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010 fue programado por defecto utilizando el lenguaje digital de programación C/C++, mediante el IDE Arduino. El programa elaborado se compone de las siguientes partes: declaración de constantes, variables y objetos; establecimiento de condiciones iniciales para el programa o “setup”; la secuencia repetitiva del programa o “loop” y finalmente, definición de las funciones a utilizar.

a. Declaración de constantes, variables y objetos

En la Figura 58, se aprecia la sección que corresponde a las primeras líneas de código, que están antes de las funciones por defecto *void setup()* y *void loop()*, donde se escriben las macros para los pines asignados a cada sensor o módulo mediante el comando “#define”, luego se incluyen las librerías necesarias, mediante el comando “#include” para poder utilizar las clases y métodos incluidos en cada uno y que corresponden a los diferentes módulos y sensores utilizados, y finalmente, se declaran los objetos basados en las clases que cada librería contiene y, a su vez, utilizar sus funciones o métodos.

```

46 #define PIN_ANEMOMETRO 4 // Definiendo pin digital para el anemómetro: D2 - Interrupción
47 #define PIN_RAINGAUGE 5 // Definiendo pin digital para el pluviómetro: D5 - Interrupción
48 #define PIN_SD 7 // Definiendo pin digital de comprobación para el módulo adaptador mic
49 #define PIN_VELETA A5 // Definiendo pin analógico para la veleta: A5
50 #define PIN_RADIACION A6 // Definiendo pin analógico para el ML8511 (piranómetro): A6
51
52 // Definición de constantes matemáticas y ecuaciones para el procesamiento
53 // de las señales registradas por el microcontrolador:
54 #define FACTOR_PIRANOMETRO 1.0
55
56
57 // ***** LIBRERÍAS ***** //
58 // Librerías necesarias:
59 #include <Wire.h> // Permite la conexión del módulo LCD 20x4 o 16x2 con adaptador I2C ..
60 // #include <DHT.h> // Permite la conexión con el sensor de temperatura y humedad DHT11,
61 #include <Adafruit_SHT31.h> // Permite la conexión con el sensor de temperatura y humedad SHT31
62 #include <Adafruit_BME280.h> // Permite la conexión a través de la interfaz I2C al sensor BMP 280, 1
63 #include <SD.h> // Permite la conexión con el módulo microSD (memoria interna / datalog
64 #include <RTClib.h> // Permite la conexión con el módulo RTC DS3231 (Reloj de tiempo real)
65 #include <WiFiNINA.h> // Permite la conexión a redes WiFi para la placa MKR WiFi 1010
66 #include <BlynkSimpleWiFiNINA.h> // Permite la conexión al servidor Blynk mediante una red WiFi de la p
67 #include <hd44780.h> // ... a través del protocolo I2C mediante la biblioteca hd44780
68 #include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h> // Esta librería requiere de las dos anteriores y es la que crea la cl
69 #include <wiring_private.h> // Permite la inclusión de la función pinPeripheral()
70 #include <Adafruit_SII145.h> // Permite la conexión con el sensor SII145 Grove Sensor de Luz
71
72 // ***** OBJETOS ***** //
73 // Inicializando los objetos utilizados en adelante para acceder a sus atributos y funciones:
74 // DHT sensorTH(PIN_TEMP_Y_HUM, TIPO_SENSOR_DHT); // Instancia de la clase "DHT" para temperatura y humedad.
75 Adafruit_SHT31 sensorTH = Adafruit_SHT31(); // Instancia de la clase "Adafruit_SHT31" para temperatura y humedad.
76 Adafruit_BME280 sensorPresion; // Instancia de la clase "Adafruit_BME280" para la presión, altitud, t
77 RTC_DS3231 rtc; // Instancia de la clase "RTC_DS3231" para el reloj de tiempo real.
78 DateTime reloj; // Instancia de la clase "DateTime" que almacenará valores de hora y f

```

Figura 58: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la inclusión de librerías, definición de constantes y declaración de objetos.

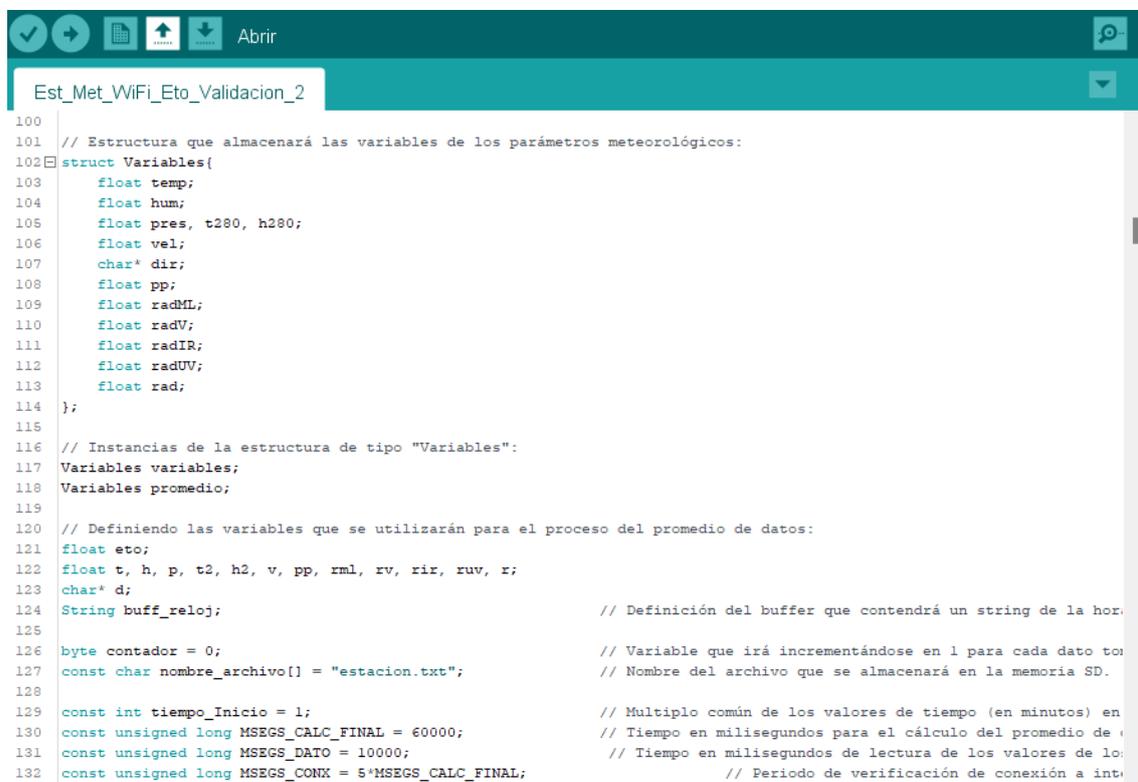
Luego, en la Figura 59, se muestra la sección de código que continúa a la mencionada anteriormente, en donde se definen todas las variables y constantes utilizadas en el desarrollo del programa, tales como: la estructura que almacena los valores obtenidos por los sensores y procesados en la unidad correspondiente, las variables que contienen los valores de evapotranspiración, fecha y hora, las variables agrometeorológicas temporales medidas en intervalos de 10 segundos, el contador de datos, entre otros; las constantes que contienen los valores textuales que se utilizarán para el encabezado de la base de datos, nombre del archivo en el datalogger, usuario y contraseña de la red; las constantes que contienen valores numéricos de latitud, longitud, elevación, intervalos de tiempo para adquisición de datos y el cálculo final; entre otras variables y constantes de apoyo que se usan en adelante.

b. Establecimiento de condiciones iniciales

En la Figura 60, se aprecia la sección que está dentro de la función por defecto “void setup”, donde: se plantean las condiciones iniciales para cada uno de los sensores y módulos que están conectados al microcontrolador, se comprueba el funcionamiento o

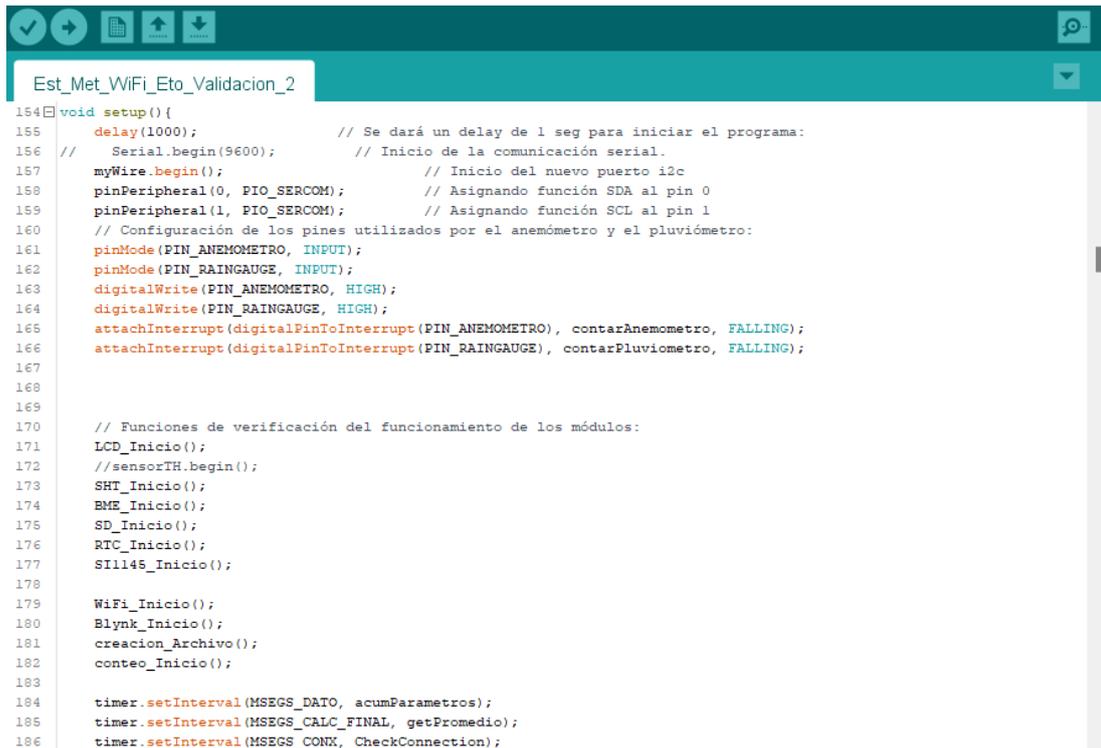
conexión adecuada de cada uno de ellos mediante funciones definidas por el usuario y se inicializan, habilitan los pines del microcontrolador que se utilizaron dándoles las características necesarias para interactuar correctamente con cada sensor o módulo al que esté asignado, y se definen los temporizadores para garantizar las mediciones y verificaciones en los intervalos requeridos.

Luego, en la Figura 92 correspondiente al ANEXO 3, se aprecia el diagrama de flujo elaborado para la programación de las líneas de código de esta sección para proceder a la siguiente.



```
100
101 // Estructura que almacenará las variables de los parámetros meteorológicos:
102 struct Variables{
103     float temp;
104     float hum;
105     float pres, t280, h280;
106     float vel;
107     char* dir;
108     float pp;
109     float radML;
110     float radV;
111     float radIR;
112     float radUV;
113     float rad;
114 };
115
116 // Instancias de la estructura de tipo "Variables":
117 Variables variables;
118 Variables promedio;
119
120 // Definiendo las variables que se utilizarán para el proceso del promedio de datos:
121 float eto;
122 float t, h, p, t2, h2, v, pp, rml, rv, rir, ruv, r;
123 char* d;
124 String buff_reloj; // Definición del buffer que contendrá un string de la hora.
125
126 byte contador = 0; // Variable que irá incrementándose en 1 para cada dato tomado.
127 const char nombre_archivo[] = "estacion.txt"; // Nombre del archivo que se almacenará en la memoria SD.
128
129 const int tiempo_Inicio = 1; // Multiplo común de los valores de tiempo (en minutos) en
130 const unsigned long MSEGS_CALC_FINAL = 60000; // Tiempo en milisegundos para el cálculo del promedio de
131 const unsigned long MSEGS_DATO = 10000; // Tiempo en milisegundos de lectura de los valores de los
132 const unsigned long MSEGS_CONX = 5*MSEGS_CALC_FINAL; // Periodo de verificación de conexión a internet.
```

Figura 59: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la definición de variables, constantes y estructuras de variables.



```
154 void setup() {
155   delay(1000);           // Se dará un delay de 1 seg para iniciar el programa:
156   // Serial.begin(9600); // Inicio de la comunicación serial.
157   myWire.begin();      // Inicio del nuevo puerto i2c
158   pinPeripheral(0, PIO_SERCOM); // Asignando función SDA al pin 0
159   pinPeripheral(1, PIO_SERCOM); // Asignando función SCL al pin 1
160   // Configuración de los pines utilizados por el anemómetro y el pluviómetro:
161   pinMode(PIN_ANEMOMETRO, INPUT);
162   pinMode(PIN_RAINGAUGE, INPUT);
163   digitalWrite(PIN_ANEMOMETRO, HIGH);
164   digitalWrite(PIN_RAINGAUGE, HIGH);
165   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO), contarAnemometro, FALLING);
166   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_RAINGAUGE), contarPluviometro, FALLING);
167
168
169
170   // Funciones de verificación del funcionamiento de los módulos:
171   LCD_Inicio();
172   //sensorTH.begin();
173   SHT_Inicio();
174   BME_Inicio();
175   SD_Inicio();
176   RTC_Inicio();
177   SI1146_Inicio();
178
179   WiFi_Inicio();
180   Blynk_Inicio();
181   creacion_Archivo();
182   conteo_Inicio();
183
184   timer.setInterval(MSEGS_DATO, acumParametros);
185   timer.setInterval(MSEGS_CALC_FINAL, getPromedio);
186   timer.setInterval(MSEGS_CONX, CheckConnection);
}
```

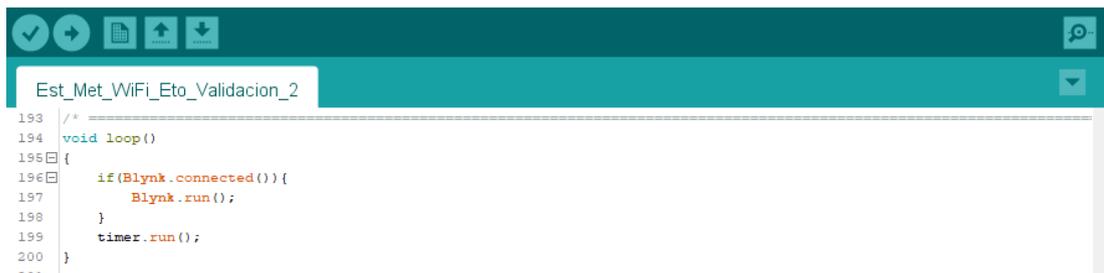
Figura 60: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la función por defecto “void setup”.

c. Secuencia repetitiva

En la Figura 61, se muestra el código incluido en la función “void loop”, que implica una secuencia iterativa de acciones. En este caso solo se necesitó de unas cuantas líneas de código que permitieron que los temporizadores definidos en la sección anterior y aquel que permite el envío de datos a la plataforma Blynk, empiecen a operar de manera repetitiva.

Es importante mencionar que, activando estos temporizadores, se logra que las funciones de: adquisición de datos de los sensores, cálculo de los datos representativos del periodo respectivo para cada variable, la verificación de la conexión a la red y el envío de la data al datalogger y a la plataforma Blynk; puedan ejecutarse para los periodos preestablecidos.

En la Figura 93 que se ubica en el ANEXO 3, se aprecia el algoritmo para la obtención de la información agrometeorológica que está basada en temporizadores y se ejecuta de manera repetitiva por acción del contenido de la función “void loop”.



```
193  /* =====
194  void loop()
195  {
196      if(Blynk.connected()){
197          Blynk.run();
198      }
199      timer.run();
200  }
```

Figura 61: Vista del fragmento de código en el IDE Arduino, correspondiente a la función por defecto “void loop”.

d. Funciones definidas por el usuario

Estas funciones que fueron elaboradas por el programador son colocadas al final del programa, luego de la función “void loop”, y permiten determinar algunas tareas que no están disponibles en las librerías incluidas. Estas funciones se describen a continuación y junto con el resto del código en su totalidad se muestran en el ANEXO 4.

- La función “eto_FAO” retorna el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia mediante el método de FAO Penman-Monteith y requiere como información a las variables climáticas, la fecha y hora, latitud, longitud y elevación.
- La función “acumParámetros” permite la obtención de los registros para intervalos de 10 segundos, tomando valores de fecha y hora en cada periodo, el acumulado de las lecturas de los sensores seleccionados para cada intervalo hasta llegar al momento de determinar el dato representativo y va mostrando dicha acumulación en el display LCD.
- La función “getFechaHora” retorna un texto que contiene la fecha y hora instantánea en el formato "DD/MM/YYYY hh:mm:ss AP".
- La función “contarAnemometro” permite el conteo de los giros del anemómetro.
- La función “getParametros” toma lecturas de todos los sensores, a los que se les aplica sus funciones de calibración respectivas, para retornar una estructura de datos que contiene las variables agrometeorológicas con excepción de la evapotranspiración.
- La función “getPromedio” toma los últimos valores obtenidos en la función “acumParámetros”, para posteriormente dividirlo entre el número de datos y obtener el promedio como dato representativo del periodo, a excepción de la

variable de dirección del viento que solo toma ese último valor y finalmente, llama a la función “eto_FAO” para determinar el valor de evapotranspiración representativo del periodo observado.

- La función “subirData” llama a las funciones “subirBlynk”, que se encarga de enviar la data a la plataforma Blynk, y “subirSD”, que envía la data a la memoria externa del datalogger; y luego reinicia la variable del contador y convierte las variables que toman los datos climáticos a cero.
- Las funciones “SHT_Inicio”, “BME_Inicio”, “SI1145_Inicio” , “SD_Inicio”, “RTC_Inicio” y “LCD_Inicio”, permiten la inicialización de los sensores: de temperatura y humedad, de presión y de radiación; y los módulos: adaptador microSD, DS3231 y LCD 2004; respectivamente.
- La función “creacion_Archivo” permite la creación de un archivo de texto en la memoria extraíble del datalogger.
- La función “conteo_Inicio” realiza un conteo de los minutos y segundos hasta alcanzar un valor en minutos con cero segundos para empezar las mediciones.
- La función “probando_SD” verifica el funcionamiento del módulo datalogger y su memoria extraíble.
- Las funciones “WiFi_Inicio”, “Blynk_Inicio” y “CheckConnection” permiten conectarse a una red WiFi, conectarse al servidor de la plataforma Blynk y verificar la conexión a la red; respectivamente.

4.6. Calibración de los sensores

El registro de datos para la calibración de los sensores del prototipo para las variables: temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento y radiación solar; está comprendido entre el 09 de marzo de 2022 a las 13:20 y el 07 de abril de 2022 a las 10:42, teniendo un total de 41603 registros tomados cada minuto, con 6 registros considerados como valores nulos debido a que en la hora de dichos registros el equipo fue reiniciado para la toma de datos desde el módulo datalogger y 1 registro con la variable de radiación solar anulada por ser considerado como dato atípico.

Luego, la frecuencia del registro de datos fue resumida a una frecuencia de 15 minutos para ser comparada de manera homogénea con los datos observados por la estación de

referencia Davis Vantage Pro2 para las variables mencionadas. En consecuencia, se obtuvo un registro de datos comprendido desde el 9 de marzo de 2022 a las 13:45 hasta el 7 de abril de 2022 a las 10:30, recortando los datos del prototipo al inicio y al final para obtener registros múltiples de la frecuencia escogida, obteniendo un total de 2772 registros. No obstante, al momento de realizar la operación de conversión a una frecuencia mayor, los valores nulos incidieron en el resultado para el periodo correspondiente, obteniendo dos registros nulos correspondientes a las fechas y horas 16-03-2022 12:15 y 24-03-2022 14:45 para todas las variables y uno en la fecha y hora 05-04-2022 23:30 para la variable de radiación solar; mientras que, para la estación de referencia, se detectó un valor nulo en la fecha y hora 10-03-2022 23:15. Por ello, fueron obviados esos tres registros para las series temporales de ambos equipos, quedando un total de 2769 registros para ser evaluados en todas las variables de interés y 2768 para la variable de radiación solar.

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico para cada una de las variables con la finalidad de verificar la linealidad de cada uno y la determinación de la función de calibración.

4.6.1. Sensor de temperatura y humedad relativa

En la Figura 62 y la Figura 63 se puede apreciar que la variable de temperatura del aire del sensor SHT31 se encuentra altamente correlacionado con las lecturas de dicha variable tomadas de la estación de referencia, con un R^2 igual a 0.996. Según Cannon et al. (2022), el módulo SHT31-D presentó altos valores de correlación con respecto a una estación meteorológica de la marca Campbell con un $R^2 = 0.971$, el cual es superado por el este modelo, no obstante, se puede apreciar que existe una ligera desviación de la curva de tendencia con respecto a la curva simétrica, dicha curva de tendencia presenta una pendiente $m = 0.9444$ por debajo del valor ideal de 1.0 y una intersección con el eje de $b = 1.123$ por encima del valor ideal de 0.0, lo que indica que existe un ligero sesgo, cuya tendencia es la de sobreestimación de los datos registrados por el prototipo.

En la Figura 64 y la Figura 65 se muestran los gráficos de la variable de humedad relativa del aire del sensor SHT31 con respecto a la estación de referencia, en los cuales se demuestra el alto grado de correlación para dicha variable con un coeficiente de

determinación igual a 0.9927. Cannon et al. (2022) determina un $R^2 = 0.976$ para la variable de humedad relativa, el cual presenta ciertas subestimaciones en los picos de mayor humedad, mientras que en este prototipo se determinó un valor superior de dicho indicador, pero con un ligero sesgo y desviación en la línea de tendencia, determinando un valor de pendiente $m = 1.0604$ y un valor de intersección con el eje de $b = - 4.8016$; reflejando que para los valores máximos observados existe una subestimación de la variable por parte del prototipo y para los valores mínimos, una sobreestimación.

Según la hoja de datos del sensor SHT31, a las variables de temperatura y humedad relativa les corresponde un valor de exactitud igual a ± 0.2 °C y ± 2 % respectivamente, mientras que los errores cuadráticos medios (RMSE) determinados en el modelo son menores, con valores de 0.1817 y 0.7622 respectivamente. (SENSIRION, 2016)

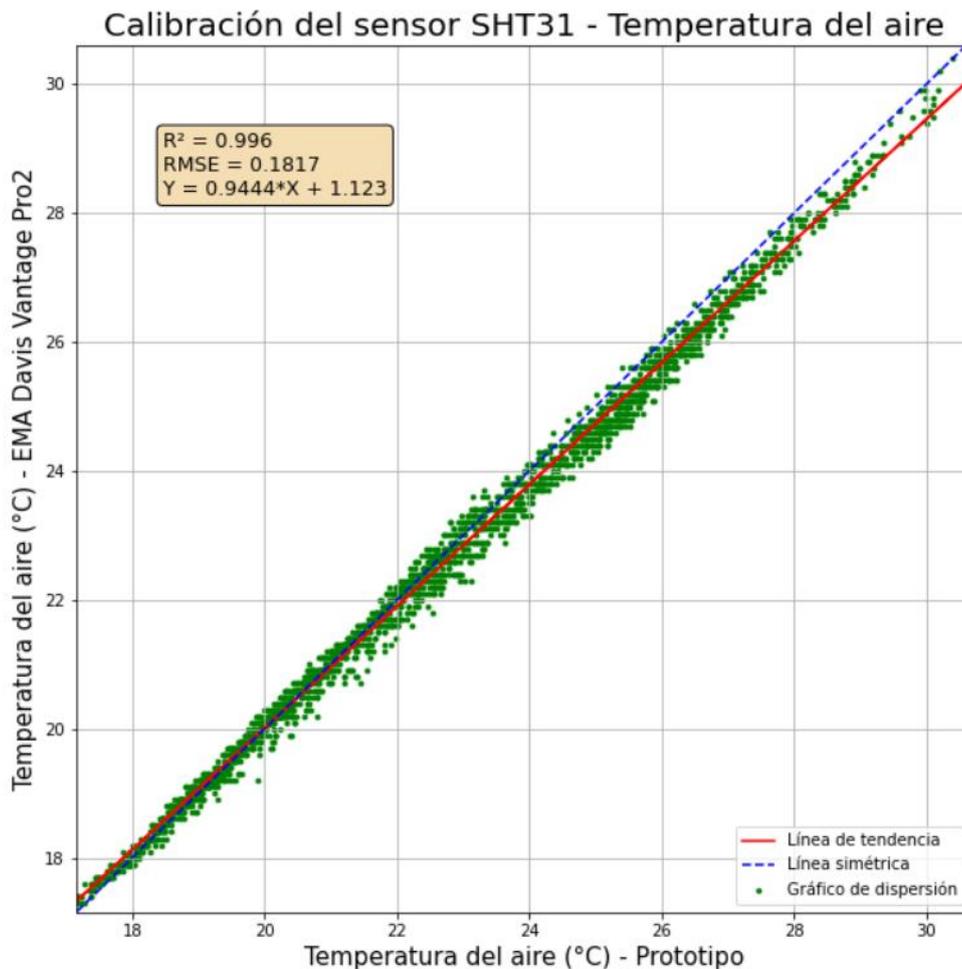


Figura 62: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de temperatura del aire del sensor SHT31.

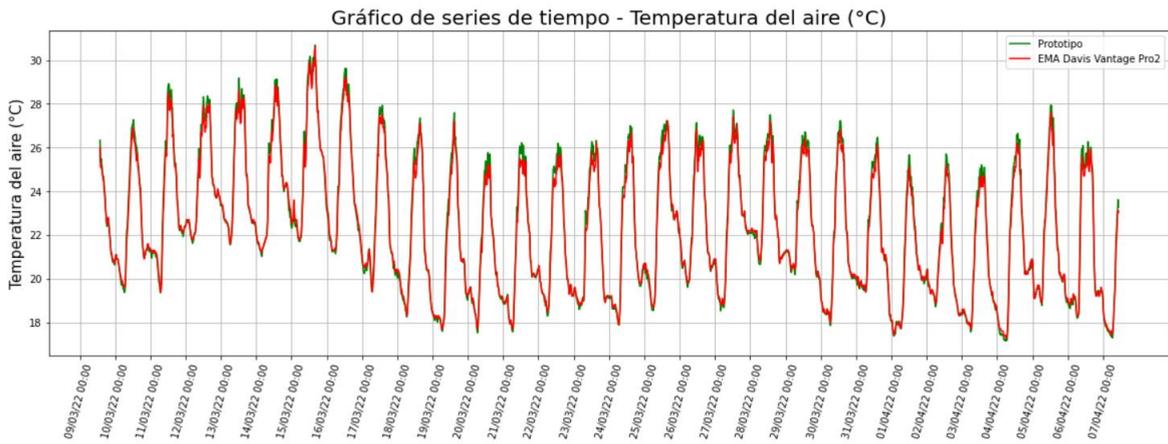


Figura 63: Gráfico de series temporales para la variable de temperatura del aire.

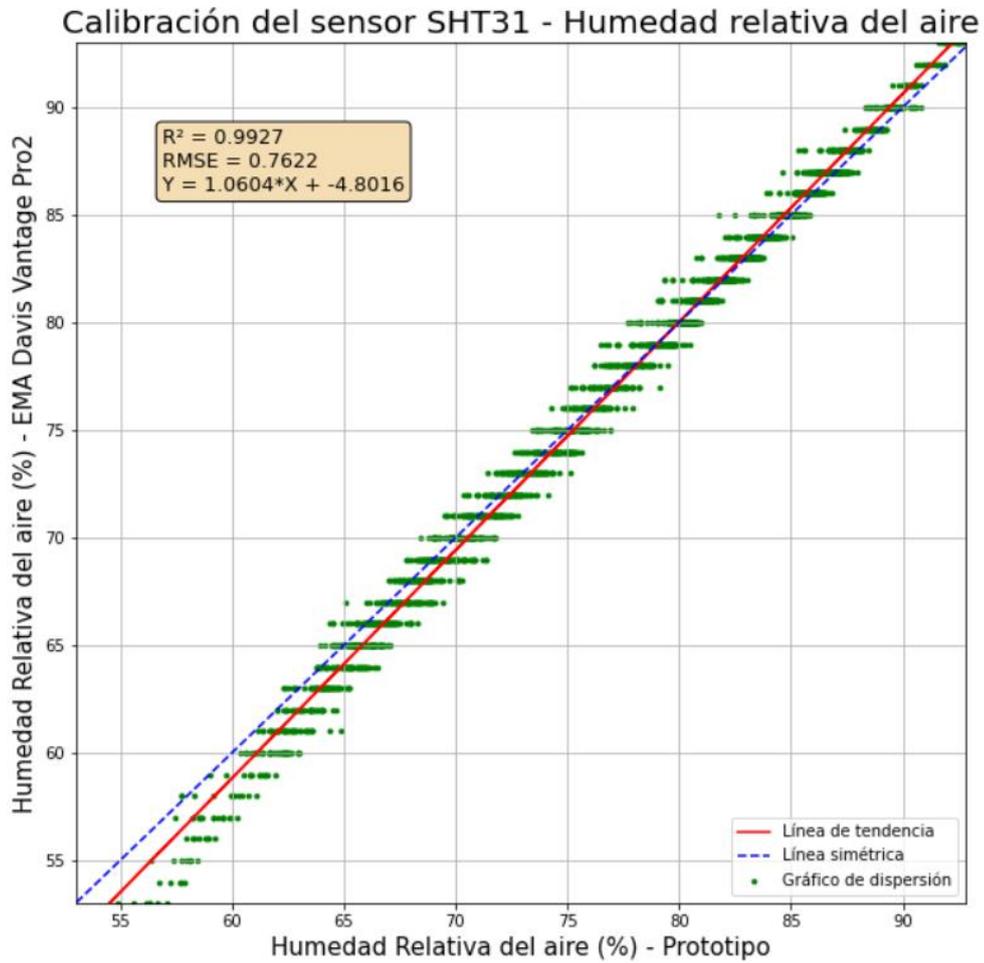


Figura 64: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de humedad relativa del aire del sensor SHT31.

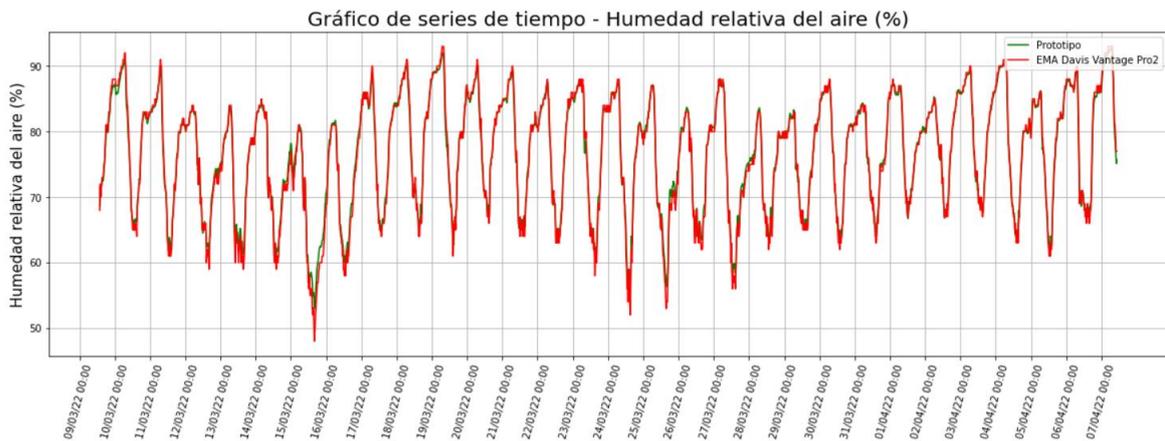


Figura 65: Gráfico de series temporales para la variable de humedad relativa del aire.

4.6.2. Sensor de presión barométrica

El sensor de presión barométrica BME280 fue analizado con respecto al barómetro de la estación de referencia, presentando un R^2 igual a 0.9555 (Figura 66 y Figura 67). Netto & Arigony-Neto (2019), determina un valor de R^2 igual a 0.9931 para una estación automática con fines de medición del espesor de la nieve utilizando el sensor BMP280, el cual es un predecesor del sensor BME280, dicho valor es superior al obtenido por este modelo, no obstante, la curva de ajuste presenta una pendiente $m = 1.0146$, el cual es muy cercano al valor ideal de 1.0 y con una intersección en el eje igual a $b = -13.7457$, el cual se encuentra relativamente cercano a 0.0, considerando el rango de valores de los registros tomados, con ello y lo mostrado en el gráfico de series temporales (Figura 67) se puede determinar que el prototipo subestima a la variable.

La posición del sensor de presión barométrica es una potencial causa de que el valor de coeficiente de determinación sea menor a lo obtenido por otro modelo, además, otra fuente de incertidumbre es la resolución de los datos observados por la estación de referencia, el cual se limita a un número discreto.

Según la hoja de datos del sensor BME280, este presenta una exactitud de ± 1.0 hPa, el cual en contraste con el error cuadrático medio obtenido por el modelo y con valor igual a 0.2473, se encuentra por encima numéricamente. (Bosch Sensortec, 2021)

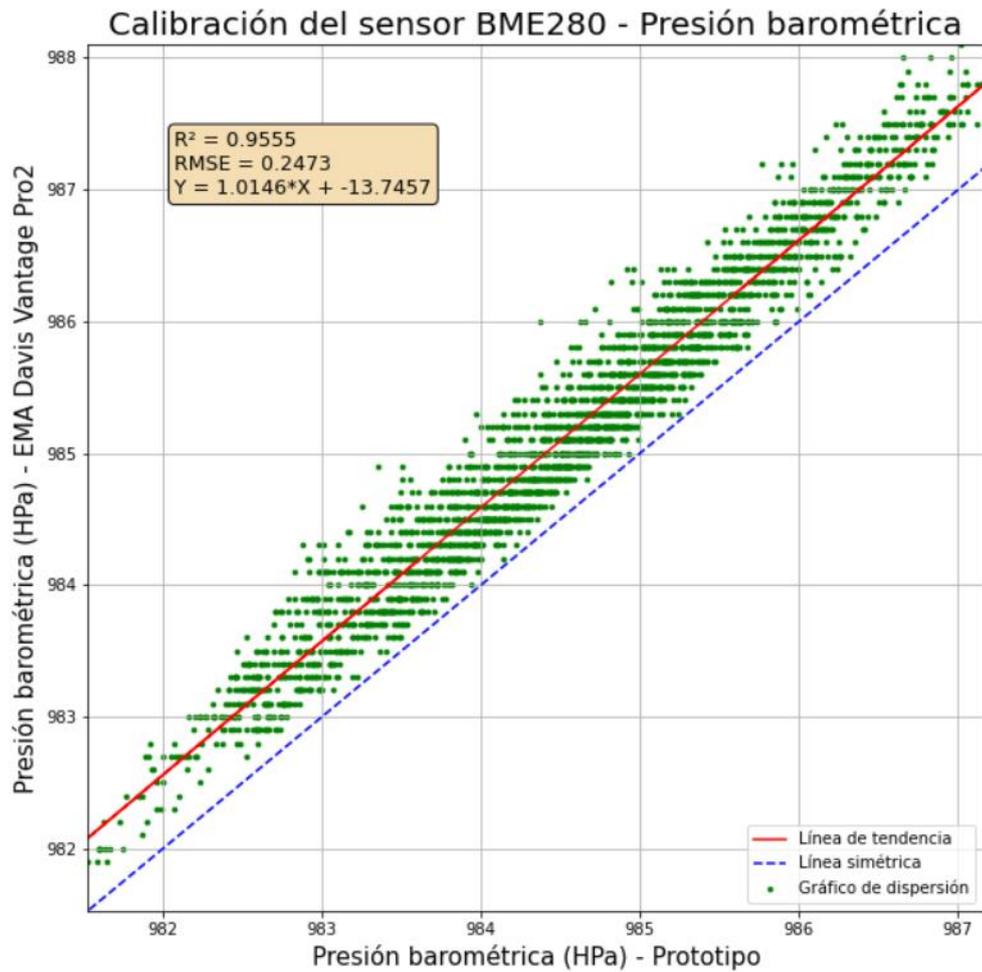


Figura 66: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de presión barométrica del sensor BME280.

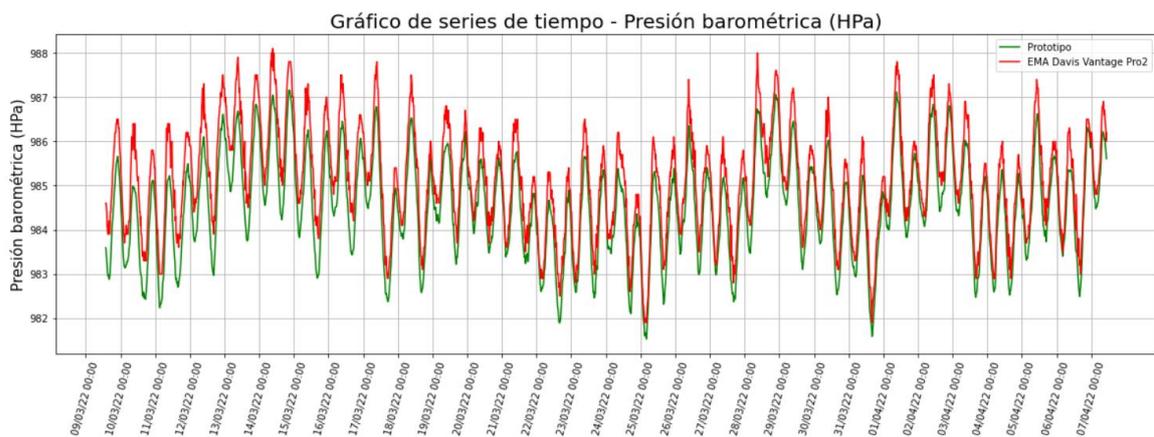


Figura 67: Gráfico de series temporales para la variable de presión barométrica.

4.6.3. Sensor de velocidad del viento

La variable de velocidad del viento registrada por el módulo Weather Meter se comparó con los valores de la estación Davis Vantage Pro2, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 68 y la Figura 69, donde se aprecia un valor de R^2 igual a 0.957, una sobreestimación por parte del prototipo y una curva de calibración notablemente desviada con respecto a la línea simétrica de referencia, con un valor de pendiente $m = 0.3822$ e intersección con el eje $b = -0.1012$; por lo que fue necesario la aplicación de la función de calibración.

Netto et al. (2019) determina un coeficiente de determinación igual a 0.7304 y un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.8546, los cuales son considerados relativamente buenos tomando en cuenta las condiciones extremas a la cual fue sometida la estación, mientras que este prototipo presentó un valor de R^2 notablemente mayor, debido a que se encuentra ubicado en una zona agrícola con influencia del viento reducido.

Luego, el valor de RMSE obtenido por el modelo igual a 0.1662 se encuentra dentro del rango de exactitud de ± 0.5 para velocidades menores a 5 m/s y $\pm 10\%$ para mayores a 5 m/s, sugerido por SENAMHI. (Protocolo Para La Instalación y Operación de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas, 2013)

Además, uno de los factores que determinó que la curva de calibración se encuentre notablemente desviada fue el factor de velocidad unitaria que se encontraba en la hoja de datos del módulo, ya que a pesar de que ambos anemómetros se encuentran a diferentes alturas, dicha diferencia no es lo suficientemente significativa para presentar dicho grado de error sistemático. Finalmente, un factor que induce al error del modelo en cuanto a coeficiente de determinación, a parte de lo mencionado antes, es debido a que la estación de referencia cuenta con una resolución de valores discretos de aproximadamente 0.45 m/s a diferencia de lo obtenido por el prototipo, véase Figura 68.

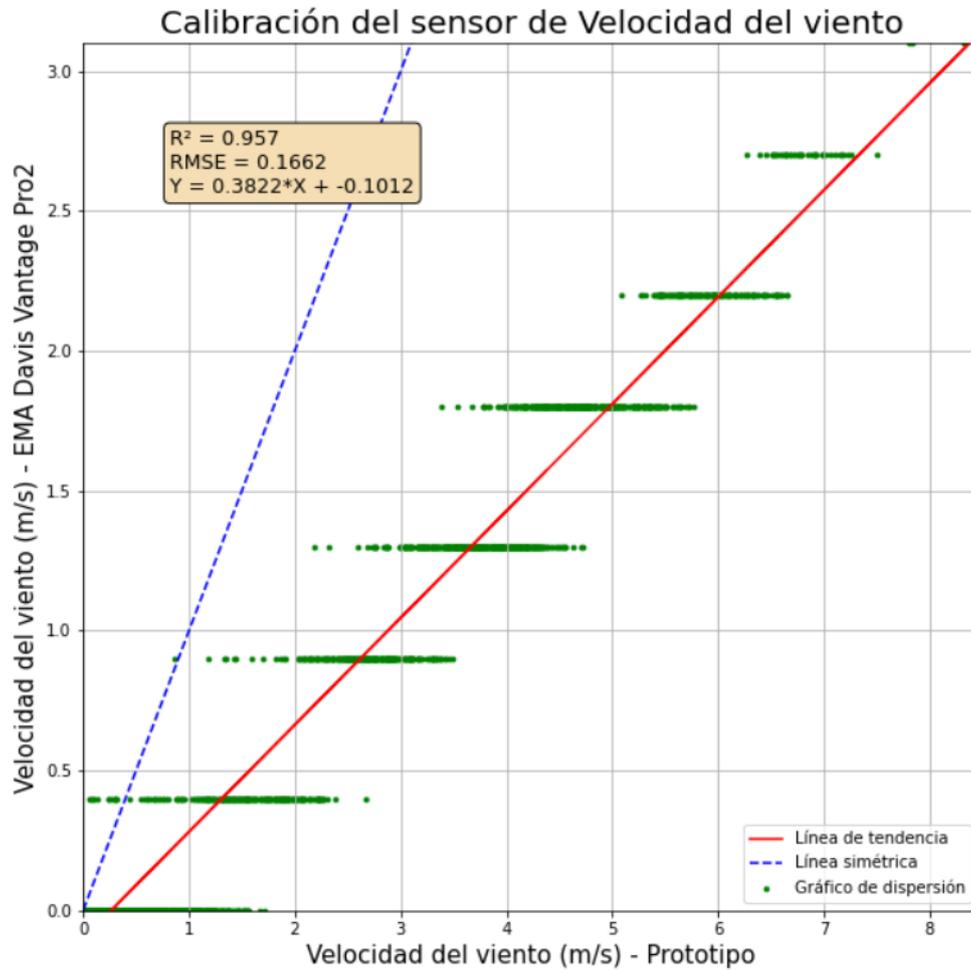


Figura 68: Gráfico de dispersión y curva de calibración de la variable de velocidad del viento del anemómetro del módulo Weather Meters.

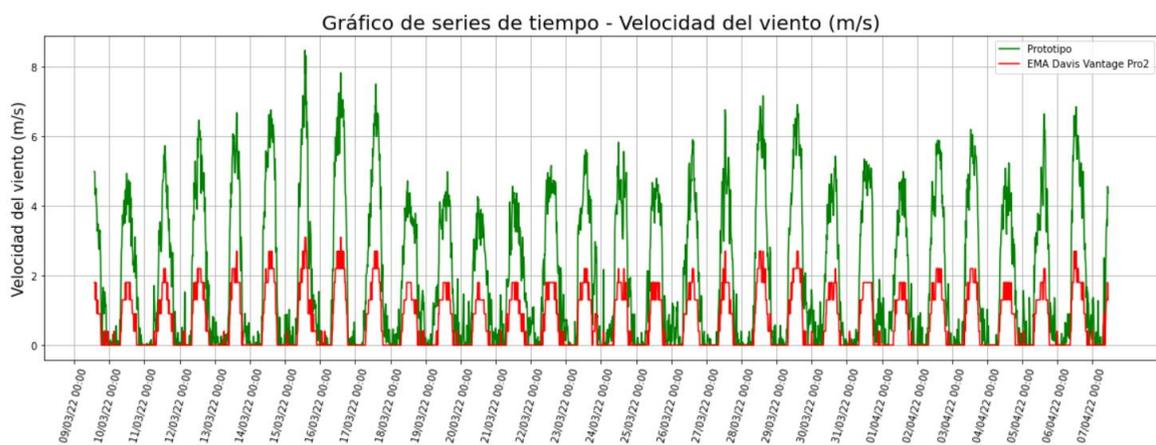


Figura 69: Gráfico de series temporales para la variable de velocidad del viento.

4.6.4. Sensores de radiación solar

En la Figura 70 se muestran los gráficos de las curvas de calibración para las variables de radiación correspondientes a los sensores ML8511 y SI1145, según los cuales se puede apreciar que los registros para las tres variables del sensor SI1145 se ajustan de manera satisfactoria a una curva de regresión lineal simple y los del sensor ML8511 presentan un ligero quiebre para valores de radiación solar altos; no obstante, se puede observar que dichas curvas presentan desfases elevados con respecto a las líneas simétricas, lo cual es causado por la diferencia de unidades y rangos de registro de cada una de las variables de los sensores, siendo estos diferentes a la unidad oficial de la radiación solar (Watts por metro cuadrado).

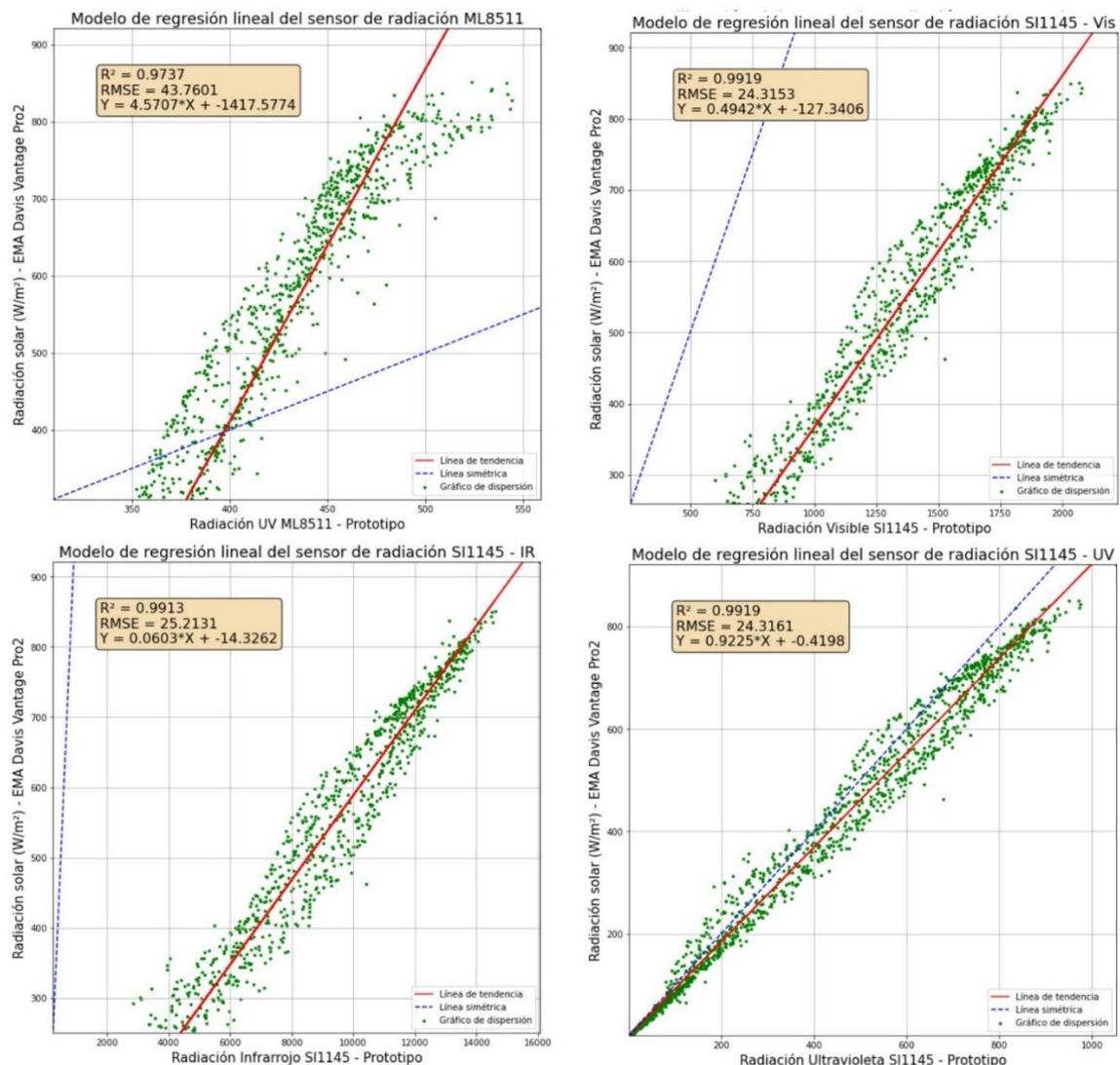


Figura 70: Gráficos de dispersión y curvas de calibración para las variables de radiación de los sensores ML8511 y SI1145.

En la Tabla 14 se presenta un resumen de los parámetros de los modelos de regresión lineal simple para cada una de las variables, teniendo los valores de coeficiente de determinación para el sensor SI1145 iguales a 0.9919, 0.9913 y 0.9919 para los espectros visible, infrarrojo y ultravioleta respectivamente, mientras que para el sensor ML8511 se determina un valor de R^2 igual a 0.9737; además, se muestran las unidades y los rangos de medición en que fueron registradas cada una de las variables individuales, justificando lo mencionado en el párrafo anterior.

Tabla 14: Resultados de los modelos de regresión lineal simple para las variables que determinarán la radiación solar

Variable	Unidad	Coefficiente de determinación (R^2)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Rango de registro
Rad. UV – ML8511	Valores analógicos (0 – 1023)	0.9737	43.7601	310 – 559
Rad. Visible – SI1145	Lux	0.9919	24.3153	260 – 2222
Rad. Infrarrojo – SI1145	Lux	0.9913	25.2131	251 – 16068
Rad. UV – SI1145	Índice UV x 100	0.9919	24.3161	2 – 1053

Fuente: Elaboración propia.

Luego, en la Tabla 15 se muestran los resultados estadísticos de los modelos de regresión lineal múltiple, aplicados para dos escenarios: el primero, considerando solo las variables registradas por el sensor SI1145 y el segundo, considerando las anteriores y también la variable obtenida del sensor ML8511, pudiendo notar que el segundo modelo se ajusta ligeramente mejor que el primero, con un coeficiente de determinación de 0.9919 para el primer escenario y 0.992 para el segundo, a pesar de que individualmente el sensor ML8511 presenta quiebres para valores altos de radiación y su modelo de regresión lineal simple tiene un R^2 menor a los del otro sensor. Burgt (2020) realiza un análisis con múltiples sensores y evaluando modelos de regresión lineal múltiple, determinando que los

sensores SI1145, con sus tres variables, y ML8511 presentan un valor de coeficiente de determinación igual a 0.999118 con respecto a un sensor de radiación de la marca Davis.

Tabla 15: Resultados de los modelos de regresión múltiple para las variables que determinarán la radiación solar

Variab	Coeficiente de determinación (R²)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Función de calibración
Rad. Visible, Infrarrojo, UV – SI1145	0.9919	24.2798	$Y = 0.8417 * RSI-Vis + 0.0092 * RSI-IR - 0.7896 * RSI-UV - 218.7325$
Rad. UV – ML8511;			$Y = 0.3724 * RML + 1.0239 * RSI-Vis + 0.0109 * RSI-IR -$
Rad. Visible, Infrarrojo, UV – SI1145	0.992	24.0699	$1.2285 * RSI-UV - 381.6753$

Fuente: Elaboración propia.

Nota: RSI-Vis corresponde a la variable de radiación en el espectro visible del sensor SI1145, RSI-IR, a la variable de radiación en el espectro infrarrojo del sensor SI1145; RSI-UV, a la variable de radiación en el espectro ultravioleta del sensor SI1145 y RML a la variable de radiación en el espectro ultravioleta del sensor ML8511.

Guerra Hidalgo et al. (2013) utiliza coberturas especiales para reducir los valores de radiación solar que incidirán sobre el prototipo de piranómetro sin la necesidad de alterar las dinámicas en los gráficos de series temporales ni en sus curvas de regresión, no obstante, el tipo de cobertura utilizada en este proyecto tiene la finalidad de proteger a los sensores de la intemperie mas no atenuar la radiación, pero a pesar de ello, si tiene un cierto grado de atenuación sobre todo si no hay un mantenimiento rutinario, en contraste con lo planteado por Burgt (2020), el cual determina sus parámetros estadísticos, mencionados en el párrafo anterior, en una primera fase exponiendo los sensores a la incidencia directa del sol y en un periodo más corto, lo que podría explicar su mejor desempeño sobre este prototipo.

Finalmente, los coeficientes y valor de intersección escogidos para la determinación de la función de calibración corresponden al modelo que incluye como variables independientes a las cuatro variables extraídas de ambos sensores, véase Tabla 15, ya que presentó el valor de R^2 más alto y RMSE más bajo.

4.6.5. Sensor de dirección del viento

En la Figura 71 se muestra los resultados obtenidos por la prueba de calibración manual, en la cual, para cada punto cardinal se registró un grupo de valores analógicos cuyas medidas de dispersión y tendencia central se muestran en la Tabla 16 y es a partir de estos parámetros que se pueden determinar los valores analógicos de referencia que serán incluidos en el programa del prototipo para la medición de esta variable.

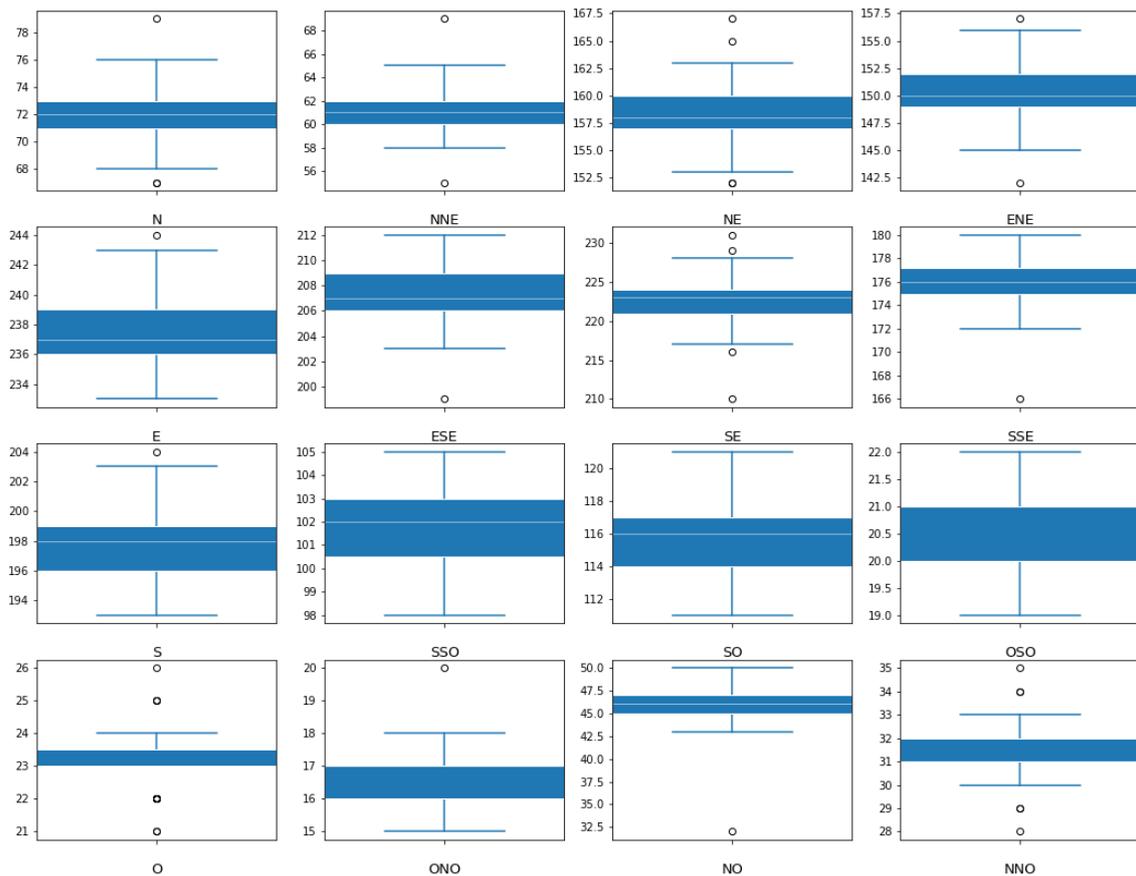


Figura 71: Gráfico de cajas para cada punto cardinal del sensor de dirección del viento.

Tabla 16: Datos estadísticos para la calibración de la variable de dirección del viento

Puntos cardinales	N	Media	Desviación Estándar	Mín.	25%	50%	75%	Máx.	Moda	Valor escogido
N	172	72.01	1.8543	67	71	72	73	79	72	77
NNE	73	61.14	1.7346	55	60	61	62	69	61	63
NE	104	158.14	2.5214	152	157	158	160	167	158	162
ENE	69	150.65	2.5078	142	149	150	152	157	150	153
E	91	237.46	2.2276	233	236	237	239	244	237, 238	256
ESE	66	207.41	2.3003	199	206	207	209	212	207	211
SE	127	222.71	2.7142	210	221	223	224	231	222	230
SSE	68	176.12	2.3597	166	175	176	177.25	180	176, 177	180
S	74	197.8	2.1707	193	196	198	199	204	198	202
SSO	67	101.79	1.8302	98	100.5	102	103	105	103	105
SO	78	115.59	2.3600	111	114	116	117	121	116	121
OSO	67	20.79	0.5913	19	20	21	21	22	21	21
O	75	23.13	0.8436	21	23	23	23.5	26	23	24
ONO	70	16.37	0.8017	15	16	16	17	20	16	17
NO	77	45.88	1.9866	32	45	46	47	50	46	48
NNO	83	31.66	1.1183	28	31	32	32	35	32	33

Fuente: Elaboración propia

Netto & Arigony-Neto (2019) determinan mediante el método de comparación con una estación de referencia Campbell, que la variable de dirección del viento no presenta una buena correlación debido a que el equipo desarrollado y el de referencia tienen diferentes resoluciones en sus sensores, de la misma forma, el sensor del módulo Weather Meter presenta las mismas condiciones. Por ello, se optó por evaluar los valores de referencia proporcionados por la hoja de datos del producto, cuyas características eléctricas son

diferentes a las del prototipo y esa fue la razón por la que se evaluó nuevamente el dispositivo y se calibró. (Argent Data Systems, s/f)

4.7. Evapotranspiración del cultivo de referencia

4.7.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

En la Figura 94 del ANEXO 3 se presenta el algoritmo o diagrama de flujo resultante de la serie de cálculos necesarios para la determinación de la evapotranspiración de referencia, teniendo los valores constantes planteados al inicio del diagrama: latitud, longitud y elevación de la zona de instalación, altura del anemómetro y el periodo entre cada medición; luego las variables de medición determinadas por el registro de los sensores, y finalmente, una serie de procedimientos que corresponden al cálculo de todos los parámetros requeridos para el cálculo de la evapotranspiración como: la constante psicrométrica (γ), la radiación solar neta (R_n), el flujo de calor del suelo (G), la velocidad del viento a 2 metros (u_2), la presión de vapor de saturación a la temperatura indicada (e_o) y la presión real de vapor (e_a).

Dicho algoritmo se incluyó en el programa principal del prototipo, el cual se muestra en el ANEXO 4, específicamente en la sección de las funciones definidas por el usuario, el cual fue elaborado basado en el diagrama de flujo y las consideraciones descritas por la FAO (Allen et al., 2006).

4.7.2. Comparación de la variable de evapotranspiración

En la Figura 72 se muestra el gráfico de dispersión para los datos calculados de la variable de evapotranspiración, por el método de Penman-Monteith a partir de datos climáticos registrados cada 15 minutos por la estación de referencia y los datos de evapotranspiración observados por la misma estación; mostrando que existe un alto valor de correlación con un R^2 igual a 0.9959, el cual es muy próximo a 1.0, un valor de pendiente de 0.9969 e intersección con el eje igual a -0.0015 , lo que demuestra que el algoritmo para el cálculo de la evapotranspiración de referencia presenta un buen desempeño y el algoritmo no requiere de un factor de calibración.

Potencialmente uno de los aspectos por el que la curva no se ajusta totalmente a 1.0 o existe un error apreciable, es debido a los criterios utilizados para el cálculo, tales como:

- La selección del método para el cálculo de R_{s0} , Perera et al. (2015) demuestra que el mejor para estimar los valores de evapotranspiración tanto con el método FAO Penman-Monteith como con el método ASCE, es el complejo (Ecuación (28)), es decir, el que considera los índices K_B y K_D para su determinación.
- El valor de R_2/R_{s0} considerado para el cálculo de la radiación de onda larga durante la noche, ya que la FAO recomienda un valor de 0,4 a 0,6 en climas húmedos y subhúmedos y 0,7 a 0,8 en climas áridos, el prototipo optó por 0.5. (Allen et al., 2006)
- La consideración del uso del método ASCE para el cálculo, el cual se basa en el método de la FAO, pero considerando una resistencia superficial diferente para periodos diurnos y nocturnos, y el cálculo de la evapotranspiración para periodos de 15 minutos que fueron sumados a periodos de una hora, debido a que la estación de referencia registra la variable en periodos horarios. Algunos estudios demostraron que existe diferencias de sobre o sub estimación de la variable de evapotranspiración de acuerdo al método utilizado, los periodos de tiempo considerados para el cálculo, la zona de medición y la estación del año. (Ji et al., 2017; Perera et al., 2015; Suleiman & Hoogenboom, 2009)

Finalmente, es importante mencionar que los datos observados por la estación de referencia fueron corregidos en gabinete, debido a la presencia de valores por encima de 0.0 para periodos nocturnos, en los cuales, por las condiciones climáticas húmedas y ausencia de radiación, solo se deberían presentar valores negativos o nulos. Además, los datos negativos del prototipo fueron filtrados y convertidos a 0.0.

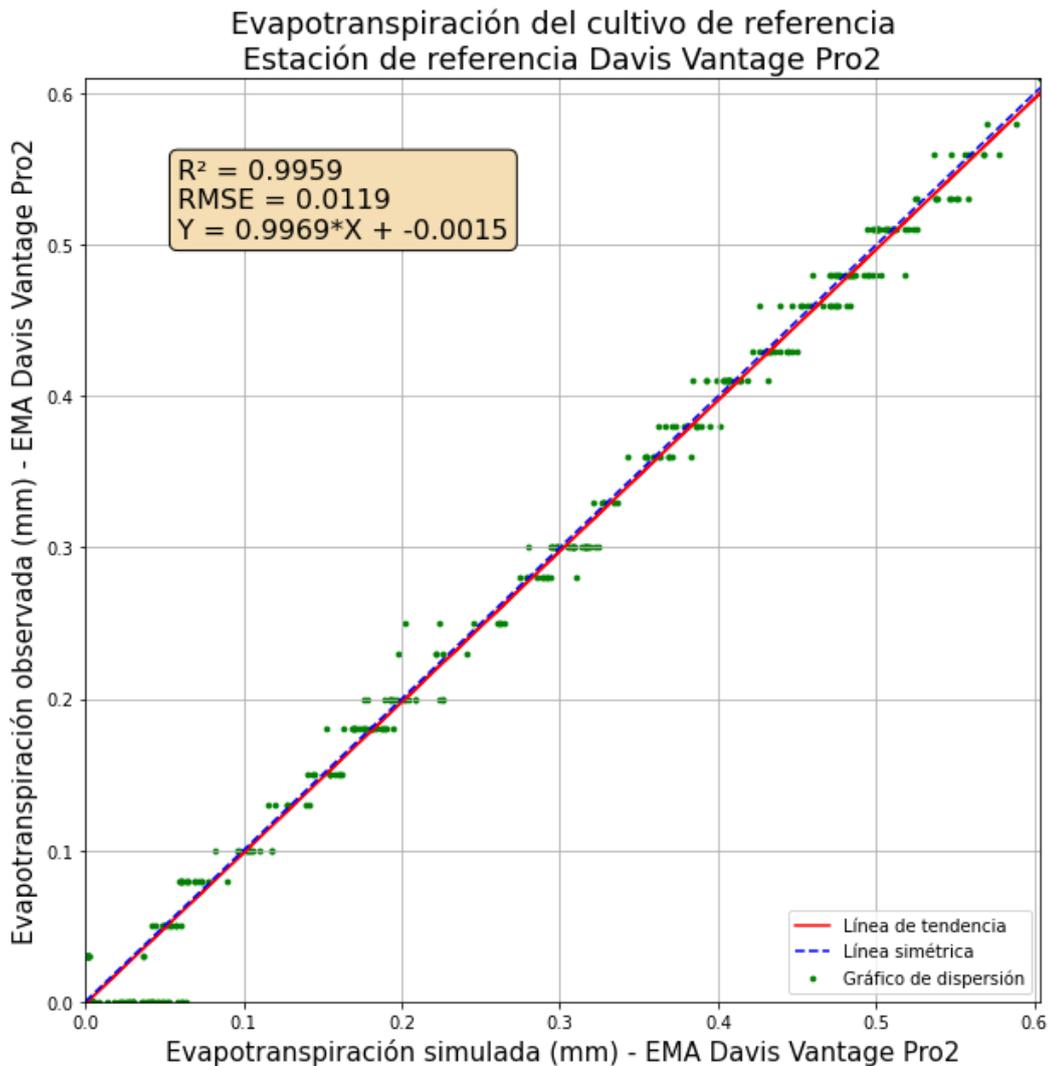


Figura 72: Comparación de la ET_0 calculada y observada de la estación de referencia

Los registros de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) para el prototipo se determinaron mediante el método de Penman-Monteith de la FAO, utilizando los datos de las variables de interés registrados por dicho equipo, los cuales fueron convertidos mediante las funciones de calibración determinadas en la fase de calibración, y calculados en intervalos de 15 minutos, dichos registro fueron convertidos mediante la suma aritmética a registros horarios. Por ello, el registro de datos cuenta con un muestreo de 694 datos en periodos horarios, de los cuales cinco fueron tomados como nulos para el prototipo y uno para la estación Davis a causa de valores nulos en uno o todos los registros de las variables de interés, según se determinó anteriormente en la calibración de los sensores, obteniendo finalmente un registro total de 688 datos para analizar.

En la Figura 73 se muestra el resultado del análisis entre ambos conjuntos de datos, donde se aprecian dos casos: en el lado izquierdo se muestra la comparación considerando tanto los valores diurnos como los nocturnos, mientras que, en el derecho, la comparación convirtiendo todos los valores negativos en cero. Aquellos periodos nocturnos presentaron valores negativos a causa de la ausencia de radiación de onda corta y la presencia de la radiación de onda larga, determinando valores negativos en la radiación neta.

La comparación para el primer caso determina un alto valor del R^2 igual a 0.9922, pero con una curva de ajuste que para valores altos de ET_o sobreestiman ligeramente los valores del prototipo, mientras que para valores pequeños los subestiman en menor medida. Además, el error máximo encontrado fue de 0.064 mm, el cual generalmente correspondía a registros de las 18:00 horas, en las cuales, la estación de referencia registró valores de 0.0 mm y el prototipo, un valor superior; y un RMSE de 0.0163.

Luego, en el segundo caso donde se reemplazan con cero a los valores negativos, se obtiene la gráfica de la derecha, encontrando un mejor ajuste con un R^2 igual a 0.9926 y una curva más próxima a la recta de pendiente 1:1, mientras que el error máximo se mantiene con el valor de 0.064 mm, pero con un RMSE ligeramente mejor de 0.0158.

Suleiman & Hoogenboom (2009) determina que los valores de ET_o calculados a partir de la suma a escala diaria de los valores obtenidos en periodos de quince minutos sobreestiman a los valores de ET_o calculados a escalas diarias mediante la ecuación FAO Penman-Monteith correspondiente a dicho periodo, obteniendo cocientes entre el primero sobre el segundo, mayores a 1.0, dicho análisis se realizó considerando registros climáticos de un año. En contraste, Córdova et al. (2013) evalúa la determinación de la evapotranspiración con las ecuaciones de Penman-Monteith descrita en la FAO56 en diferentes escalas temporales, donde concluye que, existe una sobreestimación de aproximadamente 10 % entre las medianas de valores mensuales y diarios calculados, y hasta 20 % entre las medianas de valores mensuales y horarios calculados, todo ello en un clima de alta montaña.

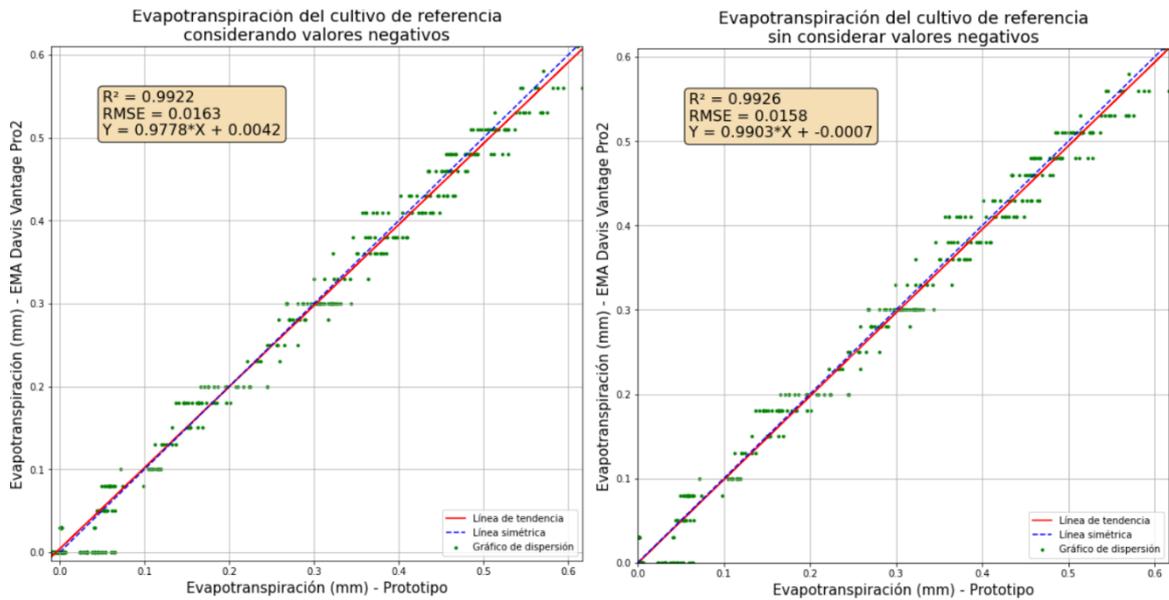


Figura 73: Gráficos de dispersión para la variable de evapotranspiración calculados en periodos horarios, para el prototipo y la estación de referencia: a la izquierda considerando valores negativos y a la derecha sin considerarlos.

La Figura 74 y la Figura 75 muestran los valores de evapotranspiración a escala diaria obtenidos a partir de la suma de los valores calculados cada 15 minutos para el prototipo y la suma de los valores registrados cada hora para la estación de referencia, determinando que el prototipo tiende a subestimar a la estación de referencia cuando se consideran los valores negativos, mientras que al reemplazarlos por cero, sucede lo opuesto, es decir la tendencia es a sobreestimar, pero mejorando los parámetros de la recta de tendencia, ajustando mejor el modelo. No obstante, los valores de RMSE y R^2 cuando no se consideran los valores nocturnos se presentan ligeramente desfavorables con respecto a cuando sí se los consideran.

Adicionalmente, el valor de R^2 para dichos valores diarios resulta más desfavorable a los obtenidos por periodos horarios, principalmente cuando no se consideran los valores negativos, en otras palabras, el modelo se desempeña mejor cuando se calculan los datos de manera horaria y sin considerar registros negativos en horarios nocturnos.

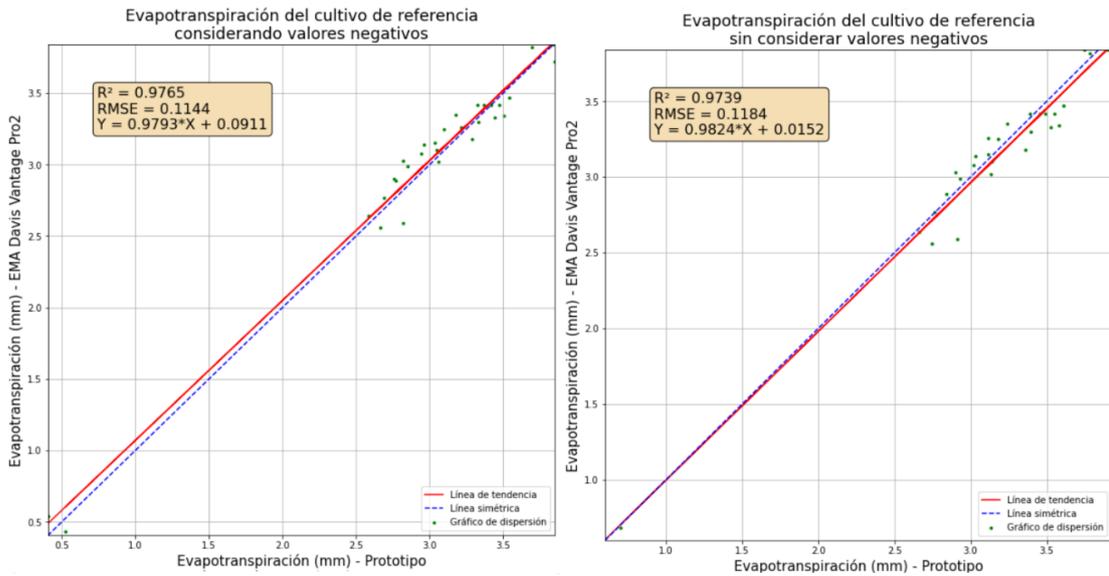


Figura 74: Gráfico de dispersión entre los valores de evapotranspiración a escala diaria, para el prototipo y los de la estación de referencia: a la izquierda considerando valores negativos y a la derecha sin considerarlos.



Figura 75: Gráficos de series de tiempo para ET₀ a escalas diarias, obtenidos a partir de la suma de valores a escalas menores: arriba considerando valores negativos y abajo, sin considerarlos

Perera et al. (2015) demuestra el efecto de los valores negativos obtenidos durante periodos nocturnos, demostrando que utilizando valores de ETo, calculados durante el invierno por el método de Penman-Monteith, considerando la suma de todos los datos horarios en 24 horas se ajustan mejor que solo considerando los datos horarios de las horas con la luz del día, presentando valores de R² y RMSD desfavorables.

4.8. Validación de datos

En la Tabla 17 se aprecia un resumen descriptivo de las variables registradas por el prototipo para esta fase, los cuales fueron tomados con una frecuencia de un minuto desde el 5 de mayo de 2022 a las 17:55 hasta el 11 de mayo de 2022 a las 12:22, teniendo un total de 8308 registros para todas las variables a excepción de la variable de radiación solar, del cual se identificaron dos registros atípicos que fueron retirados, estos corresponden a las fechas y horas: 2022-05-07 19:30:00 y 2022-05-10 10:11:00, por lo tanto, para la variable de radiación y, en consecuencia, la de evapotranspiración se cuentan con 8306 registros.

Tabla 17: Resumen descriptivo de los datos registrados por el prototipo para la fase de validación

Variable	Unid.	Media	Desviación Estándar	Valor mínimo	1er cuartil	Mediana	3er cuartil	Valor máximo
Temperatura del aire	°C	17.98	2.48	13.46	16.37	17.17	19.60	24.17
Humedad relativa del aire	%	84.46	7.37	65.79	78.62	86.79	90.62	94.06
Presión barométrica	hPa	988.02	1.50	982.94	987.22	988.26	989.11	990.71
Velocidad del viento	m/s	0.48	0.59	0.00	0.00	0.23	0.80	2.57
Radiación solar	W/m ²	153.85	239.49	-1.43	0.03	0.79	215.53	753.75
Evapotranspiración de referencia	mm	0.001384	0.002179	0.00	0.00	0.00	0.001886	0.007249

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Resumen descriptivo de los datos resumidos a partir de los registrados por el prototipo para la fase de validación

Variable	Unid.	Media	Desviación Estándar	Valor mínimo	1er cuartil	Mediana	3er cuartil	Valor máximo
Resumen descriptivo de variables resumidas en intervalos de 15 minutos								
Temperatura del aire	°C	17.98	2.48	13.5	16.37	17.15	19.57	23.81
Humedad relativa del aire	%	84.47	7.37	67.14	78.62	86.76	90.53	93.99
Presión barométrica	hPa	988.02	1.51	983	987.22	988.26	989.12	990.68
Velocidad del viento	m/s	0.48	0.56	0	0.04	0.21	0.77	1.97
Radiación solar	W/m ²	153.8	239.28	-0.32	0.04	0.55	219.66	748.18
Resumen descriptivo de variables resumidas en intervalos de 1 hora								
Evapotranspiración del cultivo de referencia	mm	0.09	0.15	0.00	0.00	0.00	0.12	0.46

Fuente: Elaboración propia.

Luego, en la Tabla 18 se muestra la información resumida en periodos de 15 minutos para las variables de temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento y radiación solar a través del promedio de los datos comprendidos en dichos periodos, obteniéndose un total de 553 registros para todas las variables a excepción de la de radiación solar, la cual resultó tener un total de 551 registros, dos menos que las demás variables por la presencia de valores nulos en algunos intervalos de tiempo; también se muestra el resumen de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia en periodos de una hora, obtenidos a través de la suma de los datos comprendidos en dichos periodos, esto con la finalidad de homogenizar la información registrada por el prototipo y aquella registrada por la estación de referencia, obteniéndose un total de 136 registros.

Los datos resumidos descritos en la Tabla 18, fueron comparados con los datos de las mismas variables de interés registrados por la estación de referencia Davis Vantage Pro2, la misma que fue utilizada en la fase de calibración, en consecuencia, en la Tabla 19 se muestran los indicadores estadísticos que evalúan el desempeño del conjunto de datos registrados por el prototipo considerando los factores de calibración determinados en la previamente, dichos indicadores se muestran en los encabezados en forma de abreviaturas donde: “d” corresponde al índice de concordancia o Willmott; “RMSE”, a la raíz del error cuadrático medio; “ME”, al máximo error; “EAM”, al error absoluto medio; “E”, al índice de Nash-Sutcliffe; “m”, a la gradiente de la recta de tendencia y “b”, a la intersección de dicha recta con los ejes.

A continuación, se discuten los indicadores estadísticos obtenidos a partir de los datos observados por la estación de referencia:

- Las variables de temperatura del aire, humedad relativa del aire, evapotranspiración y radiación solar determinan los valores más altos de d y E de manera decreciente y en dicho orden para ambos indicadores, mientras que las variables de presión atmosférica y velocidad del viento cuentan con valores más bajos y son ordinalmente opuestos. Según Krause et al. (2005), para modelos con errores de sobreestimación o subestimación, el índice de concordancia no es sensible ante dichos errores y el índice de Nash-Sutcliffe es poco sensible, asimismo para cada una de las variables observadas por la estación de referencia se repite este comportamiento, es decir, los valores de d se mantienen altos y mayores a 0.98, mientras que los valores de E tienen un rango de 0.85 a 0.99, indicando que este último es mucho más sensible ante errores que el primer indicador estadístico.
- El orden de los valores de R^2 de las variables evaluadas van desde el mayor correspondiente por la radiación solar, seguido por las variables de temperatura del aire, evapotranspiración, humedad relativa del aire, presión barométrica y velocidad del viento; en orden descendente, dicho orden es diferente al presentado por los indicadores d y E, a excepción del caso de las variables de presión barométrica y velocidad del viento que se encuentran entre aquellos con los valores más bajos para los tres indicadores.

- Luego, el rango de valores de R^2 oscila entre 0.96 y 0.99, lo que determina un grado de sensibilidad pobre como el índice de Willmott y es diferente en cuanto al orden de valores calculados para cada variable. Krause et al. (2005) encuentra que el criterio del indicador R^2 por sí solo no es muy confiable para determinar la validez de un modelo debido a su baja sensibilidad ante los errores sistemáticos, por ello es necesario que este sea evaluado en conjunto con la pendiente y la intersección de la recta de tendencia para considerarlo como un indicador más preciso.
- Adicionalmente, la pendiente de la recta de tendencia se encuentra mucho más próxima al valor deseado de 1.0 para la variable de presión barométrica, seguida de las de humedad relativa del aire, temperatura del aire, evapotranspiración, radiación solar y velocidad del viento; en un rango comprendido entre 0.79 y 1.38, determinando que hay variables que se encuentran sobreestimadas y otras subestimadas, y que es lo que hace que el orden de los valores de R^2 sean diferentes a los de d y E .
- El grado de error de las mediciones en la fase de validación se puede percibir más claramente con los indicadores RMSE, ME y EAM. De manera comparativa, todas las variables se ordenan de manera descendente comenzando con la variable de radiación solar que presenta mayor error que las demás, seguidas de las variables de humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento, temperatura del aire y evapotranspiración; excepto para EAM, cuya única diferencia es que el error en la variable de temperatura es mayor a la de la velocidad del viento. No obstante, esto solo confirma que los tres indicadores mencionados tienen la misma tendencia en cuanto a grado de error, pero el orden descrito no es determinante ya que cada variable oscila en un rango diferente de valores.

Tabla 19: Índices estadísticos

	d	RMSE	R²	ME	EAM	E	m	b
Temperatura del aire (°C)	0.9983	0.2085	0.9963	0.6572	-0.1272	0.9933	1.0242	-0.5621
Humedad Relativa del aire (%)	0.9948	1.0522	0.9883	3.7728	0.6818	0.9789	0.9780	2.5362
Presión barométrica (hPa)	0.9647	0.5818	0.9733	1.1449	-0.5234	0.859	1.0155	-15.8766
Velocidad del viento (m/s)	0.9602	0.268	0.9654	0.9571	0.0801	0.8834	1.3739	-0.1008
Radiación Solar (W/m²)	0.9812	59.1036	0.9966	164.8421	-32.3611	0.9045	0.7985	-1.3680
Evapotranspiración (mm)	0.9871	0.0308	0.9904	0.0923	-0.0158	0.9385	0.8404	-0.0009

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se analiza individualmente cada una de las variables observadas por el prototipo con respecto a las observadas por la estación de referencia, mediante gráficos de regresión lineal simple y de series temporales, tomando en consideración los indicadores estadísticos presentados anteriormente.

4.8.1. Temperatura del aire

Esta variable cuenta con valores de d y E de 0.9983 y 0.9933 respectivamente y son a su vez los más altos con respecto a las demás variables lo que a primera instancia demuestra que las mediciones obtenidas por el prototipo son altamente fiables. Aquello se puede reforzar considerando el valor de R², con el valor más alto de 0.9963, que está por encima del determinado en la fase de calibración, indicando que el modelo de validación es satisfactorio en dicho aspecto. Además, se observa que el valor de R² se encuentra por debajo del obtenido para la radiación solar, cuando este se encontraba en el cuarto lugar en cuanto a valores de d y sobre todo de E, determinando una incoherencia que es explicada

porque R^2 por sí solo tiene un grado de sensibilidad bajo, mientras que en la Figura 76 y la Figura 77 se puede observar que los valores registrados por el prototipo tienden a sobreestimar a los observados por la estación de referencia cuando se les aplica los factores de calibración determinados y de manera más enfatizada en los valores más bajos; esto conlleva a que la pendiente de la recta de tendencia se encuentre un tanto alejada al valor de 1.0 y que exista un desfase correspondiente a la intersección en un valor mayor a la exactitud tolerada.

Luego, el valor de RMSE se encuentra mínimamente mayor a la exactitud requerida igual a ± 0.2 °C, pero menor a la exactitud del sensor SHT31 igual a ± 0.3 °C, mientras que el valor de EAM se encuentra por debajo, determinando que el modelo de validación tiene un buen grado de precisión, sin embargo, el valor de máximo error se encuentra muy por encima de la exactitud requerida y corresponde al registro de la fecha 7 de mayo de 2022 a las 8:30, lo que indica que existen valores que están por encima de la exactitud requerida.

Finalmente, un factor a tener en cuenta para los errores obtenidos por el modelo es el rango de valores de observación considerado para la fase de calibración y la de validación, ya que estos tienen una diferencia en cuanto a los periodos de tiempo de medición, en la primera se cuenta con un rango aproximado desde 18 °C a 30 °C, mientras que, en la fase de calibración, desde 14 °C a 23 °C y es notable que el modelo se ajusta mejor para los valores más altos, pero no para los más bajos que no fueron considerados en la fase de calibración.

Gráfico de dispersión - Validación de la variable: Temperatura del aire (°C)

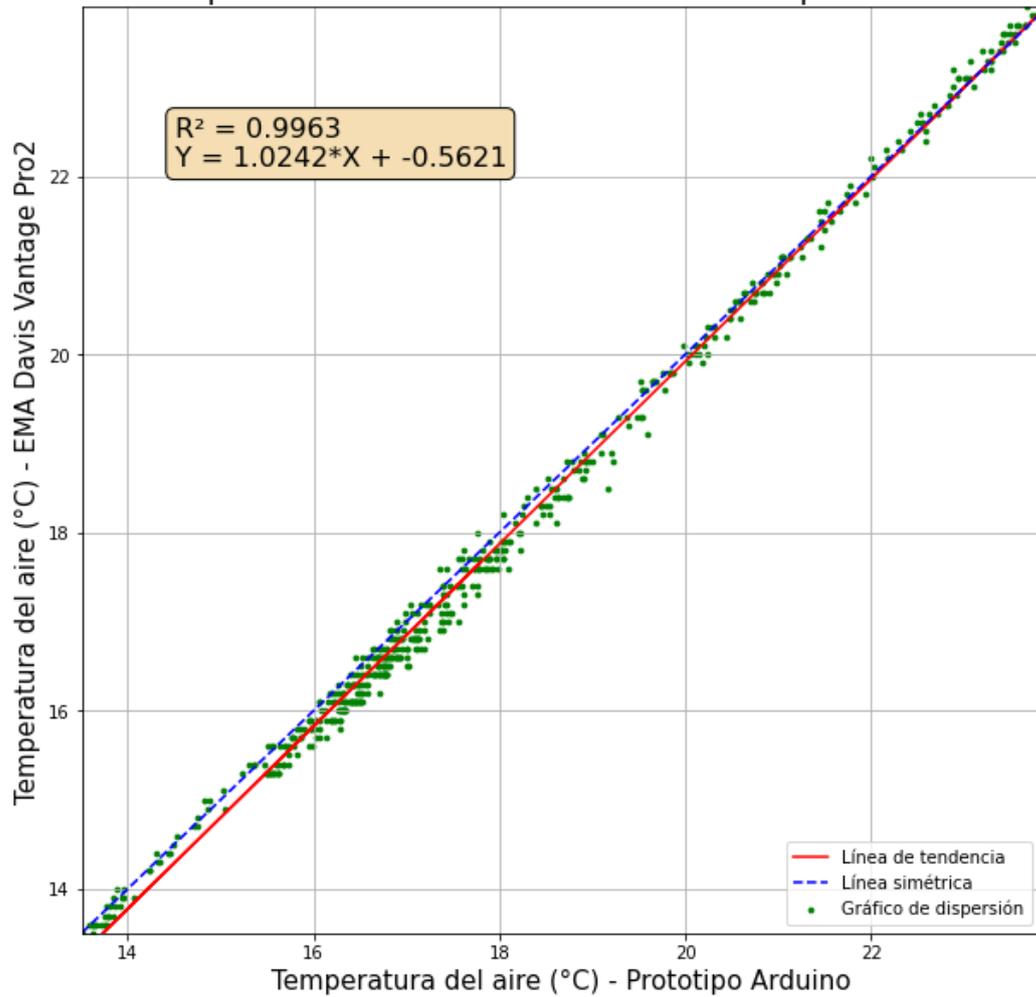


Figura 76: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de temperatura del aire.

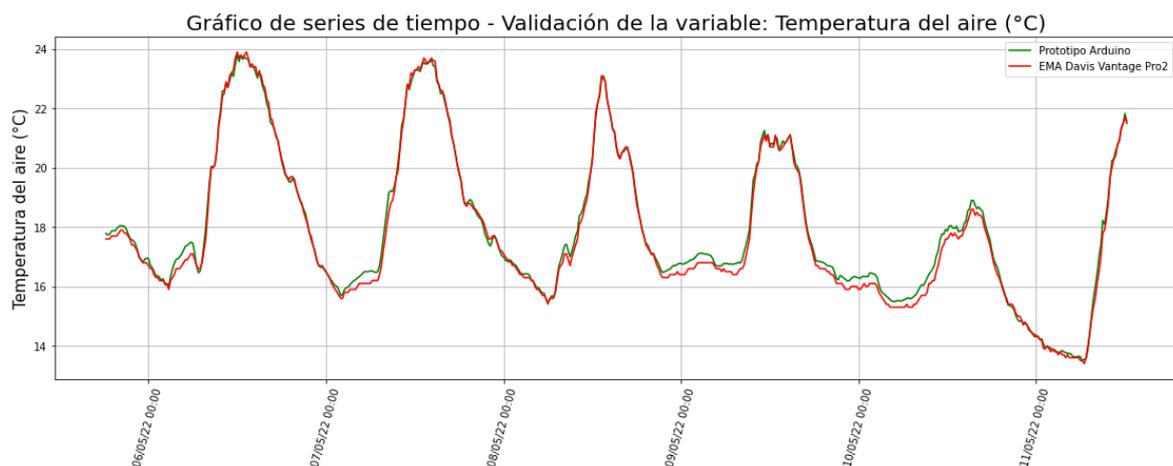


Figura 77: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de temperatura del aire.

4.8.2. Humedad relativa del aire

Esta variable se encuentra en el segundo lugar, luego de la de temperatura del aire, de los valores más altos para los indicadores d y E, iguales a 0.9948 y 0.9789 respectivamente, demostrando que las observaciones del prototipo son muy buenas y equiparables a las de la estación de referencia. En cuanto al valor de R^2 igual a 0.9883, el cual junto al valor de E indican que existe una ligera reducción en la exactitud de las observaciones del prototipo, lo que es reforzado por la posición de R^2 respecto a las demás variables, ubicándose en el cuarto lugar y siendo desplazado por las variables de evapotranspiración y radiación solar, opuesto a lo observado en el orden para los indicadores d y E. Adicionalmente, el valor de R^2 se encuentra por debajo del obtenido en la fase de calibración, determinando que los factores de calibración aplicados al prototipo no son los más adecuados, sin embargo, el valor de m igual a 0.978 se encuentra más cercano a 1.0 que su análogo en la fase de calibración demostrando que en cuestión de tendencia el modelo de validación es mejor.

En la Figura 78 se muestra que la recta de tendencia de los datos observados comparados con los de la estación de referencia se encuentran muy cercanos a una recta simétrica, pero con una ligera subestimación de los primeros en un rango de aproximadamente 68 % a 95 %, además en la Figura 79 se refuerza dicho fenómeno para casi todo el periodo evaluado, aunque siguen una misma tendencia. El valor de la intersección determina que para un valor de 0.0 % en lo observado por la estación de referencia, correspondería un valor de 2.5362 %, el cual se encuentra por debajo de la exactitud requerida de 3% para la variable y por lo tanto es una variación tolerable pero no recomendable.

En cuanto al criterio de indicadores RMSE, ME y EAM; con valores de 1.0522, 3.7728 y 0.6818; de los cuales los valores de RMSE y EAM se encuentran por debajo de la exactitud del sensor SHT31 igual a ± 2 % y a la exactitud requerida de ± 3 %, demostrando que la variable tiene un grado de precisión tolerable, no obstante, el valor del ME demuestra que existen registros con valores que sobrepasan el error tolerable.

A pesar que las dinámicas de ambos registros son similares a lo largo del periodo de medición, como se mencionó anteriormente se encuentran subestimadas las observaciones realizadas por el prototipo este error se pueden deber a la naturaleza del sensor utilizado, el

cual consiste en un sustrato reactivo que capta la humedad y puede llegar a saturarse si no fuese por la acción de la temperatura que incide en la evaporación de la humedad captada, esto se refuerza sobre todo en horario nocturnos en los cuales la temperatura es reducida y la humedad es muy alta. Además, la media de los datos registrados para esta fase es igual a 84.47 % es mayor a la de los registrados en la fase de calibración, igual a 76.7 %, lo que indica que en el periodo de medición de la fase de validación el ambiente se encontraba notablemente más húmedo y por lo tanto la eliminación de la humedad en el sensor requería de mayor energía, lo cual puede incidir en la inexactitud de la aplicación de la función de calibración.

Gráfico de dispersión - Validación de la variable: Humedad Relativa del aire (%)

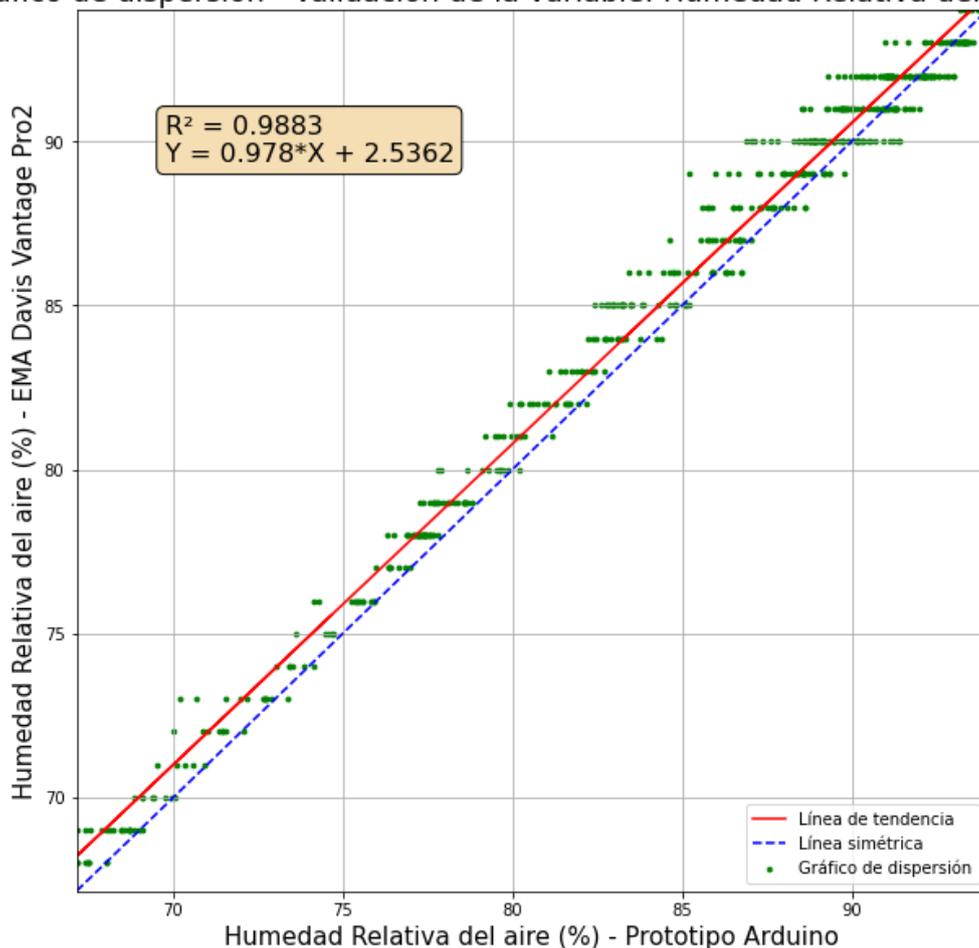


Figura 78: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de humedad relativa del aire.

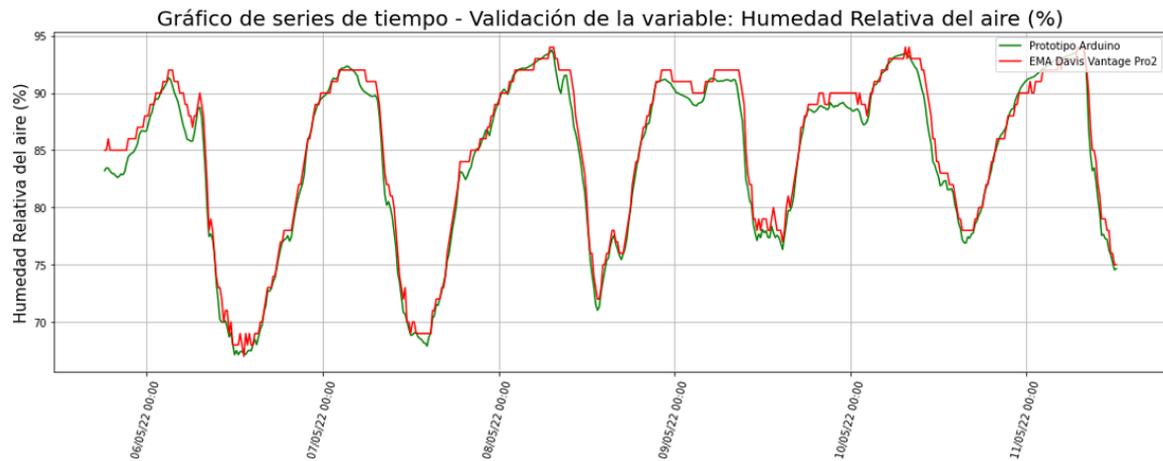


Figura 79: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de humedad relativa del aire.

4.8.3. Presión barométrica

Se puede observar que las mediciones realizadas por el prototipo para esta variable poseen valores muy bajos para los indicadores de d, E y R^2 con valores de 0.9647, 0.859 y 0.9733 respectivamente y se encuentran entre los últimos lugares para los indicadores mencionados con respecto a las demás variables, en especial para el índice de Nash-Sutcliffe que ocupa el último lugar entre las demás variables demostrando que tiene el peor ajuste entre todos. No obstante, el valor de R^2 es mayor al obtenido en la fase de calibración, lo que indica que la función de calibración aplicada ha repercutido positivamente en las observaciones para la fase de validación. En la Figura 80 y en la Figura 81, se pueden apreciar principalmente que las observaciones realizadas por el prototipo sobreestiman a las registradas por la estación de referencia, cuando en la fase de calibración se daba de manera opuesta, además el valor de la pendiente de la recta de tendencia de la fase de validación igual a 1.0155 se encuentra ligeramente mayor a la gradiente en la fase de calibración igual a 1.0146, lo cual demuestra que en el aspecto de linealidad el modelo de validación no ha mejorado, sin embargo, el valor de la pendiente en esta fase posee el valor más cercano al valor ideal de 1.0.

Luego, los valores de RMSE, ME y EAM son iguales a 0.5818, 1.1449 y -0.5234 respectivamente, los cuales se encuentran por encima de la exactitud requerida de ± 0.3 hPa, pero se encuentran dentro del margen de error sugerido por el fabricante del sensor

BME280 igual a ± 1.0 hPa a excepción del máximo error, esto es influenciado principalmente por el error de sobreestimación observado.

Finalmente, los valores registrados por el prototipo poseen una dinámica similar a los observados por la estación de referencia, pero con una sobreestimación de valores, tal como se aprecia en la Figura 81, lo cual determina, junto con los indicadores estadísticos, que en la fase de validación los factores de calibración no ayudaron a corregir dicho problema que se presentó de manera similar en aquella fase, un factor al que se le puede atribuir ello es que en la fase de calibración el máximo valor considerado es de 988 hPa aproximadamente mientras que en esta asciende a casi 991 hPa, lo cual implica una variación de rangos y un clima ligeramente diferente. Es importante mencionar que, durante la fase de calibración, la posición del sensor se encontraba instalado en dirección perpendicular al cenit, mientras que en la fase de validación se instaló en dirección paralela, aquella modificación pudo incidir en cierto grado la toma de datos debido a que el sensor registra la presión de la columna de aire superior.

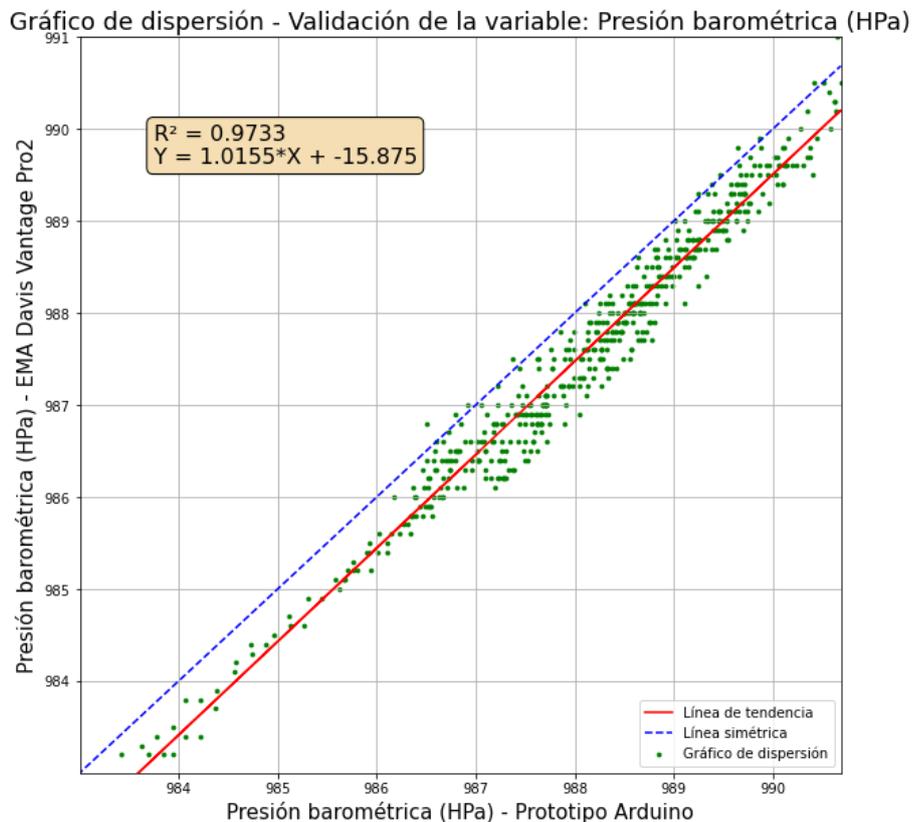


Figura 80: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de presión barométrica.

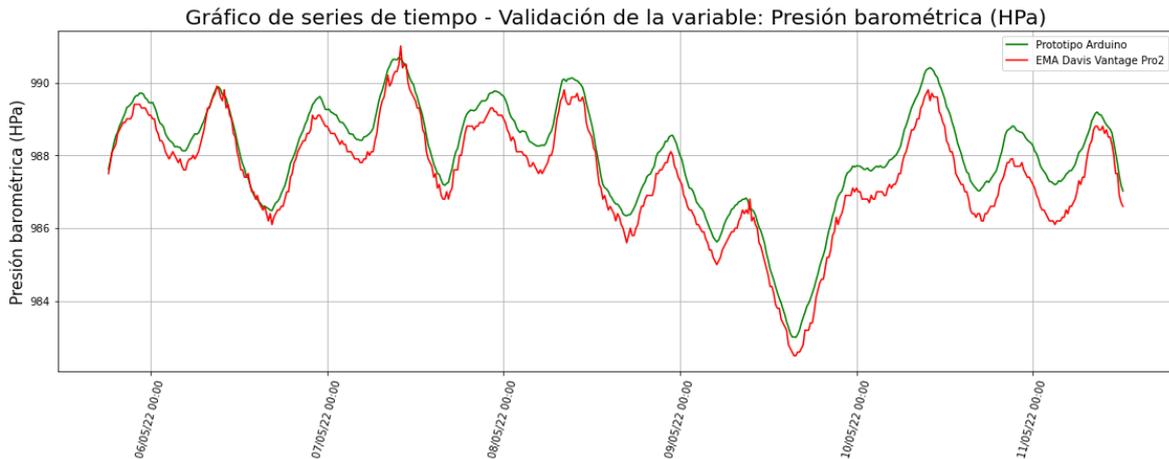


Figura 81: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de presión barométrica.

4.8.4. Velocidad del viento

Esta variable cuenta con valores de d , E y R^2 iguales a 0.9602, 0.8834 y 0.9654 respectivamente, aquellos se encuentran relativamente cercanos a los valores obtenidos para la variable de presión barométrica, es decir, el grado de exactitud y correlación para esta variable es tan bajo como lo es para la previamente mencionada, lo cual queda evidenciado ya que los indicadores de d y R^2 para la variable de velocidad del viento se encuentra en último lugar, mientras que E se ubica en el penúltimo, respecto a todas las variables. A pesar de aquello, el valor de R^2 es mejor que el obtenido en la fase de calibración lo que indica que el modelo ha mejorado, asimismo, los valores de m igual a 1.3739 y b igual a -0.1008 son mejores a los obtenidos en la fase de calibración, sobre todo para el caso de la gradiente que se aproxima de manera mucho más satisfactoria al valor ideal de 1.0, sin embargo, en la Figura 82 y en la Figura 83 se muestra que los datos observados por el prototipo subestiman a los obtenidos por la estación de referencia, cuando en la fase de calibración fue totalmente lo contrario y en un grado mucho más elevado, además de que la recta de tendencia se encuentra notablemente desviada con respecto a la línea simétrica lo que enfatiza que los datos no se encuentran linealizados suficientemente con los valores de la estación de referencia aunque se les haya aplicado un factor de calibración, pero si existe una correlación significativa que se puede observar en la dinámica del gráfico de series temporales.

Los valores de RMSE, ME y EAM son 0.268, 0.9571 y 0.0801 respectivamente, de los cuales el primero y el tercero tienen un valor menor a la exactitud requerida para dicha variable, la cual es igual a ± 0.5 para registros menores a 5 m/s, lo que indica que a pesar de la inexactitud del modelo de validación respaldado por los valores de correlación y concordancia, se encuentran dentro de los límites tolerables a excepción por el máximo error, el cual se debe principalmente a la subestimación de los datos registrados por el prototipo ya que, para valores pico, el error es mucho más elevado que para valores pequeños.

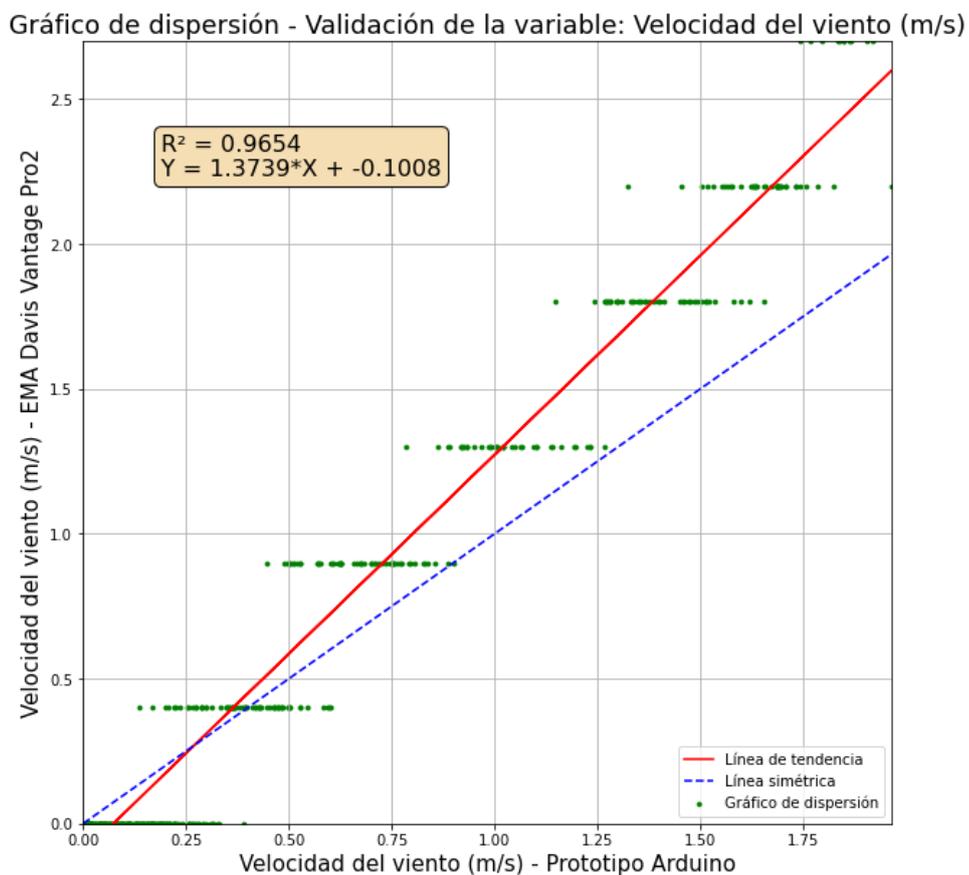


Figura 82: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de velocidad del viento.

En consecuencia, a pesar de utilizar los factores de calibración, el modelo no se ajustó lo suficientemente bien, esto es debido a la limitada resolución de registros de la estación de referencia, de la misma forma que incidió en la fase de calibración, y en especial para los valores iguales a 0.0 m/s en la estación de referencia que corresponden a valores de hasta más de 0.25 m/s para el prototipo, el cual cuenta con una resolución mayor.



Figura 83: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de velocidad del viento.

4.8.5. Radiación solar

Los valores de los indicadores de d y E para la variable de radiación solar se encuentran en el cuarto lugar para ambos, con valores iguales a 0.9812 y 0.9045, los cuales indican que esta variable tendría un cierto grado de inexactitud con respecto a los datos tomados por la estación de referencia, sobre todo por el valor de E , que es el indicador más sensible ante estos fenómenos. No obstante, el valor de R^2 igual a 0.9966 se encuentra por encima de todas las variables, lo que contradice lo planteado anteriormente, además de que adopta un valor superior al obtenido en la fase de calibración, lo que indica que el modelo de validación es bueno en términos de regresión lineal.

En la Figura 84 se puede observar que los puntos graficados se encuentran muy cercanos y la recta de tendencia es representativa de dicho conjunto, lo que respalda el R^2 calculado ya que la correlación es alta, sin embargo, en conjunto con la Figura 85, se puede observar notoriamente que los valores registrados por el prototipo sobreestiman a los registrados por la estación de referencia y eso hace que el valor de la pendiente de la recta de tendencia con un valor de 0.7985 esté alejado del valor ideal igual a 1.0, adicionalmente la dinámica de la gráfica de series temporales para ambos es idéntica. Este comportamiento respalda lo explicado por Krause et al. (2005), quien menciona que para errores sistemáticos de sobreestimación y/o subestimación, los indicadores d y R^2 son insensibles ante dichos errores, mientras que E es poco sensible, por ello los valores de R^2 y d se encuentran muy cercanos al valor ideal de 1.0, mientras que el índice de Nash-Sutcliffe se aleja más pero no

lo suficiente para considerar que el modelo no es adecuado, es necesario observar los gráficos de dispersión y los valores de m y b para determinar si las mediciones son adecuadas o requieren de ajustes adicionales.

Los valores de RMSE, ME y EAM son iguales a 59.1036, 164.8421 y -32.3611 respectivamente, los cuales indican que los valores registrados por el prototipo tienen altos valores de error, considerando que el rango de medición de los valores de referencia va desde 0 a casi 600 W/m². Luego, el máximo error corresponde al registro de la fecha 11 de mayo de 2022 a las 11:15, en el cual el valor de dicho registro es igual a 538.0 W/m² para la estación de referencia, determinando un error de aproximadamente 30% en dicho registro. Organización Meteorológica Mundial (2008, p. I.7-13) determina que para una calidad moderada de medición, la incertidumbre lograda para los totales diarios deberá ser del 10%, pero en la Tabla 20 se observa que para los días evaluados dentro del periodo de validación, los errores porcentuales sobrepasan por mucho al límite necesario, esto se debe a que, a pesar de que el modelo de validación tenga una buena correlación, existe una sobreestimación de datos por parte de los registros del prototipo lo que lo hace un modelo inexacto.

Tabla 20: Determinación el error porcentual para totales diarios de radiación solar

Fecha	Totales diarios para el prototipo (W/m²)	Totales diarios para la estación de referencia (W/m²)	Error porcentual para totales diarios
6/05/2022	18914.8772	15121	25.09%
7/05/2022	16980.9927	13511	25.68%
8/05/2022	17058.6115	13585	25.57%
9/05/2022	17365.6564	13822	25.64%
10/05/2022	4994.8355	3739	33.59%
11/05/2022	9429.54159	7798	20.92%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el modelo representa adecuadamente las dinámicas de la variable de radiación solar para el periodo de validación, pero no sus valores en sí, ya que existe un grado de sobreestimación considerable por parte de los datos del prototipo. A pesar de que las

dinámicas en las series temporales son muy similares entre ambos conjuntos de datos, la dispersión de estos datos no llega a ser igual a 1.0, especialmente para el índice de Nash-Sutcliffe, esto se puede deber a que el valor de radiación del prototipo es calculado a partir de una función de calibración determinada por un modelo de regresión múltiple que se observa en la fase de calibración y donde se puede observar que el sensor ML8511 tiene una tendencia diferente y más inexacta para valores altos que el sensor SI1145, el cual en sus tres rangos espectrales se correlaciona muy bien con los valores de la estación de referencia, esto es provocado principalmente por el mantenimiento del prototipo, ya que ambos sensores se encuentran protegidos por una capa transparente que evita el ingreso de agentes perjudiciales como el polvo o la humedad, el cual con el paso del tiempo tiende a opacarse más si es que no se le hace un mantenimiento rutinario.

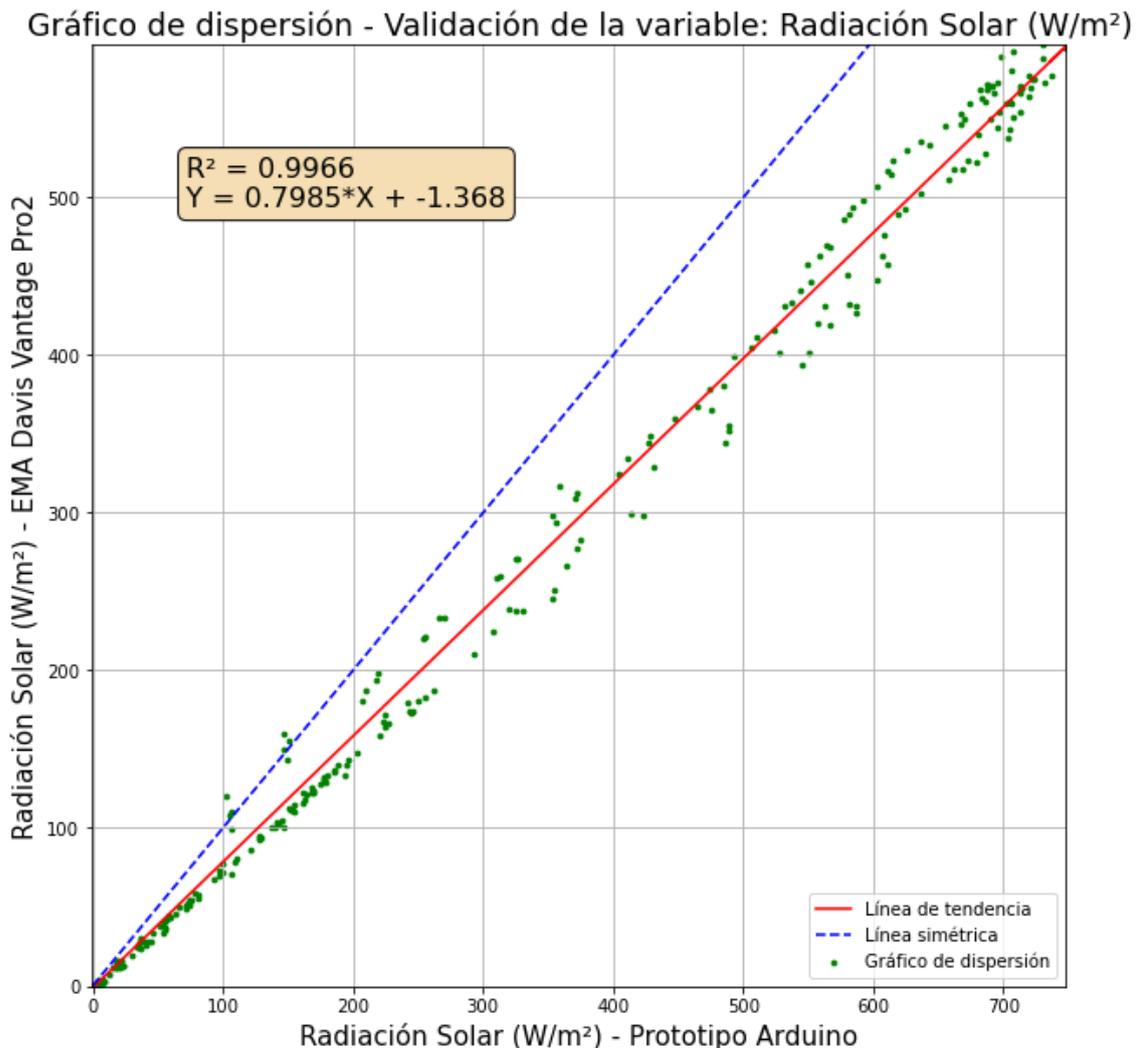


Figura 84: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de radiación solar.

Adicionalmente, es importante mencionar que la posición de los sensores fue diferente en la fase de calibración, en la cual se encontraban dentro de una misma cámara protectora, mientras que en la fase de validación fueron ubicados en diferentes cámaras, aquello pudo influenciar el desfase evidenciado en el valor de la gradiente del modelo de validación.

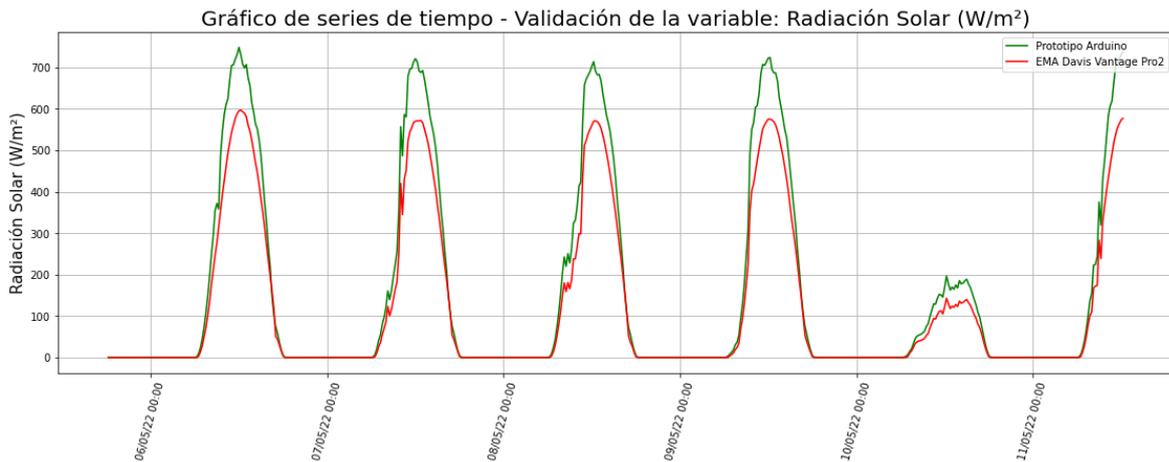


Figura 85: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de radiación solar.

4.8.6. Evapotranspiración del cultivo de referencia

Para esta variable, los valores de los indicadores d , E y R^2 tienen valores iguales a 0.9871, 0.9385 y 0.9904 respectivamente y se ubican en el tercer lugar de los valores más altos para dichos indicadores entre todas las variables de interés, estando por encima de la radiación solar para d y E , lo que indica que tiene un muy buen grado de concordancia con los valores observados por la estación de referencia. En cuanto únicamente al valor de R^2 , este indica que es tan bueno en términos de correlación como lo son las variables de radiación solar y temperatura evaluados previamente, aunque con respecto a la fase de calibración, este indicador ha reducido su desempeño sutilmente. No obstante, el valor de m igual a 0.8404 se encuentra notablemente por debajo del valor ideal de 1.0, lo que quiere decir que tiene un comportamiento similar a la radiación solar, con dinámicas similares y que se pueden observar en la Figura 87, donde los picos y los valores mínimos se encuentran en los mismos periodos, pero con un error de sobreestimación de datos por parte de los registros del prototipo. Además, en la Figura 86 se refuerza ese comportamiento, en la cual la recta de tendencia se encuentra a la derecha de la recta ideal simétrica, similar a lo visto en la variable de radiación solar.

Luego, los valores de RMSE, ME y EAM son iguales a 0.0308, 0.0923 y -0.0158, los cuales, considerando la media del conjunto de datos observador por la estación de referencia, da un valor de 0.076, por lo que el máximo error es mayor que dicha media determinando así un error muy alto, además dicho máximo error corresponde a la fecha 11 de mayo de 2022 a las 11:00 con un valor de 0.28 para la estación de referencia, indicando un error de aproximadamente 27%. En la Tabla 21, se puede apreciar la suma de valores diarios para la evapotranspiración del cultivo de referencia a partir de los datos horarios observados por cada una de las estaciones, se observa que existe una sobreestimación notable de los datos observados por el prototipo, con dichas observaciones se determina la diferencia mediante una resta aritmética para cada registro diario, dichas diferencias oscilan entre 0.29 a 0.44 mm y se encuentran muy por encima de la exactitud requerida para esta variable como totales diarios igual a ± 0.1 mm para cantidades menores a 5 mm, esto se debe a que, de la misma forma que para la variable de radiación solar, el modelo de validación tiene una buena correlación pero existe un error sistemático de sobreestimación lo que hace al modelo inexacto o impreciso.

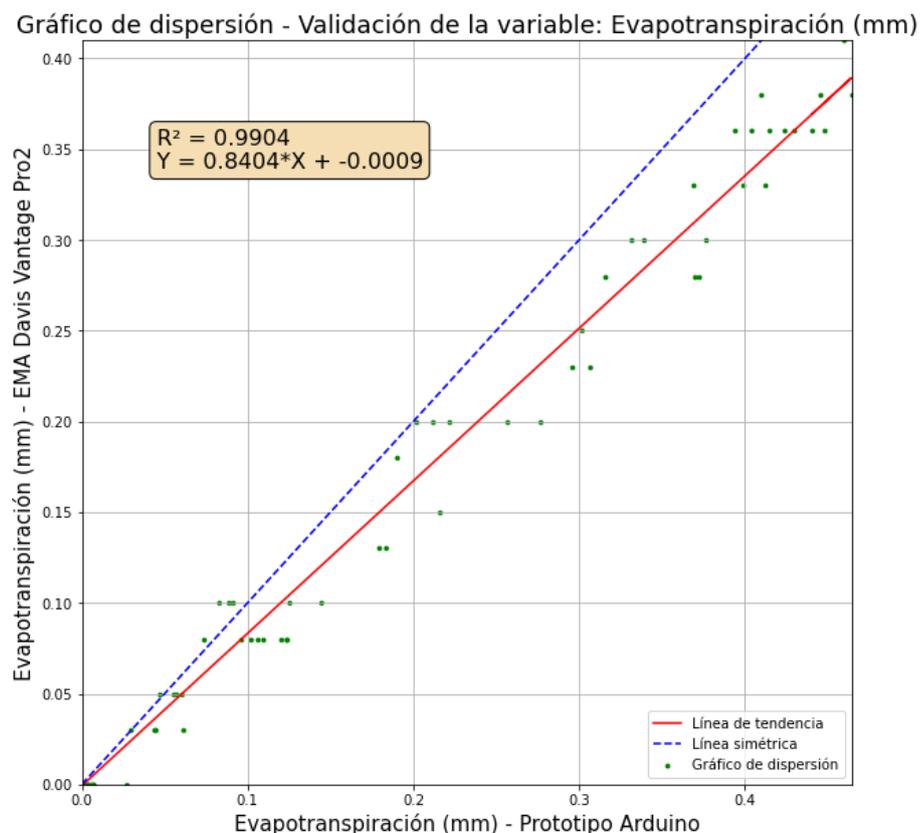


Figura 86: Gráfico de dispersión para la validación de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).

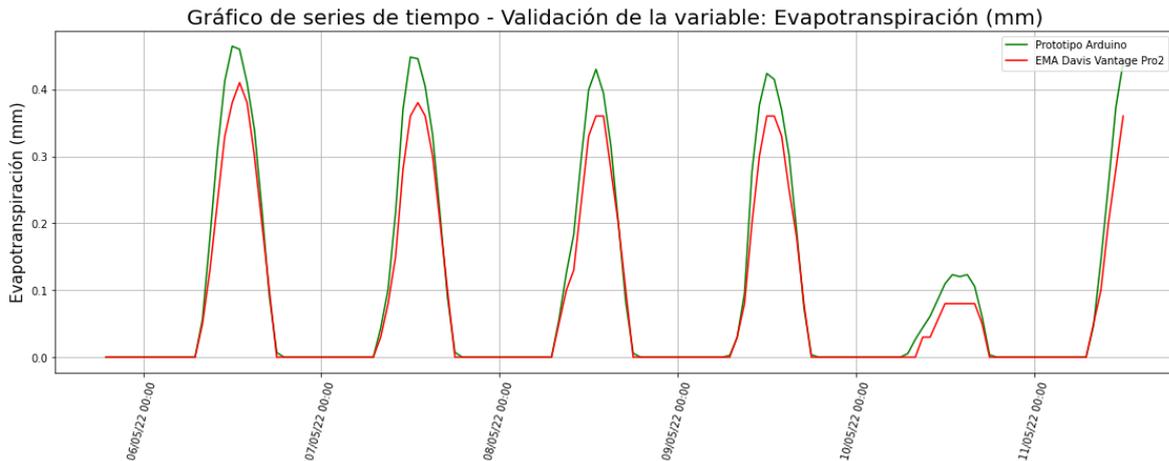


Figura 87: Gráfico de series temporales para la validación de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).

Los valores de radiación solar y evapotranspiración de la estación de referencia fueron comparados, obteniendo un valor de R^2 igual a 0.986, es decir que ambas variables se encuentran correlacionadas en cierto grado y ello se puede observar en la tendencia de los picos y caídas que ambas variables tienen en sus series temporales y para ambas estaciones (prototipo y estación de referencia), lo que conlleva a asumir que los valores de evapotranspiración calculados por el método de FAO Penman-Monteith, dependen fuertemente de los valores de radiación solar y esto es la principal causa de que los datos calculados por el prototipo se encuentren sobreestimando sistemáticamente a los registrados por la estación de referencia, de la misma forma que se observó para la radiación solar. Otras causas secundarias se deben a la inexactitud de los valores registrados de temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento y presión barométrica; los cuales tienen menor incidencia, pero pueden evitar que el modelo de validación para esta variable alcance los valores óptimos en sus índices estadísticos.

Finalmente, los resultados de evapotranspiración calculada mostradas en la Figura 86 y la Figura 87 son resultados que fueron procesados en gabinete, retirando los valores calculados menores a 0.0 mm que usualmente se presentaban en horarios nocturnos y se reemplazaban por 0.0 mm, algunos de ellos con valores altos negativos a causa del uso de la metodología compleja para el cálculo de R_{so} .

Tabla 21: Determinación el error porcentual para totales diarios de evapotranspiración del cultivo de referencia

Fecha	Totales diarios para el prototipo (mm/día)	Totales diarios para la estación de referencia (mm/día)	Error para totales diarios (mm/día)
6/05/2022	2.95	2.51	0.44
7/05/2022	2.67	2.24	0.43
8/05/2022	2.49	2.14	0.35
9/05/2022	2.56	2.17	0.39
10/05/2022	0.85	0.56	0.29
11/05/2022	1.37	0.99	0.38

Fuente: Elaboración propia.

4.9. Base de datos

En la Figura 88 se observa un fragmento de la base de datos de la información registrada por el prototipo en intervalos de 1 minuto para los sensores utilizados, en donde:

- La primera fila corresponde al encabezado, el cual a su vez corresponde al nombre clave de las variables y sensores utilizados, los cuales están separados por comas, lo que indica que cada uno corresponde a una columna independiente.
- Asimismo, se cuenta con 12 columnas en los que, la primera corresponde a los datos brindados por el módulo de reloj de tiempo real, mientras que, desde la segunda a la sexta columna, a las variables de temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento y dirección del viento con sus unidades respectivas; desde la octava hasta la undécima columna corresponden al sensor ML8511, los tres espectros del sensor SI1145 y la radiación solar resultante de la aplicación de la función de calibración; y la última columna corresponde a la evapotranspiración del cultivo de referencia calculada.
- Luego, desde la segunda fila en adelante, corresponde a cada registro realizado por el prototipo desde la fecha y hora en que se encendió el prototipo, además, estos también se encuentran separados por comas y cada valor es correspondiente con cada nombre clave del encabezado.

```

Fecha y hora,Temp (°C),HR (%),Pres (hPa),Vel viento (m/s),Dir viento,Rad Solar ML8511 (W/m2),SI1145 Vis (lm),SI1145 IR (lm),SI1145 UV (index),Rad Solar (W/m^2), ETo(mm)
9/03/2022 13:20,26.28,66.82,984.27,0.43,NE,329.5,397.83,1436.67,75.5,71.28,0.0012
9/03/2022 13:21,26.27,67.55,984.26,0.43,NE,440.67,772.5,4407.276,33,281.96,0.0037
9/03/2022 13:22,26.29,66.98,984.27,2.36,NE,401.83,1017.5,6306.17,407.5,377.91,0.005
9/03/2022 13:23,26.28,66.55,984.25,2.25,NE,401.17,1021.67,6342.83,410,379.26,0.005
9/03/2022 13:24,26.25,67.15,984.23,1.34,NE,387.5,942,5729.5,367,338.74,0.0044
9/03/2022 13:25,26.23,66.83,984.21,2.12,E,408.5,1020.17,6310.33,408.5,381.94,0.005
9/03/2022 13:26,26.19,67.19,984.19,2.23,E,403,1019.5,6307.17,408.5,379.17,0.005
9/03/2022 13:27,26.17,67.53,984.17,2.04,NE,395.83,1022.17,6322.83,409.83,377.77,0.0049
9/03/2022 13:28,26.17,67.73,984.19,1.59,NE,396.5,1027.67,6365.17,413,380.22,0.0049
9/03/2022 13:29,26.21,67.23,984.19,2.42,NE,398,1036.6434,67,417.33,384.75,0.005
9/03/2022 13:30,26.17,66.56,984.18,1.57,NE,399,1045.5,6514.422,5,389.36,0.005
9/03/2022 13:31,26.15,67.25,984.16,1.79,NE,401,1052.6576,67,426.393,14,0.005
9/03/2022 13:32,26.14,67.96,984.2,1.99,NE,401,1059.5,6632.5,430,396.52,0.0051
9/03/2022 13:33,26.14,67.96,984.24,1.73,NE,402.83,1069.33,6706.67,435.33,401.53,0.0051
9/03/2022 13:34,26.14,67.74,984.25,1.91,NE,403.17,1070.67,6729.17,436,402.45,0.0051
9/03/2022 13:35,26.11,67.43,984.23,2.12,NE,403.33,1061.17,6647,431,398.03,0.0051
9/03/2022 13:36,26.06,67.61,984.24,1.93,NE,404.5,1056.6603,67,428.17,396.17,0.0051
9/03/2022 13:37,26.02,67.78,984.2,1.86,N,403.67,1054.5,6585.5,427.33,395.16,0.005
9/03/2022 13:38,25.99,68.21,984.2,1.82,NE,404.17,1050.6554,67,425.393,27,0.005
9/03/2022 13:39,25.97,68.05,984.23,1.84,NE,404.33,1045.67,6520.17,422.5,391.59,0.005
9/03/2022 13:40,25.94,68.32,984.2,1.39,NE,405.33,1044.6502,17,421.67,391.07,0.0049
9/03/2022 13:41,25.92,68.62,984.21,2.09,NE,405.33,1039.6470.5,419.17,388.68,0.005
9/03/2022 13:42,25.88,68.22,984.21,1.54,NE,406.33,1051,6571,425.5,394.66,0.005
9/03/2022 13:43,25.83,68.47,984.17,1.51,NE,407,1056.33,6623.33,428.5,397.25,0.005
9/03/2022 13:44,25.79,68.92,984.18,1.66,N,408.5,1054.6604,5,427.17,396.85,0.005
9/03/2022 13:45,25.79,69.07,984.18,1.92,NE,408.67,1040.6489,419.5,390.74,0.0049
9/03/2022 13:46,25.77,68.97,984.17,1.41,N,408.67,1029.17,6399.5,414,385.44,0.0048
9/03/2022 13:47,25.75,69.1,984.16,1.84,NE,409.5,1014.83,6280.33,406.17,379.38,0.0048
9/03/2022 13:48,25.72,68.85,984.16,2.23,NE,408.17,1004.5,6197.83,400.33,374.59,0.0048
9/03/2022 13:49,25.63,68.89,984.17,1.63,NE,409.83,1005.6196,83,400.83,375.09,0.0047

```

Figura 88: Formato de base de datos del prototipo.

Finalmente, en la Figura 89 se muestra la visualización de un fragmento de la base de datos generada en un ordenador portátil mediante el software de manejo de tablas Excel, no obstante, es posible visualizar la información y manejarla a criterio del usuario con diferentes softwares que tengan compatibilidad con archivos de texto. Además, es posible incluir ese tipo de información en dicho formato en programas desarrollados con lenguajes de programación como Python, R, C++, Arduino IDE, entre otros; lo que le da una versatilidad muy alta al momento de querer manipular la información para generar gráficos o realizar análisis estadísticos.

Fecha y hora	Temp (°C)	HR (%)	Pres (hPa)	Vel viento (m/s)	Dir viento	Rad Solar ML8511 (W/m2)	SI1145 Vis (lm)	SI1145 IR (lm)	SI1145 UV (index)	Rad Solar (W/m^2)	ETo(mm)
9/03/2022 13:20	26.28	66.82	984.27	0	E	329.5	397.83	1436.67	75.5	71.28	0.0012
9/03/2022 13:21	26.27	67.55	984.26	0.43	NE	440.67	772.5	4407	276.33	281.96	0.0037
9/03/2022 13:22	26.29	66.98	984.27	2.36	NE	401.83	1017.5	6306.17	407.5	377.91	0.005
9/03/2022 13:23	26.28	66.55	984.25	2.25	NE	401.17	1021.67	6342.83	410	379.26	0.005
9/03/2022 13:24	26.25	67.15	984.23	1.34	NE	387.5	942	5729.5	367	338.74	0.0044
9/03/2022 13:25	26.23	66.83	984.21	2.12	E	408.5	1020.17	6310.33	408.5	381.94	0.005
9/03/2022 13:26	26.19	67.19	984.19	2.23	E	403	1019.5	6307.17	408.5	379.17	0.005
9/03/2022 13:27	26.17	67.53	984.17	2.04	NE	395.83	1022.17	6322.83	409.83	377.77	0.0049
9/03/2022 13:28	26.17	67.73	984.19	1.59	NE	396.5	1027.67	6365.17	413	380.22	0.0049
9/03/2022 13:29	26.21	67.23	984.19	2.42	NE	398	1036	6434.67	417.33	384.75	0.005
9/03/2022 13:30	26.17	66.56	984.18	1.57	NE	399	1045.5	6514	422.5	389.36	0.005
9/03/2022 13:31	26.15	67.25	984.16	1.79	NE	401	1052	6576.67	426	393.14	0.005
9/03/2022 13:32	26.14	67.7	984.2	1.99	NE	401	1059.5	6632.5	430	396.52	0.0051
9/03/2022 13:33	26.14	67.96	984.24	1.73	NE	402.83	1069.33	6706.67	435.33	401.53	0.0051
9/03/2022 13:34	26.14	67.74	984.25	1.91	NE	403.17	1070.67	6729.17	436	402.45	0.0051
9/03/2022 13:35	26.11	67.43	984.23	2.12	NE	403.33	1061.17	6647	431	398.03	0.0051
9/03/2022 13:36	26.06	67.61	984.24	1.93	NE	404.5	1056	6603.67	428.17	396.17	0.0051
9/03/2022 13:37	26.02	67.78	984.2	1.86	N	403.67	1054.5	6585.5	427.33	395.16	0.005
9/03/2022 13:38	25.99	68.21	984.2	1.82	NE	404.17	1050	6554.67	425	393.27	0.005
9/03/2022 13:39	25.97	68.05	984.23	1.84	NE	404.33	1045.67	6520.17	422.5	391.59	0.005
9/03/2022 13:40	25.94	68.32	984.2	1.39	NE	405.33	1044	6502.17	421.67	391.07	0.0049
9/03/2022 13:41	25.92	68.62	984.21	2.09	NE	405.33	1039	6470.5	419.17	388.68	0.005
9/03/2022 13:42	25.88	68.22	984.21	1.54	NE	406.33	1051	6571	425.5	394.66	0.005
9/03/2022 13:43	25.83	68.47	984.17	1.51	NE	407	1056.33	6623.33	428.5	397.25	0.005
9/03/2022 13:44	25.79	68.92	984.18	1.66	N	408.5	1054	6604.5	427.17	396.85	0.005

Figura 89: Visualización de un fragmento de la base de datos generada en Excel.

4.10. Interface de visualización

En la Figura 90 se puede apreciar seis imágenes de la interface de visualización desarrollada, cada uno correspondiente a un módulo diferente o a una variable independiente, en el orden desde arriba hacia abajo y a su vez de izquierda a derecha se tienen los paneles correspondientes a las siguientes variables:

- Temperatura del aire del sensor SHT31, del primer panel denominado “SHT31”.
- Humedad relativa del aire del sensor SHT31, del primer panel denominado “SHT31”.
- Presión barométrica del sensor BME280, del segundo panel denominado “BME280”.
- Evapotranspiración del cultivo de referencia calculada, del quinto panel denominado “EVAPOTRANSPIRACIÓN”.
- Velocidad del viento, dirección del viento y precipitación pluvial del módulo Weather Meter, del tercer panel denominado “WEATHER METER”.
- Radiación UV del sensor ML8511, radiación del espectro visible, infrarrojo y ultravioleta del sensor SI1145 y radiación solar calculada con la función de calibración, del cuarto panel denominado “PIRANOMETRO”.

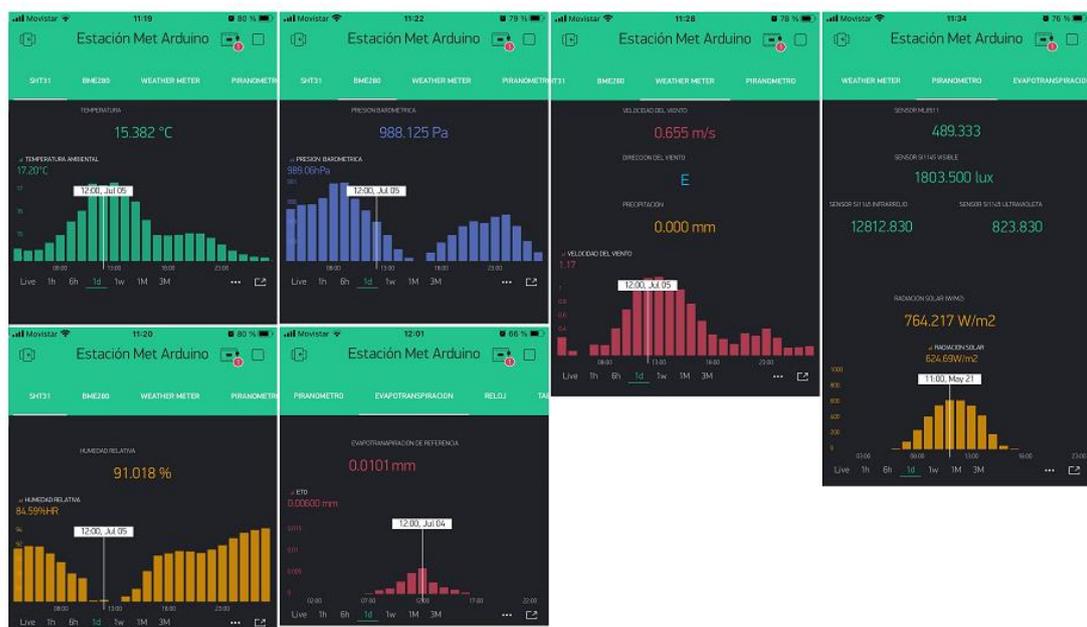


Figura 90: Paneles del aplicativo Blynk, visto desde dispositivo móvil, para las variables agrometeorológicas de interés.

En todos los paneles de la interface se cuentan con dos herramientas comunes: la primera es un visualizador de información en tiempo real y la segunda es un visualizador de series temporales de la variable correspondiente; esta última permite el almacenamiento en la nube virtual de la plataforma Blynk y la descarga histórica de datos desde el momento en que empezó a operar el prototipo hasta el momento en que se realiza dicha acción; esto último es bastante útil debido a que refuerza la base de datos generada por el módulo datalogger en caso de averías o algún otro problema técnico, no obstante, dicha función es dependiente de la red WiFi, cuya ausencia impediría el almacenamiento de datos en la nube. Adicionalmente, el gráfico de series temporales del aplicativo Blynk permite la visualización histórica de datos en diferentes escalas temporales con la finalidad de observar las tendencias e incluso los valores instantáneos en determinada fecha y hora según lo requiera el usuario.

4.11. Manual de instalación, operación y mantenimiento

El manual de instalación, operación y mantenimiento se presenta en el ANEXO 5, donde se indican las características y pautas para instalar correctamente el prototipo y mantenerlo en óptimo funcionamiento. Dicho manual consta de tres apartados principales, los cuales se describen como sigue:

La primera sección de seguridad abarca las medidas de precaución necesarias para evitar cualquier algún tipo de accidente común en el periodo de operación y mantenimiento del prototipo, no obstante, dicha sección no cubre todo tipo de riesgos sino únicamente los más comunes o evidentes.

La segunda sección de instalación y operación del equipo abarca aspectos como los datos generales del proyecto, la descripción y características principales del prototipo, las especificaciones técnicas tanto del equipo en general como de cada uno de los elementos electrónicos y eléctricos que lo componen, las pautas para una adecuada instalación y ensamblaje del equipo, las conexiones para ponerlo en operación y la extracción de la información. Con dichos alcances, el usuario obtiene la capacidad de entender los componentes del prototipo, los materiales empleados y su funcionamiento.

La tercera sección de mantenimiento del equipo, detalla los pasos a seguir para realizar un adecuado mantenimiento rutinario o correctivo. Se explica cómo se lleva a cabo el desensamblaje del prototipo, la limpieza de los elementos que la componen, la verificación en el aspecto eléctrico de cada componente electrónico o eléctrico, la verificación a nivel de software y la calibración rutinaria. Estos pasos permiten que el prototipo pueda estar operativo por un tiempo prolongado, ya que, al tener dicha naturaleza de prototipo, tiene la tendencia a presentar errores o fallas de manera más frecuente que un equipo disponible en el mercado.

V. CONCLUSIONES

- El prototipo de estación agrometeorológica automática cuenta con elementos electrónicos y eléctricos compatibles con Arduino y de bajo costo, que fueron ensamblados mediante el diseño electrónico y físico, que le permiten simular a una estación automática comercial en cuanto a estructura, funcionalidad, portabilidad, variables consideradas y cumpliendo las condiciones de emplazamiento, exposición e instalación recomendadas.
- El algoritmo de programación del prototipo se puede aplicar al software Arduino IDE, permitiendo que el equipo registre información de las variables de interés en intervalos continuos de un minuto y garantizando las funciones de adquisición, procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos.
- Se calibraron los sensores en un periodo a partir del cual se concluye que las observaciones del prototipo tienen un alto grado de correlación con respecto a las de la estación de referencia Davis Vantage Pro2, ya que se obtuvo valores de coeficiente de determinación entre 0.95 y 0.99, errores tolerables y dinámicas muy similares en sus series temporales, mientras que las variables de velocidad del viento y radiación solar requieren necesariamente de la función de calibración. En cuanto a la variable de dirección del viento, cada punto cardinal corresponde a un valor analógico utilizado en el programa principal, determinando una resolución de 22.5 grados sexagesimales.
- El método de FAO Penman-Monteith y su algoritmo de cálculo permiten determinar el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia a partir de las observaciones realizadas tanto de la estación de referencia como del prototipo, demostrando que dicho método es altamente fiable ya que presenta valores de correlación mayores a 0.99 para ambos casos a escala horaria y una tendencia bastante cercana en la escala diaria.

- A partir de los valores obtenidos en la fase de validación de coeficiente de determinación e índice de Willmot comprendidos entre 0.95 y 0.99, y de índice de Nash-Sutcliffe entre 0.85 y 0.99, se puede concluir que el prototipo presenta
- mediciones bastante fiables para el periodo evaluado y en términos de tendencia, correlación y concordancia. La base de datos cuenta con información estructurada que puede ser extraída por el datalogger y analizada por softwares de manejo de tablas, y la plataforma IoT Blynk permite al prototipo conectarse a su servidor mediante redes WiFi para la visualización de información en tiempo real y continua en un aplicativo digital móvil, permitiendo que el prototipo simule a una estación automática en el aspecto de almacenamiento y transmisión de datos.
- El manual de instalación, operación y mantenimiento contiene la información necesaria que permite al usuario operar el equipo adecuadamente, asegurar su funcionamiento correcto y conocer las instrucciones de mantenimiento con la finalidad de garantizar su funcionamiento prolongado y conocer su composición.

VI. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos de investigación se recomienda calibrar los sensores seleccionados en laboratorios certificados de calibración para garantizar rangos más amplios de referencia.
- Incluir la medición y verificación del desempeño de otras variables como la temperatura del suelo y del aire a diferentes niveles, humedad del suelo a diferentes niveles, insolación, precipitación, velocidad del viento a diferentes niveles, entre otros.
- Mejorar el tipo de red de transmisión inalámbrica como GSM o redes de bajo consumo como LoRA o Sigfox, para eliminar el riesgo de desconexiones por inestabilidad de la red WiFi.
- Rediseñar el sistema fotovoltaico de manera más exhaustiva para reducir las dimensiones y capacidades de los elementos utilizados, y garantizando el suministro continuo de electricidad.
- Agregar otros métodos o instrumentos de referencia para una evaluación más exhaustiva del desempeño de la variable de evapotranspiración del cultivo de referencia.
- Enlazar el prototipo, con su variable de evapotranspiración y demás variables climáticas, con los actuadores de un sistema de automatización de riego aplicado a un cultivo, simulando a un lisímetro automatizado.
- Considerar la evaluación de un cultivo específico mediante la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar o no-estándar.
- Mejorar la protección y estructura de los sensores y demás elementos del prototipo, utilizando diseños personalizados en impresión 3D con la finalidad de reducir costos.

- Desarrollar más prototipos similares, calibrarlos y utilizarlos como una red de estaciones dentro de una zona específica para la evaluación de microclimas.
- Capacitar e informar a sectores rurales del país o usuarios de sistemas de riego para la automatización de sus sistemas agrícolas e hídricos mediante el desarrollo y uso de equipos de medición de parámetros agrometeorológicos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. En Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Andrades Rodríguez, M., & Múñez León, C. (2012). Fundamentos de Climatología. En Agricultura y Alimentación 12. Universidad de La Rioja.
- apLOOP. (2017, enero 23). Microcontroladores vs. Microprocesadores. <https://medium.com/@aploopve/microcontroladores-vs-microprocesadores-9e8c7edfb746>
- Arango Mitma, A. A. (2019). Riego por goteo subterráneo intermitente controlado vía internet, para el césped - UNALM [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4292>
- Arduino S.R.L. (2021). Arduino MKR WiFi 1010 — Arduino Online Shop. <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mkr-wifi-1010>
- Argent Data Systems. (s/f). Weather Sensor Assembly p/n 80422 (pp. 1–2). Recuperado el 31 de octubre de 2022, a partir de [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/Weather Sensor Assembly.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/Weather_Sensor_Assembly.pdf)
- Atmel Corporation. (2014). Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet (p. 435). https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- Azúa-Barrón, M., Vázquez-Peña, M. A., Arteaga-Ramírez, R., & Hernández-Saucedo, R. (2017). Sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma Arduino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.67>

- Barrios Díaz, A., Silva López, J. C., Nava Aguilar, G., & Martínez Solares, M. J. (2018). Sistema de control difuso de temperatura e iluminación en un invernadero vertical con alarma de humedad ambiental [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/282651>
- Basualdo, A. B. (2015). Manual de buenas prácticas para la generación, el almacenamiento y la difusión de informática climática en instituciones y organismos del MERCOSUR. En Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Bayón Alonzo, E. (2018). Diseño de un instrumento basado en Arduino para la medida de irradiancia solar [Tesis de grado, Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/28977>
- Blynk. (2020). Blynk Documentation. <https://docs.blynk.cc/>
- Bosch Sensortec. (2021). BME280 - Data sheet (pp. 1–60). <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>
- Bravo Vecorena, A. (2016). Diseño e implementación de una estación meteorológica utilizando micro controlador Arduino-Raspberry PI con radio enlace [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4736>
- Burgt, P. van der. (2020). Designing a Low-Cost Autonomous Pyranometer [Essay (Bachelor), University of Twente]. <http://essay.utwente.nl/82693/>
- Campos Aranda, D. F. (2005). Agroclimatología cuantitativa de cultivos (Trillas, Ed.; 1a ed.). Trillas.
- Cannon, J. B., Warren, L. T., Ohlson, G. C., Hiers, J. K., Shrestha, M., Mitra, C., Hill, E. M., Bradfield, S. J., & Ocheltree, T. W. (2022). Applications of low-cost environmental monitoring systems for fine-scale abiotic measurements in forest ecology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 321, 108973. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.108973>
- Caro Vega, C. C. (2011). Manual para el aprendizaje y observaciones globales de la atmósfera en beneficio del ambiente. www.globe.gov
- Castañeda Santa Cruz, E. (2016). Dimensionado de un Sistema Solar Fotovoltaico para abastecer cargas de baja potencia y consumo en el laboratorio de Ingeniería

- Ambiental de la UNALM [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3118>
- Chase, A. O., Sampaio, M. H. K., Brito-De-Souza, J. R., & Almeida, J. F. (2012). Data acquisition system: An approach to the Amazonian environment. *IEEE Latin America Transactions*, 10(2), 1616–1621. <https://doi.org/10.1109/TLA.2012.6187606>
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horario. *Aqua-LAC*, 5(2), 14–22.
- Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino. En Grupo Editorial Patria (Ed.), *Publicacion En Internet* (1a ed.). Instituto Politécnico Nacional. <https://doi.org/10.1007/s40722-017-0084-8>
- Davis Instruments. (2022a). Trípode de Montaje. <https://www.estacionesdavis.es/es/accesorios-de-instalacion/36-tripode-de-montaje-7716-davis-instruments.html>
- Davis Instruments. (2022b). Vantage Pro2. <https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2>
- Elías Castillo, F., & Castelví Sentís, F. (2001). *Agrometeorología* (F. Elías Castillo, Ed.; 2a ed.). Mundi-Prensa.
- Espressif Systems. (2019). ESP32-WROOM-32 Datasheet V2.8 (pp. 1–20). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- Espressif Systems. (2020). ESP32 Series Datasheet. En *Espressif Systems* (pp. 1–57). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Gubler, S., Hunziker, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Brönnimann, S., Schwierz, C., Oria, C., & Rosas, G. (2017). The influence of station density on climate data homogenization. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4670–4683. <https://doi.org/10.1002/joc.5114>

- Guerra Hidalgo, F., Faez Martinez, R., & Fuentealba Vidal, E. (2013). Design of a Low-Cost Sensor for Solar Irradiance. Antofagasta Energetic Development Center, 1–8.
- Haefke, M., Mukhopadhyay, S. C., & Ewald, H. (2011). A Zigbee based smart sensing platform for monitoring environmental parameters. Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1549–1556. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2011.5944154>
- Howells, E. B. (2018). Measuring temperature. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 19(10), 563–567. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2018.08.003>
- Ji, X. B., Chen, J. M., Zhao, W. Z., Kang, E. S., Jin, B. W., & Xu, S. Q. (2017). Comparison of hourly and daily Penman-Monteith grass- and alfalfa-reference evapotranspiration equations and crop coefficients for maize under arid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 192, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.019>
- Juganaru Mathieu, M. (2014). Introducción a la programación (Grupo Editorial Patria, Ed.; 1a ed.). www.editorialpatria.com.mx/pdf/files/9786074384154.pdf
- K Patel, K., & M Patel, S. (2016). Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(5), 6122–6131. <https://doi.org/10.4010/2016.1482>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- LAPIS Semiconductor Cod., Ltd. (2013). ML8511 Datasheet (pp. 1–8). LAPIS Semiconductor Co.,Ltd.
- Mansur, A. al, Shil, B., Islam, K. K., Hoque, A., & Bhuyan, M. H. (2014). Design and Implementation of a Solar Radiation Meter using PV panel as a Sensor. *Gub Journal of Science and Engineering*, 1(1), 32–37.
- Microchip Technology Inc. (2018). SAM D21 Family Datasheet (pp. 1–1202). <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mkr-wifi-1010>

- Mohd Alias, M. N. A., & Mohyar, S. N. (2017). Architectural design proposal for real time clock for wireless microcontroller unit. EPJ Web of Conferences, 162, 1–7. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201716201072>
- Murcia Almanza, D. S., & Rojas Paternina, A. (2015). Diseño e implementación de un prototipo de Estación Meteorológica remota de bajo costo empleando el enfoque de Internet de las Cosas [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1008>
- National Centers for Environmental Information. (2018, marzo 23). What's the Difference Between Weather and Climate? <https://www.ncei.noaa.gov/news/weather-vs-climate>
- Naylamp Mechatronics. (2021a). Convertidor Voltaje DC-DC Step-Down 3A LM2596. <https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/196-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-3a-lm2596.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021b). Display Alfanumérico LCD 1602. <https://naylampmechatronics.com/lcd-alfanumerico/110-display-alfanumerico-lcd-1602.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021c). Display Alfanumérico LCD 2004. <https://naylampmechatronics.com/lcd-alfanumerico/158-display-lcd-2004-azul-backlight.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021d). Módulo lector de memoria Micro SD Card - SPI. <https://naylampmechatronics.com/almacenamiento/104-modulo-lector-de-memoria-micro-sd-card.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021e). Módulo lector de memoria SD Card - SPI. <https://naylampmechatronics.com/almacenamiento/35-modulo-lector-de-memoria-sd-card.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021f). Módulo RTC DS1307 + EEPROM AT24C32 (I2C). <https://naylampmechatronics.com/sensores/30-modulo-rtc-ds1307-eprom-at24c32-i2c.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021g). Módulo RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (I2C). <https://naylampmechatronics.com/sensores/107-modulo-rtc-ds3231-eprom-at24c32-i2c.html>

- Naylamp Mechatronics. (2021h). Módulo Sensor de luz ultravioleta (UV) ML8511. <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/169-modulo-sensor-de-luz-ultravioleta-uv-ml8511.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021i). NodeMCU-32 30-pin ESP32 WiFi. <https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/384-nodemcu-32-30-pin-esp32-wifi.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021j). Sensor de Presión, Temperatura y Humedad BME280. <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/357-sensor-de-presion-temperatura-y-humedad-bme280.html>
- Naylamp Mechatronics. (2021k). Sensor de temperatura y humedad relativa SHT31. <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/363-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-sht31.html>
- Naylamp Mechatronics. (2022). Arduboard Mega 2560 R3. <https://naylampmechatronics.com/ardusystem-tarjetas/9-mega-2560-r3.html>
- Netto, G. T., & Arigony-Neto, J. (2019). Open-source Automatic Weather Station and Electronic Ablation Station for measuring the impacts of climate change on glaciers. *HardwareX*, 6, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00053>
- Nozad, S., Forat, M., & Hasan, F. (2017). Design of Weather Monitoring System Using Arduino Based Database Implementation. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 4(4), 7109–7117. www.jmest.org
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2015). Determinación de la tarifa y mecanismos de remuneración para suministros en áreas no conectadas a red. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/gart/procesosregulatorios/electricidad/fijacion-cargo-rera/2015/INF_Determinacion_tarifa_RER.pdf
- Organización Meteorológica Mundial. (2008). Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (Agencia Estatal de Meteorología, Ed.).
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). Guía del Sistema Mundial de Observación (3a ed.).
- Organización Meteorológica Mundial. (2015). Manual del Sistema Mundial de Observación (Vol. 1).

- Palaguachi Encalada, S. I. (2018). Diseño, desarrollo e implementación de una estación meteorológica basada en una red jerárquica de sensores, software libre y sistemas embebidos para la empresa ELECAUSTRO en la Minicentral Gualaceo utilizando comunicación MQTT y MODBUS [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5264/1/UPS-CT002757.pdf>
- Perera, K. C., Western, A. W., Nawarathna, B., & George, B. (2015). Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia. *Agricultural Water Management*, 148, 84–96.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.016>
- Protocolo para la instalación y operación de estaciones meteorológicas e hidrológicas, 1 (2013). <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00701SENA-153.pdf>
- Quiñones-Cuenca, M., González-Jaramillo, V., Torres, R., & Jumbo, M. (2017). Sistema de monitoreo de variables medioambientales usando una red de sensores inalámbricos y plataformas de Internet de las Cosas. *Enfoque UTE*, 7, 329–343.
<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.139>
- Reza Khan, S., Kabir, A., & Ara Hossain, D. (2012). Designing Smart Multipurpose Digital Clock using Real Time Clock (RTC) and PIC Microcontroller. *International Journal of Computer Applications*, 41(9), 39–42. <https://doi.org/10.5120/5573-7668>
- Rijks, D., & Baradas, M. W. (2000). The clients for agrometeorological information. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 27–42. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00116-7)
- Rodríguez Jiménez, R. M., Benito Capa, Á., & Portela Lozano, A. (2004). Meteorología y Climatología. En Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (Ed.), *Meteorología y Climatología* (pp. 6–88).
<https://www.fecyt.es/es/publicacion/unidad-didactica-meteorologia-y-climatologia>
- Saini, H., Thakur, A., Ahuja, S., Sabharwal, N., & Kumar, N. (2016). Arduino based Automatic Wireless Weather Station with Remote Graphical Application and Alerts. *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*, 605–609. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2016.7566768>

- Seeed Technology Co., L. (2021). Grove - Sunlight Sensor - Seeed Wiki. https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Sunlight_Sensor/
- SENSIRION. (2016). Datasheet SHT3x-DIS (pp. 1–20). https://www.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital-971521.pdf
- Silicon Laboratories. (2013). Si1145/46/47 Datasheet. En Rev. 1.1 (pp. 1–67). Silicon Laboratories Inc. <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si1145-46-47.pdf>
- Simón Mori, G. A. (2018). Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. En Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3610>
- SparkFun Electronics. (s/f). Weather Meters - SEN-08942. Recuperado el 9 de abril de 2020, a partir de <https://www.sparkfun.com/products/8942>
- Suleiman, A. A., & Hoogenboom, G. (2009). A comparison of ASCE and FAO-56 reference evapotranspiration for a 15-min time step in humid climate conditions. *Journal of Hydrology*, 375, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.020>
- Torrente Artero, O. (2013). Arduino. Curso práctico de formación (Alfaomega Grupo Editor, Ed.; 1a ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Universidad Nacional Agraria La Molina. (s/f). El observatorio. Recuperado el 18 de octubre de 2022, a partir de <http://www.lamolina.edu.pe/FACULTAD/ciencias/CRFM/estacion/index.php/el-observatorio/>
- Ureña Elizondo, F. (2017). Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos. *Revista Posgrado y Sociedad*, 11(1), 33–49. <https://doi.org/10.22458/rpys.v11i1.1881>
- Villanueva Blas, L. M. (2014). Diseño e implementación de un equipo de metrología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y eólicos [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6095>

World Meteorological Organization. (2010). Guide to Agricultural Meteorological Practices. En Agricultural and Forest Meteorology. World Meteorological Organization.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Ecuaciones de los parámetros utilizados para el cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia

Tabla 22: Ecuación de todos los parámetros que intervienen en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia

Parámetro	Ecuación	
Constante psicrométrica	$\gamma = \frac{0.000665 \cdot P_{min}}{10}$	(14)
Presión de saturación de vapor a la temperatura Tmin	$e_o(T_{min}) = 0.6108 \cdot e^{\left(\frac{17.27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right)}$	(15)
Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura Tmin	$\Delta = \frac{4098 \cdot 0.6108 \cdot e^{\left(\frac{17.27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237.3}\right)}}{(T_{min} + 237.3)^2}$	(16)
Presión real de vapor	$e_a = e_o(T_{min}) \cdot \frac{HR_{min}}{100}$	(17)
Número de día en el año	$J = ENTERO \left(275 \cdot \frac{MES}{9} - 30 + DÍA \right), SI \text{ MES} < 3$ $J = ENTERO \left(275 \cdot \frac{MES}{9} - 30 + DÍA \right) - 2, SI \text{ MES} \geq 3$	(18)
Distancia relativa inversa Tierra-Sol	$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$	(19)
Declinación solar	$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1.39\right)$	(20)
	$b = \frac{2\pi \cdot (J - 81)}{364}$	(21)
Corrección estacional para el tiempo solar	$S_c = 0.1645 \cdot \sin(2b) - 0.1255 \cdot \cos(b) - 0.025 \cdot \sin(b)$	(22)

Parámetro	Ecuación
Ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol	$w_s = \cos^{-1}(-\tan(LATITUD) \cdot \tan(\delta))$ (23)
Hora estándar en el punto medio del periodo considerado	$t = HORA + \frac{MINUTO}{60} - \left(\frac{PERIODO}{60 \cdot 2}\right)$ (24)
Ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado	$w = \frac{\pi}{2}(t + 0.06667(75 - LONGITUD) + S_c - 12)$ (25)
Ángulos de radiación al inicio y al final del periodo, respectivamente	$w_1 = w - \frac{\pi \cdot \frac{PERIODO}{60}}{24}; w_2 = w + \frac{\pi \cdot \frac{PERIODO}{60}}{24}$ (26)
Radiación extraterrestre	$R_a = \frac{60}{PERIODO} \cdot \frac{12 \cdot 60}{\pi} \cdot 0.082 \cdot d_r \cdot [(w_2 - w_1) \cdot \sin(LATITUD) \cdot \sin(\delta) + \cos(LATITUD) \cdot \cos(\delta) \cdot (\sin(w_2) - \sin(w_1))], SI -w_s \leq w \leq w_s; o$ $R_a = 0, SI w < -w_s O w > w_s$ (27)
Radiación solar en un día despejado *	$R_{so} = R_a \cdot (K_B + K_D)$ (28)
Radiación solar de onda corta	$R_{ns} = (1 - 0.23) \cdot R_{min} \cdot 3600 \cdot 10^{-6}$ (29)
Radiación solar de onda larga	$R_{nl} = \frac{2.043}{\left(\frac{60}{PERIODO}\right)} \cdot 10^{-10} \cdot (T_{min} + 273.16)^4 \cdot (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \cdot (1.35 \cdot 0.5 - 0.35), SI w < -w_s O w > w_s ; o$ $R_{nl} = \frac{2.043}{\left(\frac{60}{PERIODO}\right)} \cdot 10^{-10} \cdot (T_{min} + 273.16)^4 \cdot (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \cdot \left(1.35 \cdot \left(\frac{R_{min} \cdot 3600 \cdot 10^{-6}}{R_{so}}\right) - 0.35\right), SI -w_s \leq w \leq w_s$ (30)
Radiación solar neta	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$ (31)
Flujo de calor del suelo	$G = 0.5 \cdot R_n, SI w < -w_s O w > w_s; o$ $G = 0.1 \cdot R_n, SI -w_s \leq w \leq w_s;$ (32)

Parámetro	Ecuación
Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie	$u_2 = \frac{V_{min} \cdot 4.87}{\ln(67.8 \cdot ALTURA_{ANEM} - 5.42)} \quad (33)$

Fuente: Elaboración propia, basada en Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2006). Metodología en el ANEXO 3 de la publicación FAO-56 - Bases físicas de los parámetros usados en el cálculo de la evapotranspiración.

T_{min} : temperatura del aire promedio en el periodo seleccionado en minutos ($^{\circ}C$).

HR_{min} : humedad relativa del aire promedio en el periodo seleccionado en minutos (%).

P_{min} : presión barométrica promedio el periodo seleccionado en minutos (hPa).

R_{min} : radiación solar promedio el periodo seleccionado en minutos ($W m^{-2}$).

V_{min} : velocidad del viento promedio el periodo seleccionado en minutos (m/s).

MES, DIA, HORA, MINUTO: valores de tiempo correspondientes al momento del registro.

LATITUD: latitud de la zona de instalación (radianes).

LONGITUD: longitud de la zona de instalación (grados sexagesimales).

ELEVACIÓN: elevación o altitud de la zona de instalación del prototipo (m.s.n.m.).

$ALTURA_{ANEM}$: altura de instalación del anemómetro con respecto a la superficie (m).

PERIODO: frecuencia de la toma de datos (min).

ANEXO 2: Costo referencial del prototipo como presupuesto

Tabla 23: Costo del prototipo desagregado en sus cuatro componentes principales

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	P.U.	PARCIAL	SUB TOTAL
1	Elementos electrónicos				S/ 766.00
1.1	Arduino MKR WiFi 1010	1	S/ 159.00	S/ 159.00	
1.2	Módulo con sensores de temperatura y humedad SHT31	1	S/ 40.00	S/ 40.00	
1.3	Módulo con sensor de presión barométrica BME280	1	S/ 50.00	S/ 50.00	
1.4	Módulo con sensores de velocidad y dirección del viento	1	S/ 320.00	S/ 320.00	
1.5	Módulo con sensor óptico para radiación solar SI1145-Grove (Visible, IR y UV)	1	S/ 52.00	S/ 52.00	
1.6	Módulo con sensor de radiación UV ML7511	1	S/ 35.00	S/ 35.00	
1.7	Módulo Reloj de Tiempo Real DS3231	1	S/ 24.00	S/ 24.00	
1.8	Módulo adaptador de memoria externa microSD	1	S/ 12.00	S/ 12.00	
1.9	Módulo display alfanumérico LCD 2004	1	S/ 34.00	S/ 34.00	
1.10	Módulo adaptador de display LCD a I2C	1	S/ 12.00	S/ 12.00	
1.14	Módulo convertidor de voltaje step-down LM2596	2	S/ 14.00	S/ 28.00	
2	Elementos del sistema fotovoltaico				S/ 260.00
2.1	Panel solar $W_p = 20W$ y 12V	1	S/ 80.00	S/ 80.00	
2.2	Batería solar 18Ah y 12V	1	S/ 130.00	S/ 130.00	
2.3	Regulador de carga solar 10A y 12V	1	S/ 50.00	S/ 50.00	
3	Elementos eléctricos				S/ 340.00

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	P.U.	PARCIAL	SUB TOTAL
3.1	Cajas de pase eléctrica PVC	2	S/ 25.00	S/ 50.00	
3.2	Placa perforada de matriz de puntos de cobre	1	S/ 8.00	S/ 8.00	
3.3	Rosetas telefónicas	3	S/ 6.00	S/ 18.00	
3.4	Soportes para sensores de radiación solar en impresión 3D, material PETG	2	S/ 16.00	S/ 32.00	
3.5	Memoria microSD 32 GB	1	S/ 32.00	S/ 32.00	
3.6	Abrigo meteorológico para sensor de temperatura y humedad*	1	S/ 100.00	S/ 100.00	
3.7	Conectores, cables, elementos pasivos y otros	1	S/ 100.00	S/ 100.00	
4	Elementos estructurales				S/ 1,829.00
4.1	Trípode para estación meteorológica marca Davis	1	S/ 1,239.00	S/ 1,239.00	
4.2	Soportes de acero para cajas de pase y panel solar	1	S/ 420.00	S/ 420.00	
4.3	Soporte para abrigo meteorológico	1	S/ 70.00	S/ 70.00	
4.4	Tornillos, tuercas, abrazaderas y otros elementos de sujeción	1	S/ 100.00	S/ 100.00	
TOTAL					S/ 3,195.00

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3: Diagramas de flujo elaborados

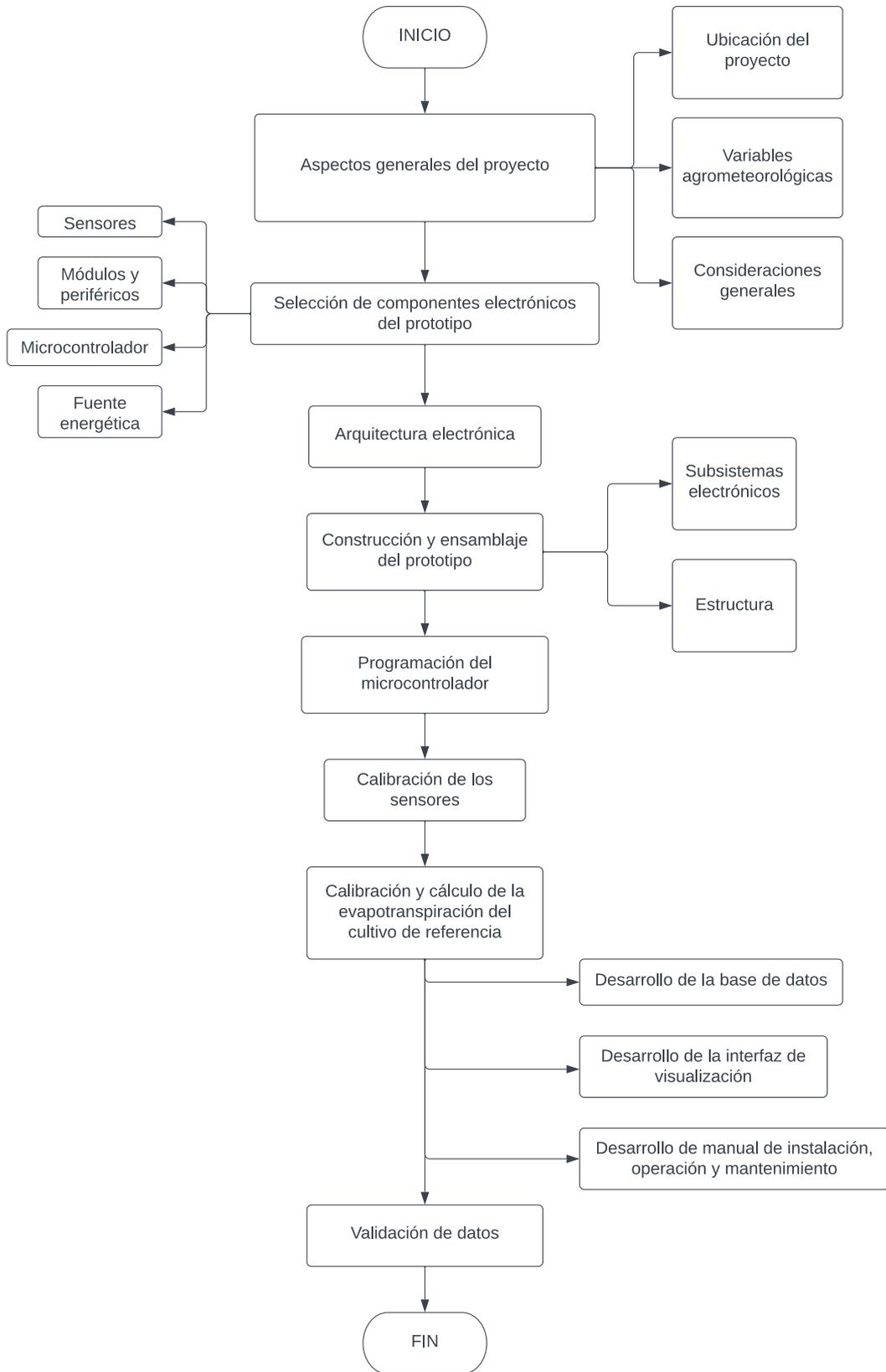


Figura 91: Diagrama de flujo de la metodología.

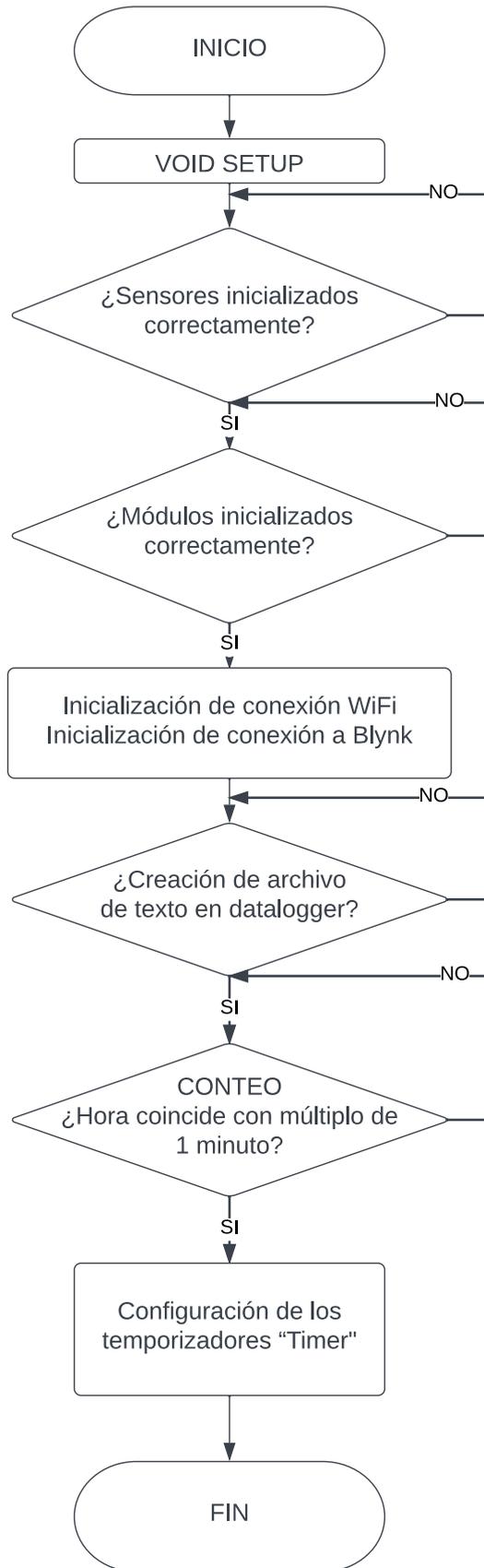


Figura 92: Diagrama de flujo de la sección de establecimiento de condiciones iniciales, correspondiente a la función “void setup”.

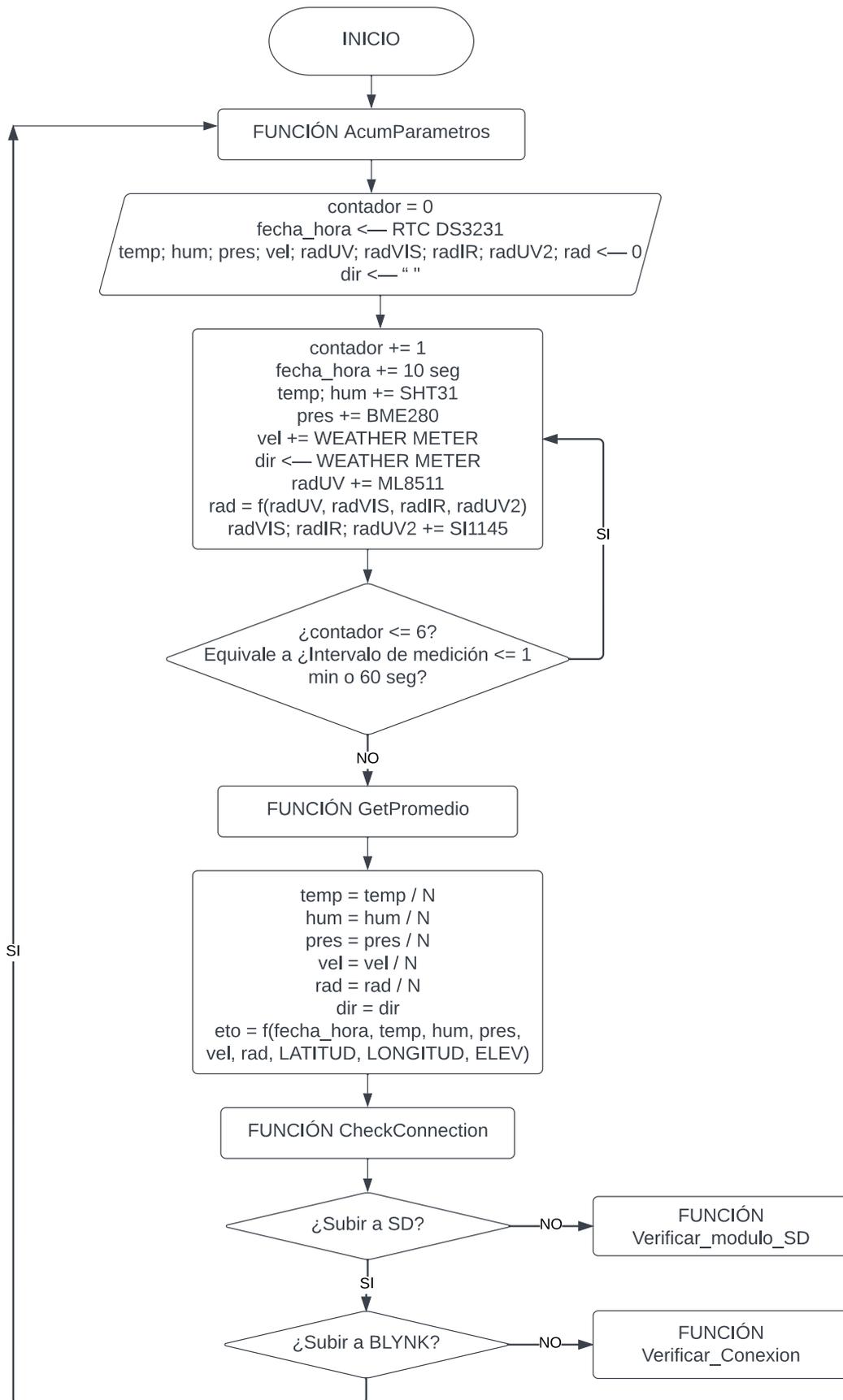


Figura 93: Diagrama de flujo del algoritmo del microcontrolador para la secuencia repetitiva, correspondiente a la función “void loop”.

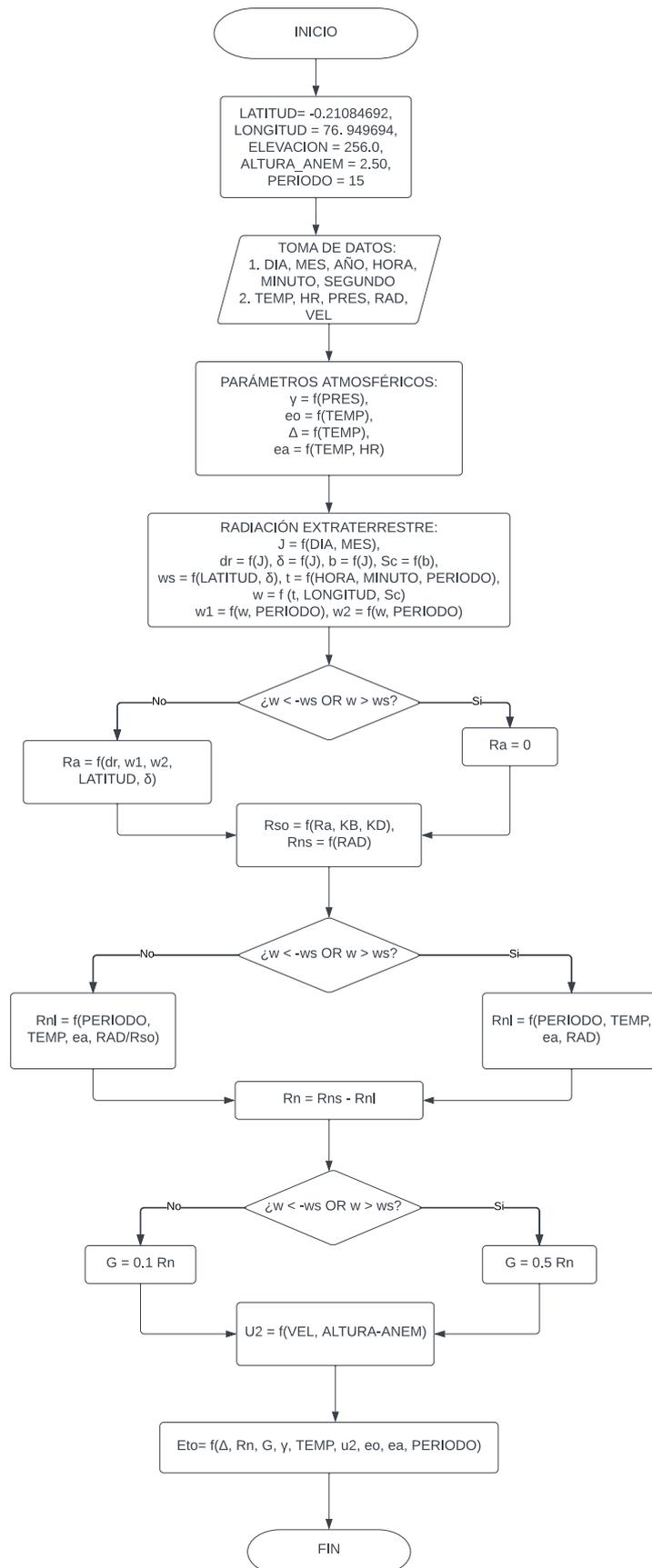


Figura 94: Diagrama de flujo para el algoritmo de cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia.

ANEXO 4: Código de programación fuente para la operación del prototipo de estación agrometeorológica basada en sensores y microcontroladores

```
#define BLYNK_PRINT Serial

#define NUMDIRS 16 // Número de valores de dirección de viento

#define FORMATO_FECHA "DD/MM/YYYY hh:mm:ss AP"

#define ENCABEZADO_TXT "Fecha y hora,Temp (°C),HR (%),Pres (hPa),Temp280 (°C),Humd280 (%),Vel viento (m/s),Dir viento,PP (mm),Rad Solar ML8511,SI1145 Vis (lm),SI1145 IR (lm),SI1145 UV (index),Rad (W/m^2),ETo (mm)"

#define BLYNK_TIMEOUT_MS 500

#define PIN_ANEMOMETRO 4

#define PIN_RAINGAUGE 5

#define PIN_SD 7

#define PIN_VELETA A5

#define PIN_RADIACION A6

// Librerías necesarias:

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_SHT31.h>

#include <Adafruit_BME280.h>

#include <SD.h>

#include <RTClib.h>

#include <WiFiNINA.h>

#include <BlynkSimpleWiFiNINA.h>

#include <hd44780.h>

#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h>

#include <wiring_private.h>

#include <Adafruit_SI1145.h>
```

```

// Inicializando los objetos utilizados en adelante para acceder a sus atributos y funciones:

Adafruit_SHT31 sensorTH = Adafruit_SHT31();

Adafruit_BME280 sensorPresion;

RTC_DS3231 rtc;

DateTime reloj;

File archivo;

SimpleTimer timer;

hd44780_I2Cexp lcd;

Adafruit_SI1145 sensorVIRUV = Adafruit_SI1145();

TwoWire myWire(&sercom3, 0, 1);

// Variables:

char auth[] = "dhYxVtVqfJJnRJiqT7nddn-baVSuFCmo";

char ssid[] = "NOMBRE_DE_USUARIO_WIFI";

char pass[] = "CONTRASEÑA_WIFI";

volatile int numRevsAnemometro = 0;

volatile int numGotasPluviometro = 0;

unsigned long adc[NUMDIRS] = {17, 21, 24, 33, 48, 63, 77, 105, 121, 153, 162, 180, 202,
211, 230, 256};

char *strVals[NUMDIRS] = {"ONO", "OSO", "O", "NNO", "NO", "NNE", "N", "SSO",
"SO", "ENE", "NE", "SSE", "S", "ESE", "SE", "E"};

byte dirOffset = 0;

struct Variables {

    float temp;

    float hum;

    float pres, t280, h280;

    float vel;

    char* dir;

```

```

float pp;

float radML;

float radV;

float radIR;

float radUV;

float rad;

};

Variables variables;

Variables promedio;

float eto;

float t, h, p, t2, h2, v, pp, rml, rv, rir, ruv, r;

char* d;

String buff_reloj;

byte contador = 0;

const char nombre_archivo[] = "estacion.txt";

const int tiempo_Inicio = 1;

const unsigned long MSEGs_CALC_FINAL = 60000;

const unsigned long MSEGs_DATO = 10000;

const unsigned long MSEGs_CONX = 5 * MSEGs_CALC_FINAL;

const int cantidad_datos = MSEGs_CALC_FINAL / MSEGs_DATO;

const int LCD_COLS = 20;

const int LCD_ROWS = 4;

const float latitud = -0.21084692;

const float longitud = 76.9496944;

const float elev = 256.00;

bool online = 0;

```

```

void setup() {
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  myWire.begin();
  pinPeripheral(0, PIO_SERCOM);
  pinPeripheral(1, PIO_SERCOM);
  pinMode(PIN_ANEMOMETRO, INPUT);
  pinMode(PIN_RAINGAUGE, INPUT);
  digitalWrite(PIN_ANEMOMETRO, HIGH);
  digitalWrite(PIN_RAINGAUGE, HIGH);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO),      contarAnemometro,
  FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_RAINGAUGE),        contarPluviometro,
  FALLING);
  // Funciones de verificación del funcionamiento de los módulos:
  LCD_Inicio();
  SHT_Inicio();
  BME_Inicio();
  SD_Inicio();
  RTC_Inicio();
  SI1145_Inicio();
  WiFi_Inicio();
  Blynk_Inicio();
  creacion_Archivo();
  conteo_Inicio();
  timer.setInterval(MSEGS_DATO, acumParametros);
  timer.setInterval(MSEGS_CALC_FINAL, getPromedio);

```

```

timer.setInterval(MSEGS_CONX, CheckConnection);

timer.setInterval(MSEGS_CALC_FINAL, subirData);
}

void loop() {

  if (Blynk.connected()) {

    Blynk.run();

  }

  timer.run();

}

// Función ara el cálculo de evapotranspiración:

float eto_FAO(float periodo, float latitud, float longitud, float z, String reloj, Variables
variables, boolean complex_rso = true) {

  float t, h, p, v, rs, gamma, eo, delta, ea, J, dr, ds, b, Sc, ws, tt, w, w1, w2, ra, sin_phi,
w_rad, kb, kd, rso, rs2, rn, rns, rnl, G, u2, et;

  t = variables.temp;

  h = variables.hum;

  p = variables.pres;

  v = variables.vel;

  rs = variables.rad;

  int mes, dia, hora, minuto;

  String AP;

  float h_vel = 2.5;

  gamma = 0.000665 * p / 10;

  eo = 0.6108 * exp((17.27 * t) / (t + 237.3));

  delta = 4098 * 0.6108 * exp((17.27 * t) / (t + 237.3)) / pow(t + 237.3, 2);

  ea = h * eo / 100;

  mes = reloj.substring(3, 5).toInt();

```

```

dia = reloj.substring(0, 2).toInt();
AP = reloj.substring(20, 22);
if (AP == "AM") {
    hora = reloj.substring(11, 13).toInt();
}
else {
    hora = reloj.substring(11, 13).toInt() + 12;
}
minuto = reloj.substring(14, 16).toInt();
if (mes < 3){
    J = int(275 * mes / 9.0 - 30 + dia);
}
else{
    J = int(275 * mes / 9.0 - 30 + dia) - 2;
}
dr = 1 + 0.033 * cos(2 * PI * J / 365.0);
ds = 0.409 * sin(2 * PI * J / 365.0 - 1.39);
b = 2 * PI * (J - 81) / 364;
Sc = 0.1645 * sin(2 * b) - 0.1255 * cos(b) - 0.025 * sin(b);
ws = acos(-tan(latitud) * tan(ds));
tt = hora + minuto / 60.0 - (periodo / 60 / 2);
w = PI / 12 * (tt + 0.06667 * (75 - longitud) + Sc - 12);
w1 = w - PI * (periodo / 60) / 24;
w2 = w + PI * (periodo / 60) / 24;
if ((w < -ws) || (w > ws)) {
    ra = 0;
}

```

```

}
else {
    ra = 12 * 60 / PI * 0.082 * dr * ((w2 - w1) * sin(latitud) * sin(ds) + cos(latitud) * cos(ds)
* (sin(w2) - sin(w1)));
}
if (complex_rso == true) {
    if ((w < -ws) || (w > ws)) {
        rso = 0;
    }
    else {
        sin_phi = sin(latitud) * sin(ds) + cos(latitud) * cos(ds) * cos(w);
        w_rad = 0.14 * ea * p / 10 + 2.1;
        kb = 0.98 * exp((( -0.00146 * p / 10) / (0.5 * sin_phi)) - 0.075 * pow((w_rad / sin_phi),
0.4));
        if (kb >= 0.15) {
            kd = 0.35 - 0.36 * kb;
        } else {
            kd = 0.18 + 0.82 * kb;
        }
        rso = (kb + kd) * ra;
    }
}
else {
    rso = ra * (0.75 + 2 * z * 1E-5);
}
rs2 = rs * 60 * periodo * 1E-6;
rms = (1 - 0.23) * rs2;

```

```

if ((w < -ws) || (w > ws)) {
    rnl = 2.043 / (60 / periodo) * 1E-10 * pow(t + 273.16, 4) * (0.34 - 0.14 * sqrt(ea)) *
(1.35 * 0.5 - 0.35);
}
else {
    rnl = 2.043 / (60 / periodo) * 1E-10 * pow(t + 273.16, 4) * (0.34 - 0.14 * sqrt(ea)) *
(1.35 * rs2 / rso - 0.35);
}
rn = rns - rnl;
if ((w < -ws) || ( w > ws)) {
    G = 0.5 * rn;
}
else {
    G = 0.1 * rn;
}
u2 = v * 4.87 / (log(67.8 * h_vel - 5.42));
et = (0.408 * delta * (rn - G) + gamma * 37 / (60 / periodo) * u2 * (eo - ea) / (t + 273)) /
(delta + gamma * (1 + 0.34 * u2));
if (et < 0) {
    et = 0;
}
return et;
}

// Funciones para la lectura de valores de los sensores y módulos para su almacenamiento
en las variables:

void acumParametros() {
    contador++;

```

```

buff_reloj = getFechaHora();
variables = getParametros();
t += variables.temp;
h += variables.hum;
p += variables.pres;
t2 += variables.t280;
h2 += variables.h280;
v += variables.vel;
d = variables.dir;
pp += variables.pp;
rml += variables.radML;
rv += variables.radV;
rir += variables.radIR;
ruv += variables.radUV;
r += variables.rad;

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(buff_reloj);
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(contador);
lcd.setCursor(2, 1); lcd.print("T:");
lcd.setCursor(4, 1); lcd.print(variables.temp, 0);
lcd.setCursor(7, 1); lcd.print("H:");
lcd.setCursor(9, 1); lcd.print(variables.hum, 0);
lcd.setCursor(12, 1); lcd.print("P:");
lcd.setCursor(14, 1); lcd.print(variables.pres, 1);
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("V:");
lcd.setCursor(2, 2); lcd.print(variables.vel, 0);

```

```

lcd.setCursor(4, 2); lcd.print("D:");

lcd.setCursor(6, 2); lcd.print(variables.dir);

lcd.setCursor(9, 2); lcd.print("PP:");

lcd.setCursor(12, 2); lcd.print(variables.pp, 0);

lcd.setCursor(14, 2); lcd.print("R:");

lcd.setCursor(16, 2); lcd.print(variables.rad, 0);

lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("E:");

lcd.setCursor(2, 3); lcd.print(eto, 5);

}

String getFechaHora() {
    reloj = rtc.now();

    char buff[] = FORMATO_FECHA;

    return reloj.toString(buff);
}

void contarAnemometro() {
    numRevsAnemometro++;
}

void contarPluviometro() {
    numGotasPluviometro++;
}

// Función para lectura de sensores
Variables getParametros() {
    float vel_unit = 666.98368; float pp_unit = 279.4;

    int val_dir, val_rad;

    byte x, lect_dir;

```

```

Variables var;

// Temperatura
var.temp = (sensorTH.readTemperature()) * 0.9444 + 1.123;

// Humedad relativa
var.hum = (sensorTH.readHumidity()) * 1.0604 - 4.8016;

// Presión barométrica
var.pres = (sensorPresion.readPressure() / 100.0) * 1.0146 - 13.7457;

// Velocidad del viento
vel_unit *= numRevsAnemometro / (float)MSEGS_DATO;
var.vel = vel_unit * 0.3822 - 0.1012;

if (var.vel < 0) {
    var.vel = 0;
}

numRevsAnemometro = 0;

// Dirección del viento
val_dir = analogRead(PIN_VELETA) >> 2;
lect_dir = val_dir;

for (x = 0; x < NUMDIRS; x++) {
    if (adc[x] >= lect_dir)
        break;
}

x = (x + dirOffset) % 16;

var.dir = strVals[x];

// Radiación solar del sensor ML8511:
var.radML = analogRead(PIN_RADIACION);

// Radiación solar del sensor SII145 en sus componentes: visible, infrarojo y ultravioleta:

```

```

var.radV = sensorVIRUV.readVisible();

var.radIR = sensorVIRUV.readIR();

var.radUV = sensorVIRUV.readUV();

// Radiación solar

var.rad = 0.3724 * var.radML + 1.0239 * var.radV + 0.0109 * var.radIR - 1.2285 *
var.radUV - 381.6753;

return var;
}

// Funciones para obtener el cálculo del promedio de los valores acumulados por los
sensores:

void getPromedio() {
    if (contador == cantidad_datos) {
        promedio.temp = t / cantidad_datos;
        promedio.hum = h / cantidad_datos;
        promedio.pres = p / cantidad_datos;
        promedio.t280 = t2 / cantidad_datos;
        promedio.h280 = h2 / cantidad_datos;
        promedio.vel = v / cantidad_datos;
        promedio.dir = d;
        promedio.pp = pp / cantidad_datos;
        promedio.radML = rml / cantidad_datos;
        promedio.radV = rv / cantidad_datos;
        promedio.radIR = rir / cantidad_datos;
        promedio.radUV = ruv / cantidad_datos;
        promedio.rad = r / cantidad_datos;

        eto = eto_FAO(MSEGS_CALC_FINAL / 1000 / 60, latitud, longitud, elev, buff_reloj,
promedio);

```

```

}
}

// Funciones para registrar y almacenar la información obtenida

void subirData() {
  subirBlynk();
  subirSD();
  t = 0; h = 0; p = 0; t2 = 0; h2 = 0; v = 0; pp = 0; rml = 0; rv = 0; rir = 0; ruv = 0; r = 0;
  contador = 0;
}

void subirBlynk() {
  if (online == 1) {
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Blynk-SI ");
    Blynk.virtualWrite(V0, promedio.temp);
    Blynk.virtualWrite(V1, promedio.hum);
    Blynk.virtualWrite(V2, promedio.pres);
    Blynk.virtualWrite(V3, promedio.t280);
    Blynk.virtualWrite(V4, promedio.h280);
    Blynk.virtualWrite(V5, promedio.vel);
    Blynk.virtualWrite(V6, promedio.dir);
    Blynk.virtualWrite(V7, promedio.pp);
    Blynk.virtualWrite(V8, promedio.radML);
    Blynk.virtualWrite(V9, promedio.radV);
    Blynk.virtualWrite(V10, promedio.radIR);
    Blynk.virtualWrite(V11, promedio.radUV);
    Blynk.virtualWrite(V12, promedio.rad);
    Blynk.virtualWrite(V13, eto);
  }
}

```

```

}
else {
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Blynk-NO ");
}
}

void subirSD() {
    archivo = SD.open(nombre_archivo, FILE_WRITE);
    if (archivo) {
        archivo.print(buff_reloj); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.temp, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.hum, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.pres, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.t280, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.h280, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.vel, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.dir); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.pp, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.radML, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.radV, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.radIR, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.radUV, 2); archivo.print(",");
        archivo.print(promedio.rad, 2); archivo.print(",");
        archivo.println(eto);
        archivo.close();
        lcd.setCursor(10, 3); lcd.print("SD-SI");
    }
}

```

```

else {
    probando_SD();
}
}

// Funciones para inicializar los sensores y/o módulos:

void LCD_Inicio() {
    int estado;

    estado = lcd.begin(LCD_COLS, LCD_ROWS);

    if (estado) {
        hd44780::fatalError(estado); // does not return
    }

    lcd.noBacklight();

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("LCD CORRECTO");

    delay(2500);
}

void SHT_Inicio() {
    if (!sensorTH.begin(0x44)) {
        lcd.setCursor(0, 0);

        lcd.print("SHT31 ERROR");

        while (1);
    }

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("SHT31 CORRECTO");

    delay(2500);
}

```

```

void BME_Inicio() {
  if (!sensorPresion.begin()) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("BME280 ERROR");
    while (1);
  }
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("BME280 CORRECTO");
  delay(2500);
}

void SD_Inicio() {
  while (!SD.begin(PIN_SD)) {
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("SD ERROR");
    delay(1000);
  }
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("SD CORRECTO");
  delay(2500);
}

void RTC_Inicio() {
  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  while (!rtc.begin()) {
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("RTC ERROR");
    delay(1000);
  }
}

```

```

}

lcd.setCursor(0, 3);

lcd.print("RTC CORRECTO");

delay(2500);

}

void SI1145_Inicio() {

while (!sensorVIRUV.begin(0x60, &myWire)) {

    lcd.setCursor(0, 3);

    lcd.print("SI1145 ERROR");

    delay(1000);

}

lcd.setCursor(0, 3);

lcd.print("SI1145 CORRECTO");

delay(2500);

}

// Funciones previas para inicializar la lectura de los sensores:

void creacion_Archivo() {

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Creando archivo");

    delay(2500);

    archivo = SD.open(nombre_archivo, FILE_WRITE);

    if (archivo) {

        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(" Archivo creado!");

        delay(2500);

        archivo.println(ENCABEZADO_TXT);

        archivo.close();

```

```

}
else {
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Error creando");
    delay(2000);
    while (1);
}
}
}

void conteo_Inicio() {
    while (1) {
        char formato[] = "hh:mm:ss";
        DateTime inicio = rtc.now();
        if ((inicio.minute() % tiempo_Inicio != 0) || (inicio.second() >= 1)) {
            char* buff = inicio.toString(formato);
            lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("Esperando inicio");
            lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(buff);
            delay(500);
        } else {
            lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Inicio mediciones !");
            break;
        }
    }
}

// Funciones para comprobar funcionamiento de algunos módulos y/o conexión a redes:
void probando_SD() {
    bool estado_SD = SD.begin(PIN_SD);
    if (estado_SD == false) {

```

```

SD.end();

lcd.setCursor(10, 3); lcd.print("SD-NO");

estado_SD = SD.begin(PIN_SD);

if (estado_SD == true) {

} else {

}

}

else {

    estado_SD = SD.begin(PIN_SD);

}

}

void WiFi_Inicio() {

    lcd.clear();

    lcd.print("Connecting WiFi...");

    WiFi.begin(ssid, pass);

    Blynk.config(auth);

    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED)

    {

        lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("No WiFi -> connect");

        WiFi.begin(ssid, pass);

        delay(2000);

        if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

            lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Cannot connect.");

            online = 0;

        } else {

            lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("WiFi Connected!");

```

```

    }
} else {
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("WiFi Connected!");
}
delay(2000);
}

void Blynk_Inicio() {
    if ( WiFi.status() == WL_CONNECTED && !Blynk.connected() ) {
        lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("No Blynk -> connect");
        delay(2000);
        Blynk.connect();
        if (!Blynk.connected() ) {
            lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Cannot connect.");
            online = 0;
        } else {
            lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Blynk Connected!");
            online = 1;
        }
    } else if ( WiFi.status() == WL_CONNECTED && Blynk.connected() ) {
        lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Blynk Connected!");
        online = 1;
    }
    delay(4000);
}

```

```

void CheckConnection() {
  if (!Blynk.connected()) {
    online = 0;
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
      WiFi.begin(ssid, pass);
      delay(400); //give it some time to connect
      if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        online = 0;
      }
      else {
      }
    }
  }
  else if ( WiFi.status() == WL_CONNECTED && !Blynk.connected() ) {
    Blynk.connect();
    if (!Blynk.connected()) {
      online = 0;
    }
    else {
      online = 1;
    }
  }
  }
  else {
    online = 1;
  }
}

```

```
extern "C" {  
    void SERCOM3_Handler(void);  
    void SERCOM3_Handler(void) {  
        myWire.onService();  
    }  
}
```

ANEXO 5: Manual de instalación, operación y mantenimiento del prototipo

Universidad Nacional Agraria La Molina

Facultad de Ingeniería Agrícola

Tesista: Bach. Edwar Riveros Chahuayo

Asesor: Dr. David Ricardo Ascencios Templo

Co-Asesor: Mg. Sc. Karem Belen Meza Capcha

Manual de Instalación Operación y Mantenimiento

Prototipo de Estación Agrometeorológica

Proyecto de tesis aprobado mediante Resolución de Facultad N° 287-19, de fecha 12 de setiembre de 2019, con título: “Prototipo de Estación Agrometeorológica Automática Basada en Sensores y Microcontroladores”.

PREFACIO

Información general

Este manual contiene información acerca de la operación e instalación del prototipo de estación agrometeorológica e información acerca de su mantenimiento para asegurar su funcionamiento prolongado en el momento en que se utilice.

Es importante tener en consideración que este equipo es un prototipo, cuyo objetivo es el de simular a una estación agrometeorológica automática y como tal, plantea un diseño y especificaciones técnicas que posteriormente podrían ser verificados y mejorados tanto en el aspecto funcional como en el estético y físico.

Algunas fotografías o ilustraciones mostradas en este documento presentan detalles o accesorios que pueden ser diferentes a las mostradas en campo, debido a que muchos componentes estructurales pueden ser reemplazados en la medida que mejoren el funcionamiento del equipo.

Seguridad

Este apartado abarcará las medidas de precaución que se deberán tomar para la operación y mantenimiento del prototipo, por lo que es importante tener en cuenta lo descrito en este apartado previo a cualquier tipo de acción sobre el equipo.

Instalación y Operación

En este apartado se describen las acciones que se deberán realizar para poner en funcionamiento el equipo de manera adecuada a través de una serie de instrucciones que el lector deberá seguir y comprender con ayuda de ilustraciones, las cuales favorecen lo explicado y describen los componentes del equipo y las técnicas para manipularlo.

Mantenimiento

Esta sección contiene las acciones que se deberán realizar para el mantenimiento del prototipo con la finalidad de evitar deterioros prematuros de los componentes que lo conforman. Además, también se hace mención de las acciones que se pueden tomar en caso algún componente del prototipo se deteriore o averíe por situaciones fortuitas e imprevisibles.

También se da una serie de recomendaciones para los intervalos de tiempo a considerar para el mantenimiento preventivo del prototipo, las herramientas a utilizar y los contactos disponibles para el asesoramiento personal.

1. SEGURIDAD

1.1. Baterías

Las baterías solares utilizadas para el almacenamiento de energía son baterías de plomo ácido, debido a que utilizan como electrolito una disolución de ácido sulfúrico. Este mismo puede causar daños cuando se pone en contacto con la piel o la vista; por lo que se deben tomar las siguientes precauciones al momento de manipular estas baterías:

- Utilizar guantes de protección y lentes de seguridad para evitar el contacto directo con la batería.
- Lavado de manos luego de manipular la batería.
- Riesgo de quemaduras por fuego, explosión o incendio causado por la batería ante condiciones extremas de temperatura o incineración inducida.
- Evitar colocar la batería en zonas donde haya fuentes de calor con temperaturas mayores a 60 °C y evitar incinerar la batería.
- No desarmar la batería si no es en un lugar especializado, con protección y con personas calificadas para dicho trabajo.
- No cargar la batería dentro de un contenedor de gas cerrado.

1.2. Herramientas y máquinas

Debido a que el equipo es un prototipo, es común encontrar piezas de materiales (acero, madera, plástico) que fueron manipulados mecánicamente para adaptarlos a la forma deseada utilizando herramientas y/o máquinas. El accionar de dichos elementos deberán hacerse tomando las precauciones necesarias si se hacen por cuenta propia ya sea para el reemplazo de piezas o la réplica de otro prototipo:

- Utilizar equipos de protección personal para el trabajo mecánico con herramientas de corte, perforación o torque.
- Instruirse a través de manuales o alguna fuente de información confiable acerca del uso de herramientas o máquinas mecánicas antes de realizar el manipuleo.
- Guardar las herramientas o máquinas en lugares seguros de tal forma que estos no generen el riesgo de caída y golpear al usuario por estar a un nivel elevado e inestable, de golpe por no estar en un lugar visible o al alcance de personas inexpertas, menores de edad o discapacitados.
- Solicitar el servicio de manipuleo mecánico a terceros o contar con un personal especializado en dichas labores para realizarlas con su asesoramiento.

1.3. Lesiones

Existen elementos pesados presentes en el prototipo que generalmente son metálicos, tales como el trípode, el mástil de la estación, estructuras de soporte para que los sensores estén a un nivel de elevación recomendado, pernos y tuercas, perfiles, entre otros; por ello se debe tener precaución al momento de transportar el prototipo o desmontarlo *in-situ*, estas situaciones y medidas de prevención se describen a continuación:

- El montaje o desmontaje de las piezas de la estación deben realizarse con ayuda de una escalera con un buen soporte o plataformas niveladas y estables, debido a que los soportes metálicos del prototipo y otros componentes que pudieran existir se encuentran a dos metros o más sobre el suelo.
- No es recomendable transportar el prototipo sin ser desensamblado al menos en dos partes debido al peso que este representa y a su longitud, ya que puede generar accidentes de golpes o cortes, o chocar con algún obstáculo o alguna persona.
- Si algún elemento representa un peso que el usuario no pueda tolerar por alguna lesión existente o cualquier situación que pueda dificultar soportar el peso, evitar realizar el transporte por sí mismo, debido a que podría incrementar el riesgo de lesiones por golpes, corte o incluso perforación.

2. INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DEL EQUIPO

2.1. DATOS GENERALES

PROYECTO : Prototipo de Estación Agrometeorológica Automática basada en Sensores y Microcontroladores.

FACULTAD : Ingeniería Agrícola

UNIVERSIDAD : Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM

TESISTA : Edwar Riveros Chahuayo

ASESOR : Dr. David Ricardo Ascencios Templo

CO-ASESORA : Mg. Sc. Karem Belen Meza Capcha

2.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Este es un prototipo que simula a una Estación Agrometeorológica Automática (EAMA), cuyo objetivo es realizar observaciones de manera automática acerca de las variables de temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento, dirección del viento, radiación solar y evapotranspiración del cultivo de referencia. Sus principales características son las siguientes:

- Ofrecer un grado de precisión y resolución adecuada en sus mediciones para satisfacer las normativas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Portabilidad y estabilidad para el cambio de ubicación de la estación según se requiera.
- Fuente energética independiente de la red a través de un sistema fotovoltaico comprendido por: panel solar, batería y controlador de carga.
- Bajo costo de los sensores y microcontroladores, además del uso de software y hardware de acceso o código abierto.
- Capacidad de almacenar información en la estación propia a través de una memoria interna extraíble y transmisión de información a través de WiFi con visualización en tiempo real a través del aplicativo Blynk.

2.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

2.3.1. Equipo en general

Variables observadas: Temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, radiación solar, evapotranspiración del cultivo de referencia;

- Altura: 2.60 metros
- Frecuencia de lecturas tomadas de cada sensor: cada 10 segundos
- Frecuencia de registros observables: cada 1 minuto, 5 minutos, 15 minutos
- Aplicativo de visualización: Blynk
- Tipo de conectividad inalámbrica: WiFi
- Tipo de soporte: trípode metálico con mástil y accesorios de montaje
- Microcontrolador: Arduino MKR WiFi 1010
- Módulo de temperatura y humedad relativa: SHT31
- Módulo de presión barométrica: BME280
- Módulo velocidad y dirección del viento: Weather Meter – Sparkfun
- Módulo de radiación solar: GY-ML8511 y SI1145 – Grove
- Fuente energética: Sistema fotovoltaico a 12V
- Módulo de reloj: Real Time Clock DS3231
- Módulo de memoria extraíble: Adaptador de tarjeta de memoria MicroSD
- Módulo de visualización en campo: LCD de 20 columnas y 4 filas

2.3.2. Microcontrolador

Es el dispositivo encargado de ejecutar las funciones programadas por el usuario, en este caso el microcontrolador utilizado es la placa Arduino MKR WiFi 1010, el cual es una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés), el cual es comercializado por la compañía Arduino y posee en su interior tres dispositivos importantes: un chip de la serie NINA-W10, de la compañía U-blox, el cual permite la comunicación inalámbrica al módulo como Bluetooth y Wi-Fi; un chip procesador Cortex-M0 32-bit de la familia de chips SAMD21, de la compañía Microchip Technology Inc., que es el procesador central y es programado por el usuario a través de códigos de programación compatibles; y un chip de cripto-autenticación ATECC508A de la compañía Microchip Technology Inc., que protege la comunicación inalámbrica e información del usuario mediante criptografía ante cualquier perturbación cibernética.

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Arduino.

Arduino MKR WiFi 1010

- Dimensiones del PCB: 61.5 mm x 25 mm
- Peso del PCB: 32 g
- Temperatura de almacenamiento: -40 °C a 85 °C.
- Máximo voltaje de entrada por USB o pin VIN: 5.5 V.
- Voltaje de pines de salida y entrada: 3.3 V
- Tipo de batería: Celda única Li-Po de 3.7 V y 1024 mAh mínimo.
- Tipo de conector de batería: JST.
- Frecuencia de reloj interno: 32.768 kHz
- Software para programación de la placa: Arduino IDE.
- Tipo de cable conector para alimentación o PC: USB Micro-B.
- Pines: 6 pines de LED interno, 8 pines de entrada y salida digital, 7 pines de entrada analógica (ADC 8/10/12 bits), 1 pin de salida analógica (DAC 9 bits), 13 pines PWM y 10 pines de interrupción externa
- Tipos de conectividad inalámbrica: Wi-Fi y Bluetooth, con dispositivo de seguridad
- Protocolos de comunicación: UART, SPI, I²C

SAMD21G18A

- Tipo de procesador: ARM Cortex M0+.
- Velocidad de procesador: 48 MHz.
- Memoria Flash: 256 KB
- Memoria SRAM: 32 KB
- Número total de pines: 48

NINA-W102

- Tipo de chip: Dual Core Tensilica LX6.
- Velocidad de procesador: hasta 240 MHz.
- Memoria Flash: 2 MB

- Memoria ROM: 448 KB
- Memoria SRAM: 520 KB
- Frecuencia Wi-Fi: 2.4 GHz, 13 canales

2.3.3. Módulo de temperatura y humedad

El módulo utilizado para el registro de las variables de temperatura del aire y humedad relativa del aire es el módulo SHT31, el cual es una placa de circuito impreso que contiene al sensor SHT31, el cual pertenece a la familia de sensores de temperatura y humedad SHT3x-DIS de la compañía Sensirion y es un chip o circuito integrado que contiene en su interior a un sensor de humedad capacitivo con una estructura interdigitada y un sensor de temperatura de banda prohibida basado en transistores BJT (bipolar junction transistorbased silicon bandgap temperature sensor).

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Sensirion.

General:

- Dimensiones del chip del sensor: 2.5 mm x 2.5 mm x 0.9 mm
- Dimensiones del PCB: 12.5 mm x 10 mm
- Dimensiones del encapsulado: 58.5 mm x 26.0 mm x 11.5 mm
- Peso del módulo con el encapsulado: 18 g
- Conector: Adaptado mediante conector RJ11 (4 hilos).
- Voltaje de suministro: 2.15 V mínimo, 3.3 V típico y 5.5 V máximo.
- Corriente suministrado: hasta 1.5 mA máximo, cuando el sensor está midiendo.
- Temperatura de operación: -40°C a 125°C.
- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: I²C con dirección 0x44.

Humedad Relativa:

- Exactitud: ±2% de manera típica y ±2.5% aproximadamente como máximo en el rango de 0 a 90% y hasta ±3.5% aproximadamente a partir de 90% en adelante.
- Resolución: 0.01%
- Rango de medición: 0% a 100%

- Desviación a largo plazo: <0.25% por año de manera típica y <0.50% por año máximo.
- Tiempo de respuesta: hasta 8 segundos para lograr el 63% del valor final

Temperatura:

- Exactitud: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ de manera típica en el rango de 0°C a 30°C y hasta $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de -40°C a 0°C y de 90°C a 125°C ; y máximo $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ en el rango de -40°C a 90°C y hasta $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ aproximadamente a partir de 90°C .
- Resolución: 0.01°C
- Rango de medición: -40°C a 125°C .
- Desviación a largo plazo: $<0.03^{\circ}\text{C}$ por año máximo.
- Tiempo de respuesta: mayor a 2 segundos para lograr el 63% del valor final.

2.3.4. Módulo de presión barométrica

El módulo utilizado para realizar las mediciones de presión barométrica es el módulo BME280, el cual es una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) que contiene al sensor BME280, de la compañía Bosch Sensortec y es un circuito integrado con cubierta metálica que contiene en su interior un sensor de presión piezo-resistivo y además un sensor de temperatura y uno de humedad incluido.

Este módulo es compatible y similar a los módulos predecesores BMP280 y BMP180 en el aspecto de reducción de ruidos de información, exactitud, resolución para la variable de presión barométrica y además incluye sensores para la medición de temperatura y humedad.

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Bosch Sensortec.

General:

- Dimensiones del chip del sensor: 2.5 mm x 2.5 mm x 0.93 mm
- Dimensiones del PCB: 15 mm x 11.5 mm
- Peso del módulo: 2 g
- Longitud de cable: 0 metros, conectado directamente a la placa central
- Conector: Header o conector Dupont de 6 pines
- Voltaje de suministro: 1.71 V mínimo, 1.8 V típico y 3.6 V máximo

- Corriente suministrado: hasta 714 μA máximo, cuando el sensor está midiendo presión
- Temperatura de operación: -40°C a 65°C
- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: I²C con dirección 0x76

Presión barométrica:

- Exactitud relativa: ± 0.12 hPa de manera típica a 3.3V
- Resolución: 0.18 Pa
- Rango de medición: 300 hPa a 1100 hPa
- Estabilidad a largo plazo: ± 1.0 hPa por año.
- Frecuencia de muestreo posible: 157 Hz mínimo y 182 Hz típico

2.3.5. Módulo de velocidad y dirección del viento

El módulo utilizado para la medición de precipitación, velocidad de viento y dirección de viento es el módulo Weather Meter, el cual es un conjunto de dispositivos con sensores incorporados internamente para la medición de los parámetros mencionados, de la empresa Sparkfun Electronics. Este incluye: un anemómetro de cazoletas, el cual es un dispositivo para la medición de velocidad de viento, basado en las señales generadas por un interruptor magnético (reed-switch) para cada rotación de las cazoletas; una veleta, para la medición de dirección de viento, basado en varios interruptores magnéticos orientados a los puntos cardinales y valores diferentes de resistencia eléctrica asignados a cada uno; y un pluviómetro de cubeta basculante, que mide la precipitación pluvial a través de un sistema de balancines calibrados y un interruptor magnético.

Este conjunto de dispositivos que conforman al módulo Weather Meter incluyen soportes estructurales y una barra de aluminio para anclarlos, formando así una sola estructura con la capacidad de medir tres variables meteorológicas.

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Sparkfun Electronics.

General:

- Conector: Adaptado mediante conector RJ11 (4 hilos)
- Voltaje de suministro: 3.3 V y 5.0 V típico

- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: Interrupciones digitales para el sensor de velocidad de viento y de precipitación; y salida analógica para el sensor de dirección de viento.

Velocidad del viento:

- Altura de instalación: 2.50 m
- Peso del anemómetro: 100 g
- Dimensión del PCB: 29.6 mm x 17.6 mm
- Peso del PCB: 15 g
- Resolución: 0.33 m/s
- Exactitud: 0.17 m/s (Valor de calibración del prototipo)

Dirección del viento:

- Altura de instalación: 2.50 m
- Peso de la veleta: 190 g
- Dimensión del PCB: 49.5 mm de diámetro
- Peso del PCB: 15 g
- Resolución: 22.5° (16 puntos cardinales).
- Rango de medición: 0° a 360°.
- Exactitud: $< \pm 22.5^\circ$

2.3.6. Módulo de radiación solar

Los módulos utilizados para la medición de la radiación solar son el módulo GY-ML8511 y SI1145 – Grove, los cuales son dispositivos en forma de placas de circuito impreso (PCB) que contienen a los sensores propiamente dichos. El primero contiene en su interior al sensor ML8511 de la compañía LAPIS Semiconductor, que consiste en un chip que incluye un fotodiodo sensible a la radiación UV-A y UV-B; mientras que el segundo módulo contiene al sensor SI1145 de la compañía Silicon Laboratories, el cual, de manera similar, es un circuito integrado que contiene en su interior como sensor dos fotodiodos altamente sensibles al espectro visible e infrarrojo del espectro electromagnético.

El módulo de radiación solar está conformado por dos módulos montados sobre ambos extremos de una estructura de soporte idéntica al módulo para la medición de viento y precipitación. Cada módulo se ubica dentro de una cubierta protectora ante agentes perjudiciales para los circuitos como el polvo y la humedad ambiental, que además tiene la

parte superior descubierta, por lo que es necesario la colocación de una lámina o capa protectora que no altere las mediciones de radiación solar. Se utilizaron dos módulos con la finalidad de abarcar gran parte del espectro electromagnético de la radiación solar y calibrarlos en conjunto para determinar mayor correlación con los valores de referencia.

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Sparkfun Electronics.

General:

- Altura de instalación: 2.60 m
- Dimensión del protector: 80 mm x 44 mm x 30.5 mm

GY-ML8511:

- Dimensión del PCB: 13.0 mm x 11.2 mm
- Peso del PCB: 0.9 g
- Conector: Adaptado mediante conector RJ11 (4 hilos).
- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: Salida analógica.
- Voltaje de operación: 2.7 V mínimo, 3.3 V típico y 3.6 V máximo.
- Corriente suministrada: 300 μ A típico y 500 μ A máximo.
- Temperatura de almacenamiento: -30 °C a 85 °C.
- Temperatura de operación: -20 °C a 70° C
- Rango de medición: 0 W/m² a 150 W/m² de intensidad UV a 365 nm de longitud de onda.
- Respuesta espectral: 280 nm a 560 nm con pico en 365 nm.

SI-1145 – Grove:

- Dimensión del PCB: 26.7 mm x 21.4 mm
- Peso del PCB: 2.5 g
- Conector: Adaptado mediante conector RJ11 (4 hilos).
- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: I²C con dirección 0x60.
- Voltaje de suministro: 1.71 V mínimo y 3.6 V máximo.
- Temperatura de operación: -40° C mínimo, 25 °C típico y 85°C máximo.
- Espectros: Rango visible, infrarrojo y ultravioleta.

2.3.7. Módulo de reloj de tiempo real

Este módulo cumple la función de gestionar el tiempo en el sistema en cada instante en que se pone en funcionamiento, consiste en una placa de circuito impreso (PCB) de la compañía Maxim Integrated Products, que contiene integrado un oscilador de cristal con temperatura compensada. Este dispositivo se encarga de mantener actualizada la información de fecha y hora teniendo en consideración los meses cuya cantidad de días es menor a 31 y correcciones por años bisiestos.

El módulo se encuentra conectado directamente a la placa central del sistema y se recomienda incorporar una batería, ya que el dispositivo puede incluirlo para que, en caso de desconexión, dicho módulo no pierda la secuencia de tiempo.

Algunas de sus principales características técnicas se presentan a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del producto, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Maxim Integrated Products.

- Dimensiones del PCB: 37.8 mm x 21.2 mm
- Peso del módulo: 7.6 g
- Conector: Header o conector de regleta de 6 pines.
- Temperatura de operación: -40°C a 85°C.
- Voltaje de trabajo: 2.3 V mínimo, 3.3 V típico y 5.5 V máximo.
- Voltaje de batería incluida: 2.3 V mínimo, 3.0 V típico y 5.5 V máximo.
- Corriente suministrada: 300 μ A máximo para $V_{cc} = 5.5$ V y 200 μ A máximo para $V_{cc} = 3.63$ V.
- Protocolo de comunicación con el microcontrolador: I²C con dirección 0x57.
- Frecuencia de salida: 32.768 kHz.
- Exactitud: ± 2 ppm desde 0 °C a 40 °C y ± 3.5 ppm desde 40 °C a 70 °C.
- Resolución: 1 segundo.

2.3.8. Módulo de memoria extraíble:

Este módulo tiene la función de actuar como datalogger del sistema, es decir, tiene la capacidad de funcionar como interface de comunicación entre el microcontrolador y una memoria extraíble con la finalidad de transmitir información codificada como textos, números u otros caracteres, dicha información se refiere a las mediciones realizadas por los sensores y sus fechas y horas respectivas. Este módulo consiste en una placa de circuito

impreso (PCB), conformado principalmente por el zócalo para memoria tipo microSD, un chip de control lógico y un regulador de voltaje; los cuales permiten la comunicación entre la memoria extraíble del zócalo y el microcontrolador.

No se cuenta con mucha información sobre el módulo, debido a la gran variedad de fabricantes no reconocidos a través de los portales web, no obstante, el modelo HW-125 es uno de los pocos identificables existentes en el mercado y la información técnica se puede encontrar en internet. Información relevante y que concierne al prototipo se muestra a continuación.

- Dimensiones del PCB: 42 mm x 24.5 mm
- Peso del módulo: 6 g
- Longitud de cable: 0 metros, conectado directamente a la placa central.
- Conector: Header o conector de regleta de 6 pines.
- Voltaje de operación: 3.3 V y 5 V típico.
- Protocolo de comunicación: Interface SPI.
- Codificación: UTF-8
- Tipo de memoria extraíble: Tarjeta de memoria microSD.

2.3.9. Módulo de visualización:

Este módulo consiste en una pantalla LCD y permite mostrar determinada información que se programe mediante el microcontrolador, como: información de las variables meteorológicas en tiempo real, estado de la transmisión de datos y estado de los módulos. Este módulo consiste en una placa de circuito impreso (PCB) con un panel LCD incorporado y un módulo externo adherido por soldadura para permitir al primero conectarse al microcontrolador con una cantidad menor de conectores.

Existen en el mercado variedades de este módulo que varían la cantidad de filas y columnas disponibles para mostrar, pero operan de la misma forma. Además, existen variedad de fabricantes, por lo que las características mostradas a continuación son concernientes a las utilizadas en el prototipo y extraídas de las hojas de datos provistas por las tiendas desde las cuales fueron adquiridos.

- Voltaje de operación: 5 V típico.
- Número de filas disponibles: 4
- Número de columnas disponibles: 20
- Dimensión de la PCB: 97.9 mm x 59.7 mm

- Dimensión del panel LCD: 97 mm x 39.7 mm
- Peso del módulo: 75.2 g
- Posición del módulo: Tapa de la caja de PVC con la pantalla hacia el exterior.
- Módulo externo adherido: PCF8574T – Extensor de 8 bits para bus I²C.
- Protocolo de comunicación: I²C con dirección 0x27 o 0x20, de acuerdo al fabricante.

2.3.10. Fuente energética

Consiste en un conjunto de dispositivos que permiten dotar de energía eléctrica al prototipo para su funcionamiento independiente de la red eléctrica, este conjunto conforma lo que se denomina como sistema fotovoltaico y está compuesto por: un panel solar, una batería solar, un controlador de carga y dos reguladores de carga “step-down”; siendo lo último un dispositivo inusual en dichos sistemas.

Es posible encontrar en el mercado una gran variedad de fabricantes de dichos dispositivos, por lo que las características mostradas a continuación son las referentes al prototipo y en base a información del producto encontrado en internet o proporcionada por el proveedor de turno.

Panel Solar:

- Dimensiones del módulo: 465 mm x 295 mm x 25 mm
- Peso del módulo: 1.7 Kg
- Potencia pico: 20 W
- Intensidad de Corto Circuito (Isc): 1.2 A
- Tensión nominal (V): 12 V
- Tensión pico (Vp): 18 V
- Tensión en circuito abierto (Voc): 2.22 V

Batería Solar:

- Tipo de batería: VRLA (batería de ácido-plomo regulada por válvuloa) o batería sellada.
- Voltaje nominal de trabajo: 12 V.
- Capacidad de trabajo: 18 Ah
- Cycle use: voltaje necesario para estar completamente cargada, pero que no se debe mantener para evitar daño a las celdas – 14.6 V a 14.8 V.

- Standby use: voltaje que la batería puede mantener una vez cargada, para mantenerla en buenas condiciones. 13.6 V a 13.8 V.
- Dimensiones: 17.9 cm x 7.4 cm x 16.3 cm
- Peso: 5.016 kg

Controlador de carga:

- Modelo: LD2410UC
- Dimensiones: 14.1 cm x 7.6 cm x 3.5 cm
- Peso: 175.5 g
- Voltaje nominal: 12/24 V
- Corriente nominal: 10 A
- Máximo voltaje: 50 V
- Máxima potencia de entrada: 130 W (12 V) y 260 W (24 V)
- Energía de salida por puerto USB: 5 V y 1 A

Regulador de voltaje:

El regulador de voltaje es una placa de circuito impreso que en su interior contiene un circuito integrado denominado LM2596 y otros elementos pasivos; algunas características de la placa se muestran a continuación, para información adicional más detallada se deberá consultar la hoja de datos (datasheet) del circuito integrado, el cual puede ser encontrado en internet a través del portal de la compañía Semiconductor Components Industries – “ONSEMI”.

- Dimensiones del módulo: 43.1 mm x 20.8 mm
- Peso del módulo: 11.3 g
- Rango de temperatura de almacenamiento: -65 °C a 150 °C.
- Voltaje de entrada: 4.5 V a 40 V.
- Eficiencia de conversión: 92 %.
- Voltaje de salida: 1.23 V a 37 V. (mínimo 1.5 V menor al voltaje de entrada).
- Potencia de salida: 25 W.
- Corriente de salida máxima: 3 A (2.5 A recomendado).
- Protección de corto circuito: hasta 5 A.

2.4. INSPECCIÓN DEL ÁREA DE INSTALACIÓN

Con la finalidad de garantizar la fiabilidad de los datos provistos por el prototipo, este deberá ser instalado en un lugar que cumpla mínimamente los requisitos planteados por la OMM y el SENAMHI, tales como:

- Superficie aledaña plana y con un tipo de suelo diferente a hormigón, asfalto o roca triturada.
- Se recomienda que la zona exacta de instalación tenga una vegetación de pasto verde de altura uniforme de aproximadamente 12 cm, cuya vegetación sea homogénea en toda el área y provisto de agua continuamente.
- Uniformidad en las características topográficas.
- Presencia de zonas agrícolas, cultivos o zonas vegetativas de interés; cuyas áreas serán monitoreadas y representadas por la zona escogida para la instalación.
- Evitar cercanía de sistemas por aspersión, zonas inundables, cauces de ríos u otros cuerpos de agua no representativos.
- Evitar cercanía de fuentes de calor que puedan alterar la zona de medición.
- Evitar infraestructuras artificiales como edificios, cuyas dimensiones puedan alterar las mediciones realizadas.
- Asegurar la zona ante posibles y futuros daños, robos o ingresos de personas no autorizadas.

2.5. ENSAMBLAJE DEL PROTOTIPO

A continuación, se presenta el proceso de ensamblaje del prototipo a partir de cada uno de sus módulos y estructuras.

2.5.1. Trípode de estación meteorológica

El trípode de estación meteorológica es una estructura que consiste en la habilitación de la estructura para el soporte de los demás componentes. Este prototipo de estación agrometeorológica es montado sobre una estructura compuesta de tres elementos: un trípode con brazos ajustables, una barra de montaje intermedia y una barra que es acoplada sobre la primera; además de los pernos y tuercas que apoyan la sujeción de estos elementos. En conjunto estos conforman un trípode para montaje de estaciones meteorológicas de la compañía Davis Instruments, de la cual se adquirió.

La estructura utilizada en este prototipo, véase Figura 95, posee las características suficientes para dar funcionalidad al equipo y es recomendable su uso, pero no

imprescindible, ya que es posible utilizar algún otro tipo de estructura de soporte, ya sea de una compañía diferente o incluso de una composición diferente, con la condición de que aquella cumpla con algunos requisitos mínimos que serán mostrados a continuación:

- Estabilidad de la estructura al momento del montaje de los demás elementos.
- Altura total de por lo menos 2 metros y medio.
- Material resistente a condiciones climáticas de elevada humedad, alta radiación y precipitación pluvial.
- Resistencia a la fuerza cortante por el peso de los elementos empotrables.
- Evitar materiales que ante el desgaste puedan formar elementos cortantes.

Una vez identificado el tipo de estructura a utilizar para el montaje, ensamblarlo según el manual de instalación o de instrucciones provistas por el proveedor, y armarlo sobre una superficie horizontal a nivel de piso terminado, verificando la nivelación de los postes de manera totalmente vertical. Será recomendable utilizar herramientas mecánicas y elementos de apoyo como: desarmador, alicates, cuchillas, llave francesa, nivel de mano, huincha mayor a 3 metros, escaleras, cuerdas, entre otros; tomando las precauciones del caso para evitar daños por golpes o caídas.



Figura 95: Trípode de EMA Davis ensamblado, sin mástil superior.

2.5.2. Panel solar y estructura

El panel solar es la fuente energética del prototipo y su funcionamiento depende de su exposición a la radiación solar en el aspecto de orientación del panel y ángulo de inclinación. La orientación del panel solar siempre será hacia la línea ecuatorial desde la posición del mismo, es decir, si nos encontramos en Lima – Perú, cuya latitud se encuentra en el hemisferio sur o inferior a la línea ecuatorial, el panel deberá ser colocado orientado hacia el norte magnético con ayuda de una brújula calibrada. Luego, en cuanto a la inclinación del panel con respecto a una superficie horizontal, esta deberá ser de 45°.

El panel seleccionado tiene las dimensiones descritas en el apartado de especificaciones técnicas de la fuente energética, es común no encontrar disponible en el mercado elementos de soporte y anclaje para el panel, por ello, se diseñó una estructura metálica que pueda sujetar al panel solar y ser montado al poste del trípode. Es importante mencionar que la estructura puede ser reemplazada por otro diseño planteado por el usuario, siempre y cuando se tomen las siguientes recomendaciones:

- Material metálico o alguno otro resistente al corte y el peso del panel.
- Material resistente a condiciones climáticas de elevada humedad, alta radiación y precipitación pluvial.
- Sujetado al panel a través de su marco de aluminio para evitar perforar las celdas.
- Anclaje al poste por medio de abrazaderas o estructura similar y asegurando que encaje con su diámetro.
- Mecanismo de giro para variación de inclinación del panel (opcional).
- Evitar dimensiones que incrementen el peso del soporte y perjudiquen su estabilidad.

Una vez identificado el tipo de estructura que se utilizará para el montaje, instalar el panel sobre la estructura de soporte y anclarla sobre el poste metálico asegurando su fijación con pernos y tuercas, y que no provoque volteo e inestabilidad a todo el prototipo, véase Figura 96.

Será recomendable utilizar herramientas mecánicas y elementos de apoyo como: desarmador, alicates, cuchillas, llave francesa, nivel de mano, huincha mayor a 3 metros, escaleras, cuerdas, entre otros; tomando las precauciones del caso para evitar daños por golpes o caídas.

Es importante tomar en consideración la longitud y sección transversal de los cables que serán utilizados para conectar el panel solar con el controlador de carga, se recomienda utilizar cables cuya longitud sea suficiente para alcanzar a la zona en la que esté el controlador y cuya sección sea la correspondiente a un cable tipo AWG #14 como mínimo. Además, es recomendable utilizar cables tipo vulcanizado de dos hilos de color negro y rojo para garantizar la protección de los cables internos y su distinción por polaridad.



Figura 96: Panel solar, estructura del mismo y trípode.

2.5.3. Batería solar y caja de protección

El sistema fotovoltaico está conformado, además del panel solar, por la batería solar y el controlador de carga; por ello, se requiere que estos elementos formen parte del prototipo, no obstante, a diferencia del panel solar que debe estar expuesto a la radiación solar, los otros dos elementos deben estar protegidos de esta y además de la humedad y del polvo debido a la presencia de contactos eléctricos en la batería que pueden llegar a oxidarse o de elementos electrónicos en el controlador de carga. En este prototipo se utilizó una caja de conexiones eléctricas de material PVC, sus dimensiones pueden ser de 30cm x 30cm x 10cm o menos, de acuerdo a la dimensión de la batería y regulador de carga utilizados, además de poseer una tapa para hermetizar la cámara con tornillos de punta fina en sus cuatro esquinas.

Es posible optar por otras opciones como cajas de conexión de materiales metálicos, siempre y cuando garanticen evitar el paso de humedad, polvo y radiación; y que no sean afectados exteriormente; también es posible utilizar servicios de impresión 3D en

materiales artificiales para personalizar diseños de cajas de protección que puedan optimizar espacios y orden; ello de acuerdo al presupuesto disponible y deberán cumplir las condiciones de hermeticidad necesaria para mantener a los elementos protegido de los agentes mencionados anteriormente.

Para montar la caja de protección al prototipo, véase Figura 97, se utilizó una estructura metálica de anclaje que consiste en una abrazadera de diámetro regulable soldado a un perfil “L” y éste a una platina transversal en la base de la caja que se sujetan a la caja por medio de remaches. Se pueden tomar las mismas consideraciones que con la estructura de soporte del panel solar en cuanto al tipo de material recomendado y el diseño para la elaboración de un soporte personalizado.



Figura 97: Instalación de caja de protección para batería y regulador de carga.

Los cables utilizados para la conexión del regulador de carga con el conector de alimentación energética de la placa central del prototipo deberán ser cables independientes de diferentes colores de un diámetro mínimo correspondiente al tipo AWG #14.

2.5.4. Unidad central del prototipo y caja de protección

La unidad central del prototipo, véase Figura 98, que se encarga de la adquisición de información de los sensores y módulos, procesamiento de datos y transmisión de los mismos, será instalado en el prototipo para contar con una comunicación a través de cables y conectores entre los sensores y módulos, y el microcontrolador programable. Esta unidad

central es una placa de circuito montado en una placa de matriz de puntos y cuyas pistas de conducción son generadas por soldadura de acuerdo al esquemático de conexiones. Además, consta de los siguientes elementos conectores: 5 conectores de tipo RJ11 para los módulos con sensores para medición de: temperatura y humedad (SHT11), precipitación (Weather Meter), velocidad y dirección del viento (Weather Meter), radiación UV (ML8511) y finalmente, radiación solar (SI1145 – Grove); cuyo orden de mención corresponde al orden de izquierda a derecha en la placa central visto desde la parte superior.

- 4 conectores tipo header o Dupont hembra para los módulos de reloj de reloj (RTC DS3231), de memoria extraíble (adaptador de tarjeta microSD), de visualización (LCD 20x4) y del sensor de presión barométrica (BME280).
- 2 hileras de conectores tipo header o Dupont hembra para el microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010, de 14 puntos para cada hilera.
- 2 grupos de conectores tipo header o Dupont distribuidos en cuatro puntos por cada grupo, para cada módulo regulador de voltaje (step-down LM2596).
- 1 conector tipo bornera para el cable de alimentación proveniente del controlador de carga del sistema fotovoltaico.

Adicionalmente, la placa cuenta con un interruptor deslizante pequeño de tres pines que permitirán el paso o el corte de la energía proveniente del controlador de carga.

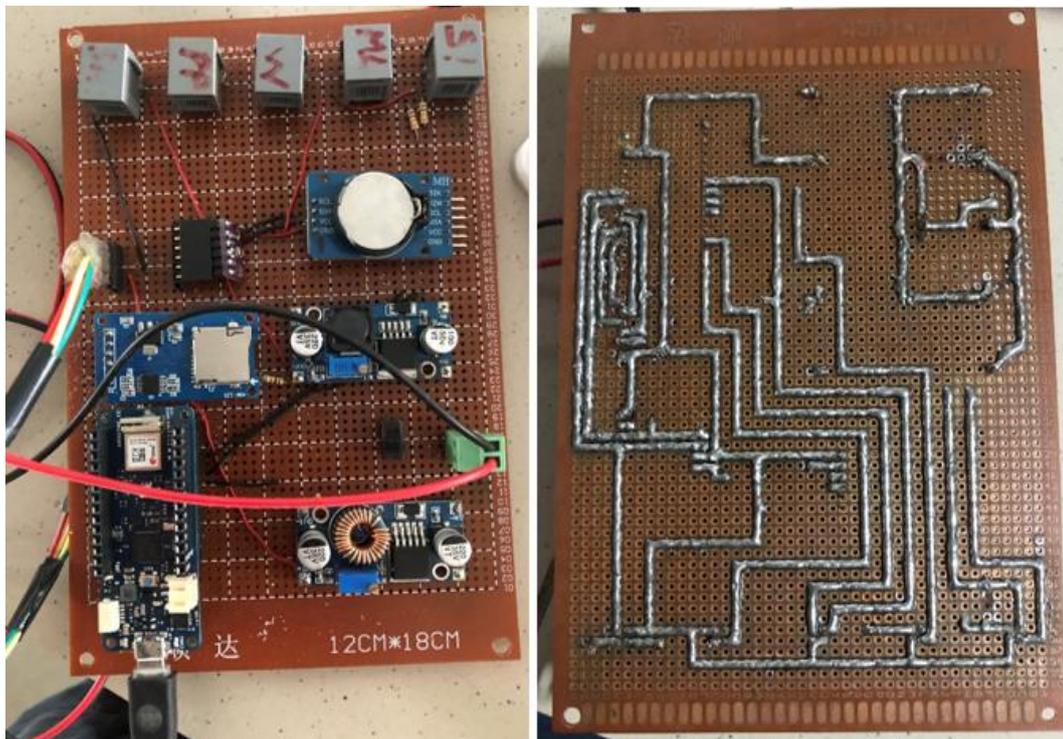


Figura 98: Placa de conexiones correspondiente a la unidad central del prototipo.

Esta placa fue generada de acuerdo a un esquemático de conexiones y a un diseño para PCB, que fue adaptado manualmente a esta placa de matriz de puntos. Este es montado sobre una plancha de madera MDF y este a su vez es montado a la parte posterior de la caja de protección para mantener una posición vertical con los conectores RJ11 dirigidos hacia arriba. El montaje se realizó con pernos y tuercas haciendo uso de herramientas manuales.

La caja de protección es similar a la utilizada para la protección de la batería solar y el regulador de carga, es decir, es una caja de conexión eléctrica de PVC, véase Figura 99, cuyas dimensiones son de 30 cm de ancho, 30 cm de largo y 8 cm de profundidad y posee una tapa para hermetizar la cámara con tornillos de punta fina en las cuatro esquinas de la tapa cuadrada. Además, se tomaron las mismas consideraciones para la selección de dicha caja y se podrá tomar en cuenta las mismas recomendaciones para optar por otras alternativas.

Para el montaje de esta caja de protección se optó por utilizar una platina de acero soldada a una abrazadera del mismo material, que puede ser regulable al diámetro del elemento sobre el que se sujetará, mientras que la platina se podrá enganchar a la parte trasera de la caja de protección a través de remaches o pernos y tuercas.



Figura 99: Caja de protección para la unidad central del prototipo.

Se utilizaron en este caso cables planos de 4 hilos, utilizados comúnmente para conexiones telefónicas, para conectar los módulos con los sensores a los conectores RJ11 de la placa central. Luego, la alimentación eléctrica del microcontrolador es independiente a la de los módulos y sensores, los cuales se alimentan a través de la bornera y se controlan con el interruptor, es decir, se alimentará a través de su conector micro USB (USB-B),

cuyo cable se dirige hacia el controlador de carga y se conecta al puerto USB disponible por el mismo. Adicionalmente, la pantalla LCD se conectó a través de un arreglo de cables tipo Dupont mixto (hembra por un extremo y macho por el otro), esto con la finalidad de alcanzar una longitud de al menos 50 cm desde el conector hasta los pines de la pantalla, que se localizan en la parte posterior de la tapa de la caja de protección. Finalmente, los cables de alimentación que salían del puerto de carga del controlador, serán conectados a la bornera teniendo en consideración la ubicación de la línea de 12 V y la de GND en la placa.

2.5.5. Módulo del sensor de temperatura y humedad

El módulo en general consiste en una cámara conformada por 6 platos, véase Figura 100, sujeta en la parte superior a una estructura de soporte que puede acoplarse a un tubo. Luego, dentro de la cámara se ubica el sensor de temperatura y humedad SHT31 y un adaptador de tipo RJ11.

El módulo SHT31 que contiene integrado al sensor de temperatura y humedad con el mismo nombre posee cuatro contactos a los que se le soldaron una hilera de cuatro conectores tipo Dupont macho y estos a su vez se conectan a cuatro cables tipo Dupont mixto, que se conectan por un lado al sensor y por el otro se dirigen a una roseta telefónica que posee un conector tipo RJ11 hembra. Luego, se cubre el módulo con un encapsulado, el mismo que utiliza el módulo DHT21, para protegerlo del exterior sin impedir el acceso de partículas de vapor de agua ni alterar la temperatura circundante, y se fija el mismo con cinta aislante al encapsulado para evitar movimientos indeseados. Finalmente, el encapsulado que contiene al sensor y la roseta telefónica se fijan a un tubo de PVC, el cual deberá estar pegado a la superficie inferior de la cámara.

La cámara está conformada por 6 platos, de los cuales, 4 son platos en forma de corona circular y los restantes son platos planos, estos le dan la apariencia de una cámara, cuya área superior e inferior es cerrada y lateralmente forman un cilindro con la forma de una pantalla de Stevenson. Sobre el plato superior de dicha cámara se encuentra una estructura de soporte en forma de perfil “L” que tiene soldado en una de sus caras verticales un tubo metálico con dos ranuras en su longitud que le permiten acoplarse a un tubo de menor diámetro a través de pernos ajustables.

La estructura metálica y los platos que conforman la cámara se sujetan entre sí con ayuda de pernos de 1/4” x 8” y tuercas tipo mariposa puestas en el plato inferior. Previo a ajustar dichos pernos y ensamblar la cámara, realizar la conexión del cable RJ11 al conector

hembra de la roseta telefónica utilizando un cable que sea de por lo menos 2 metros para garantizar una adecuada conexión y en caso de movimientos no se produzca desconexiones bruscas.



Figura 100: Vista interior y final del módulo del sensor de temperatura y humedad.

2.5.6. Módulo de los sensores de velocidad del viento y dirección del viento

Este módulo presentado como Weather Meters, véase Figura 101, que contiene a los sensores de velocidad de viento, dirección del viento y precipitación, es armado según indica su guía de ensamblaje, la cual es suministrada por el proveedor o es encontrada a través del portal web de la compañía Sparkfun Electronics, cuyo resultado final se describe como un poste delgado de aluminio en el cual se monta en la parte superior una estructura de soporte que contiene por un lado al anemómetro de cazoletas y por el otro extremo a la veleta, mientras que aproximadamente en el punto intermedio del poste se monta una estructura que contiene al pluviómetro.

A continuación, el poste de este módulo se colocará en el interior del tubo metálico de la estructura de soporte de la cámara que contiene al módulo de temperatura y humedad y debe ser ajustado por dos pernos regulables hasta notar su estabilidad y verificando que su posición sea inmediatamente bajo el pluviómetro con sentido de dirección opuesto. Finalmente, se monta este conjunto de elementos al poste del trípode haciendo uso de dos abrazaderas metálicas sinfín para tubería del calibre #32, ubicadas simétricamente respecto

al centro del tubo de aluminio para dotar de una distribución de carga por los elementos montados.

Tener en consideración que la cámara de temperatura y humedad se encuentre a una altura de aproximadamente 2 metros sobre la superficie instalada y el anemómetro se encuentre a dicha altura o mayor, en caso de estar a una altura mayor, registrar la altura y considerar para los cálculos de velocidad de viento.

El anemómetro se conecta a través de un cable tipo RJ11 a la veleta, del cual sale un cable del mismo tipo que será el que se conecte al puerto RJ11 de la placa central, mientras que el pluviómetro cuenta con un cable independiente del mismo tipo que será conectado en su puerto correspondiente, ubicado también en la placa central; ambos cables deben ser de por lo menos 2 metros para garantizar una adecuada conexión y en caso de movimientos no se produzca desconexiones bruscas.



Figura 101: Módulo Weather Meters y su ensamblaje con el módulo de temperatura y humedad.

2.5.7. Módulo de los sensores de radiación solar

El módulo piranómetro o de radiación solar, véase Figura 102, consiste en una estructura idéntica al módulo de viento y precipitación, solo que, en lugar del anemómetro y la veleta, contiene unas estructuras con los módulos ML8511 y SI1145 en sus interiores, cada uno ubicado en un extremo opuesto de la viga y los cuales a su vez se conectan a adaptadores RJ11 cada uno. La viga de la estructura se ubica a una altura superior a la de la viga del

módulo Weather Meter y dispuesto de manera perpendicular sin impedir el giro libre de la veleta y el anemómetro.

El módulo ML8511 posee 5 contactos que se sueldan a una hilera de 5 conectores tipo Dupont macho, los que a su vez se empalman mediante soldadura a cables de calibre AWG #16 que serán conectados a los contactos de una de las rosetas telefónicas mediante 3 cables.

El módulo SI1145 posee 4 contactos que, de la misma manera que el anterior, se conectan a la roseta RJ11 restante mediante 4 cables de calibre AWG #16.

Cada módulo será acomodado dentro de una estructura protectora y contenedora hecha en impresión 3D y cuyos cables pasarán por un agujero ubicado en la parte inferior de dichas estructuras, de tal manera que sus sensores integrados estén dirigidos hacia el cenit y nivelados horizontalmente. Finalmente, las rosetas o adaptadores RJ11 de cada módulo se colocaron debajo de su estructura correspondiente pegados a la viga de la estructura de soporte.

Se debe tomar en cuenta algunos aspectos:

- El pegamento utilizado para unir las estructuras contenedoras y las rosetas a la estructura debe ser uno que no se desgaste ante los efectos de la intemperie, para este caso se utilizó cintas de doble contacto 3M.
- Los cables deberán tener una longitud de al menos 30 cm y si en caso se presenta exceso de cable, se recomienda enrollarlos y sujetarlos.
- Los contactos y soldaduras realizadas se deben proteger mediante cinta de aislamiento eléctrico para evitar prematura sulfatación.
- En la parte superior de cada estructura contenedora se debe colocar y fijar una superficie lisa de protección contra la intemperie, como vidrio o cinta de embalaje, de tal forma que no altere la radiación incidente, pero proteja a los sensores.
- La viga que soporta a las estructuras contenedoras deberá estar dispuesto de manera perpendicular a la viga del módulo Weather Meters y nivelado.

Finalmente, el conjunto de módulos piranómetro y Weather Meter se unen mediante sus mástiles superiores de aluminio mediante dos abrazaderas metálicas sinfín #32, mientras que dicho bloque a su vez se unirá a la cámara que contiene los sensores de temperatura y humedad; así se conforma un bloque que será acoplado al tubo superior del trípode mediante abrazaderas metálicas sinfín #32, que lo unen con el tubo de aluminio del módulo

Weather Meter. Con dicha acción realizada se procede a insertar el tubo superior del trípode sobre el tubo inferior, véase Figura 103, el cual contiene ya al sistema fotovoltaico y las cajas de protección montadas, y, además, se encuentra soportado por las patas del trípode.



Figura 102: Módulo piranómetro o de radiación solar y ensamblaje con el módulo Weather Meter.



Figura 103: Vista final del ensamblaje del prototipo.

2.6. CONEXIONES ELÉCTRICAS

Como se indicó anteriormente, cada sensor y módulo está conformado por placas de circuito impreso (PCB) o elementos electrónicos que requieren de una alimentación energética y/o líneas de conducción eléctrica para asegurar la comunicación de estos con un dispositivo de procesamiento que generará la información necesaria y será utilizada por el usuario final. Sin embargo, al contar con varios de estos elementos electrónicos, es necesario crear una placa central de procesamiento que permita la conexión ordenada de cada uno de ellos hacia el dispositivo de control seleccionado y a la fuente energética. A continuación, se detalla cómo se realizan las conexiones de los sensores y módulos con dicha unidad central de procesamiento y la fuente de alimentación energética mediante la placa central de procesamiento.

2.6.1. Esquemático de conexiones de sensores y módulos

Este consiste en un plano que muestra el diagrama de conexiones de los componentes del prototipo, véase la Figura 104, a través de gráficos que representan cada elemento de conexión o algún elemento eléctrico y las líneas de conducción requeridas a través de cualquier tipo de conductor físico. A partir de este esquemático, es posible generar la placa central de procesamiento, teniendo en cuenta dichos elementos y las líneas de conducción necesarias.

2.6.2. Placa de conexiones de sensores y módulos

La Figura 105, muestra una vista superior de la disposición de los elementos eléctricos considerados en el esquemático y las líneas de conducción necesarias, de manera real y con sus dimensiones respectivas, a ello se denomina una placa de conexiones, a partir del cual es posible implementar de manera física y real la placa central de procesamiento. Es importante tomar en consideración que las líneas de conexión se encuentran clasificadas en dos: el primer tipo, de color azul, representa a las líneas que se deberán implementar en el lado opuesto de la placa teniendo en cuenta que la vista mostrada es desde la parte superior, por ello, para implementarlas se deberá dar la vuelta a la imagen; y el segundo tipo, de color rojo, representa a las que se deberán implementar en la parte superior de la placa. Finalmente, los elementos electrónicos como los conectores, elementos pasivos y módulos, se montarán en la parte superior de la placa en la disposición mostrada.

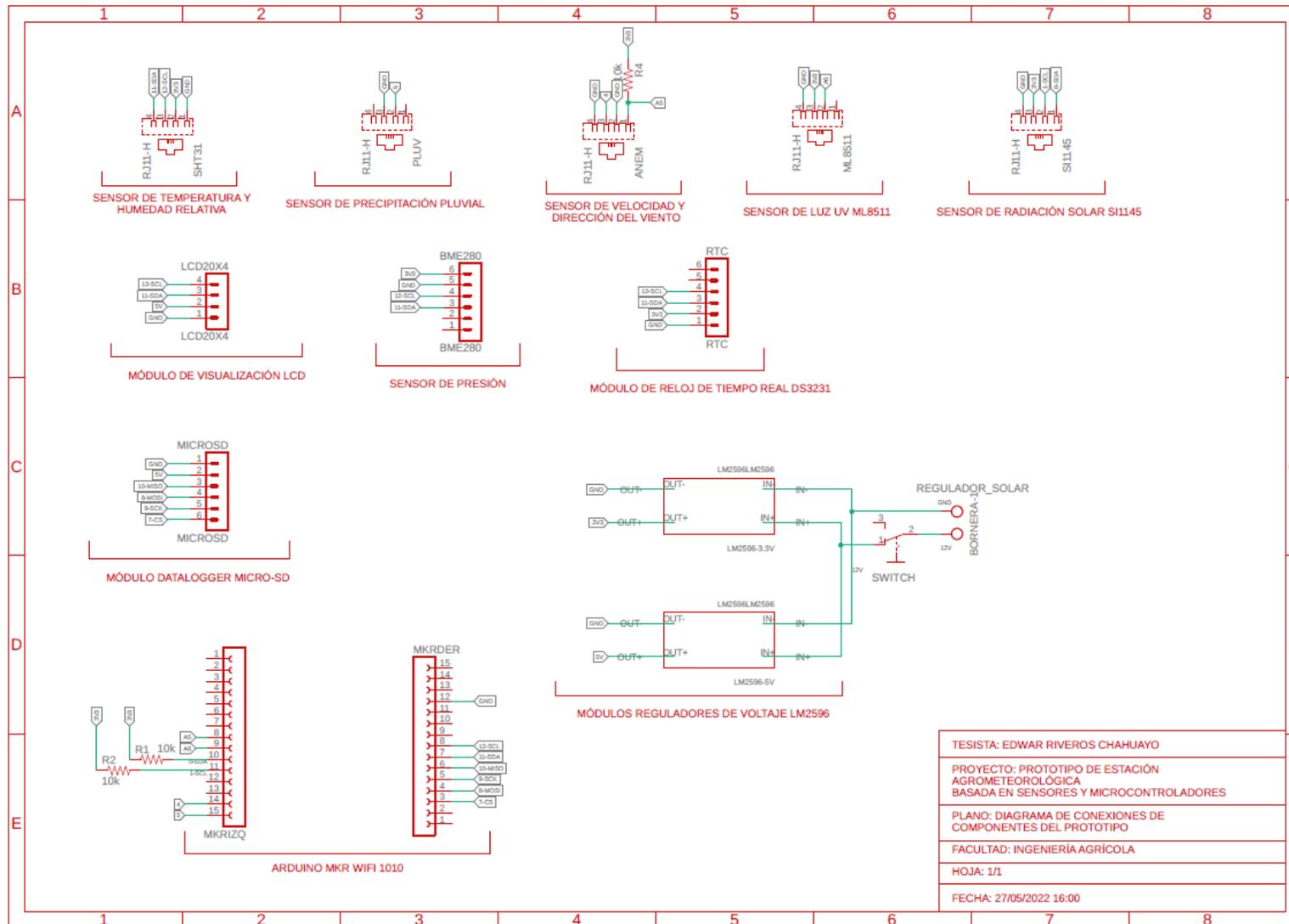


Figura 104: Plano esquemático del diagrama de conexiones del prototipo.

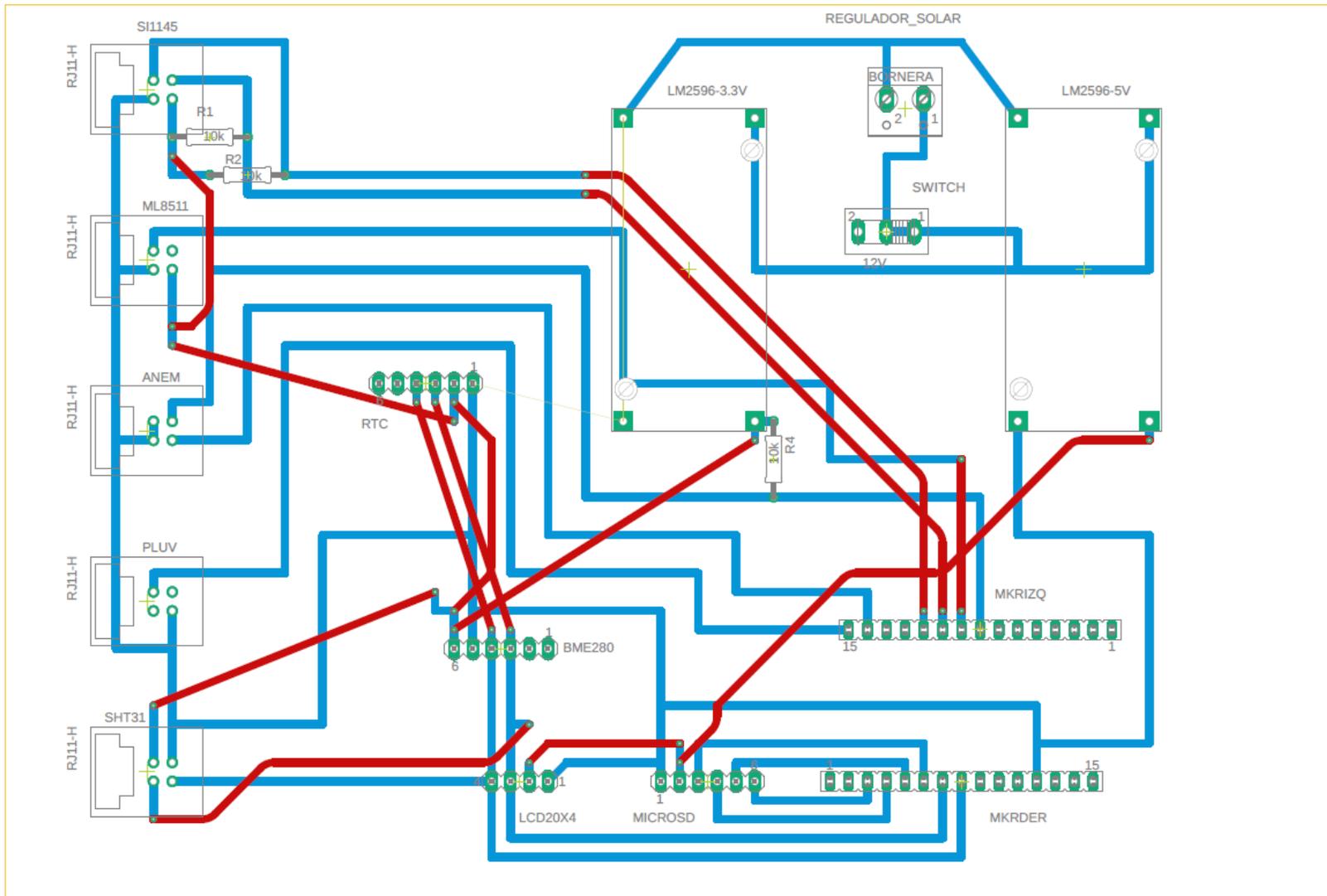


Figura 105: Plano de conexiones de la placa central del prototipo.

2.7. EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN

Luego de haber realizado la inspección de la zona de instalación y que esta a su vez cumpla con los lineamientos recomendados, y habiendo ensamblado correctamente el prototipo según lo indicado, se procede a instalarlo en la zona seleccionada.

A partir de este momento es posible extraer la información que haya sido registrada por el equipo desde el momento en que se realizó la instalación en campo, hasta el momento en que se decida extraer la información. Por lo general, es recomendable realizar la extracción de datos a partir de la primera semana, debido a que en este tiempo es posible verificar si el prototipo cuenta con algún desperfecto, en caso contrario, se deduce que el prototipo opera adecuadamente.

Se cuenta con dos modalidades de extracción de datos, la primera, que no requiere manipulación del equipo en físico y contando con una red Wi-Fi estable, consiste en descargar los datos del aplicativo Blynk; y la segunda, que requiere manipulación del equipo y puede suspender el funcionamiento del equipo por un periodo de tiempo, consiste en extraer los datos desde la tarjeta microSD. A continuación, se detalla los pasos y recomendaciones a tomar para cada una de las modalidades mencionadas.

2.7.1. Extracción desde el aplicativo Blynk

El prototipo cuenta con el microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010, el cual tiene la capacidad de acceder a cualquier red WiFi disponible dentro su rango de alcance, además tiene una basta cantidad de librerías que le permiten ser programado e interactuar con la red inalámbrica, una de estas librerías es la denominada Blynk, la cual ofrece una serie funciones y variables que permiten interactuar con la plataforma IoT (Internet de las Cosas) que lleva el mismo nombre, la cual, ofrece un aplicativo para dispositivos móviles que permiten el desarrollo de una plataforma virtual para la visualización y control de dispositivos electrónicos de manera remota. Este equipo cuenta con la capacidad de conectarse a esta plataforma y permite la visualización de la información en tiempo real, además de la extracción de la misma. La información se puede extraer desde cualquier dispositivo móvil que tenga instalado la aplicación y cuyo usuario tenga el código de autenticación provisto por el desarrollador del prototipo, accediendo a los tableros digitales para cada variable meteorológica, los cuales cuentan con la opción de extraer la data en formato “.csv” al correo suscrito al momento de instalar y acceder al aplicativo.

2.7.2. Extracción desde la tarjeta microSD

El datalogger del prototipo consta de un módulo al que se le puede insertar una tarjeta de memoria extraíble microSD, el cual deberá estar insertado antes de la instalación del prototipo en campo. Este método consiste en la extracción de dicha tarjeta y cuya acción provocaría que el programa se paralice por un periodo de tiempo que es el mismo que el usuario demorará en extraer la información. Se deberán seguir los siguientes pasos para realizar esta labor con éxito:

- Abrir la tapa de la caja de pase eléctrica de PVC que contiene a la placa central de procesamiento, teniendo en consideración lo mencionado en el ensamblaje del prototipo.
- Ubicar el módulo datalogger o adaptador de memoria microSD y, a su vez, ubicar la tarjeta de memoria.
- Presionar la tarjeta en dirección a la placa y en sentido longitudinal al módulo.
- Retirar la tarjeta de memoria e insertarla en un adaptador que permita conectarlo a un dispositivo móvil, en caso de ser necesario, o a un ordenador de escritorio.
- Ubicar el archivo con nombre “ESTACION.TXT” y realizar una copia en el dispositivo con el que esté interactuando.
- Colocar la tarjeta de memoria en el módulo datalogger, presionando una vez de la misma forma como se hizo para retirarla.
- Reiniciar el prototipo mediante el botón RESET del microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010.
- Cerrar la tapa de la caja de pase y asegurarse de que el prototipo esté funcionando correctamente.

3. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

Esta sección del presente manual corresponde a las acciones necesarias para mantener el equipo en buenas condiciones y operativo para cuando se requiera utilizarlo.

3.1. DESENSAMBLAJE GENERAL

Corresponde a las acciones a realizar para separar cada elemento del prototipo y de esa manera poder realizar el mantenimiento respectivo a cada uno. Por ello, es importante tomar en cuenta el apartado 2.5 del presente manual, ya que ahí se describen los pasos para ensamblar el prototipo y las consideraciones a tomar en cuenta. A continuación, se presenta una lista de acciones a realizar para separar los componentes del prototipo.

- Retirar las tapas de las cajas de pase, dejando los elementos del interior al descubierto e inmediatamente apagar el switch de encendido y apagado en la placa central, desconectar el puerto USB del microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010 y desconectar todos los cables de tipo RJ11, todo esto para cortar la alimentación energética de la placa central de procesamiento.
- Desconectar y retirar de la caja de pase los cables que conectan los elementos del sistema fotovoltaico, es decir, la batería, el controlador de carga y el panel solar para cortar totalmente cualquier flujo de electricidad en todo el sistema.
- Tapar nuevamente las cajas de protección por seguridad y separar el prototipo en dos desde la unión entre el mástil superior e inferior del trípode, ello con la finalidad de poder movilizar estos elementos y poder llevarlos a otro ambiente cerrado para realizar el mantenimiento.
- Desmontar el módulo de radiación solar retirando las abrazaderas metálicas que se utilizaron para fijar los mástiles de dicho módulo con el de velocidad y dirección del viento (Weather Meter).
- Retirar el módulo de precipitación, retirando los tornillos de sujeción de la abrazadera que la soporta.
- Desmontar el módulo de velocidad de viento y dirección, retirando los elementos de sujeción que se utilizaron para sujetarlo al mástil superior del trípode.
- Retirar el módulo de temperatura y humedad relativa, desajustando los tornillos de sujeción del mástil de aluminio del módulo de velocidad de viento (Weather Meter), una vez realizado esto, el mástil superior del trípode deberá quedar totalmente libre de elementos montados sobre sí, tomar precaución con los cables.
- Proceder a retirar la caja de pase donde se encuentra la placa central desajustando el elemento de sujeción utilizado en la parte posterior de la y montado sobre el mástil inferior del trípode.
- Retirar las abrazaderas que sujetan la estructura del panel solar al mástil inferior del trípode para así poder desmontar esta misma, teniendo en consideración que el cable del panel solar deberá estar suelto.
- Desajustar el elemento de sujeción de la caja de pase que contiene a la batería solar y el regulador de carga, de la misma forma como se procedió con la otra caja.
- Finalmente se tendrá el trípode y el mástil inferior sujeto por los tornillos, los cuales se deberán desajustar para poder separar ambas estructuras.

Adicionalmente, estas actividades deberán realizarse tomando en cuenta que los elementos de sujeción como abrazaderas, estructuras metálicas, tornillos, tuercas, entre otros; deberán ser puestos ordenadamente sobre una superficie que impida que se pierdan, solo en el caso de que alguno se encuentre en mal estado, deberá ser reemplazado.

3.2. DESENSAMBLAJE INDIVIDUAL

Cada elemento desmontado deberá ser aislado en un espacio determinado para no perder sus componentes electrónicos o mecánicos, con la finalidad de proceder a desarmar cada uno de ellos tomando en cuenta las características y el proceso de ensamblaje detallado en el apartado 2.5 del presente manual.

A continuación, se detalla el proceso de desensamblaje para cada componente del prototipo.

3.2.1. Módulo de temperatura y humedad relativa

- Desajustar las tuercas mariposa desde la base inferior de la cámara de protección y retirar los tornillos desde la parte superior de la estructura metálica de soporte.
- Mientras se retiren los tornillos, se debe retirar cada uno de los discos, tomando precaución con el más inferior debido a que ahí están montados el sensor y el encapsulado.
- Retirar el cintillo o abrazadera que ajusta a la roseta telefónica, el mástil de PVC y el encapsulado del sensor.
- Desconectar el cable RJ11 de la roseta telefónica, abrirla y retirar los cables de cada contacto tomando nota o fotografías del arreglo de las conexiones.
- Abrir el encapsulado del sensor y retirar la PCB que contiene al sensor y sus cables conectados a sus contactos.

3.2.2. Módulo de velocidad y dirección del viento, y precipitación

- Desajustar los tornillos que unen a la viga de plástico con el tubo de aluminio y ambos módulos (el anemómetro y la veleta).
- Desconectar los cables RJ11 que unen a la veleta con el anemómetro y aquel cable que emerge de la veleta para ser conectado a la placa central.
- Retirar la tapa inferior del anemómetro desajustando sus tornillos, con la finalidad de extraer la PCB que contiene al interruptor magnético.
- Retirar la tapa inferior de la veleta desajustando sus tornillos, para poder extraer la PCB que contiene a los interruptores magnéticos y las resistencias
- Desajustar el tornillo que une a la viga voladiza con el balde de precipitación.

- Abrir el balde de precipitación, presionando los lados del mismo y jalando hacia el exterior, encontrándose así con el balancín y un contenedor donde se ubica la PCB.
- Retirar la PCB que contiene el interruptor magnético junto al cable, tomando en consideración la posición en la que se encontraba inicialmente.

3.2.3. Módulo piranómetro o de radiación solar

- Desajustar el tornillo que une la viga de plástico con el tubo de aluminio.
- En caso de notar debilidad en la junta entre ambos contenedores y la viga plástico o ésta con las rosetas telefónicas, proceder a separarlos quitando la cinta de doble contacto.
- Abrir ambas rosetas telefónicas y desconectar los cables unidos a cada contacto teniendo en consideración las posiciones en las que se encontraba inicialmente.
- Retirar la cobertura superior de cada contenedor y desecharla.
- Extraer las PCB que contiene a los sensores de radiación y UV pasando los cables jumper a través del agujero inferior presente en cada cobertura.

3.2.4. Módulo fotovoltaico

- Desajustar el perno del tornillo que une los perfiles de la estructura de soporte.
- Retirar los pernos o remaches que unan al marco del panel solar con la estructura de soporte a la que está unida, de esta forma se aísla el panel solar.
- Desconectar, en caso de que no se haya hecho, los cables de los polos positivo y negativo de la batería solar, retirando las tuercas y arandelas que permiten la unión de contactos.
- Desconectar, en caso de no haberse realizado, cualquier cable que una al controlador de carga con el panel solar, la batería solar o la placa de circuito impreso.
- Abrir la tapa y retirar la batería solar y el controlador de carga de la caja de PVC.
- Desajustar los pernos que unen la caja de pase de PVC con su estructura metálica de soporte en la parte inferior y trasera del mismo.

3.2.5. Placa central de procesamiento

- Abrir la tapa de la caja de pase que contiene a la placa central, con precaución de no tirar de los cables que unen la placa con la pantalla LCD colocada en la tapa, y apoyarla en una superficie que no genere tensión.
- Desconectar los cables jumper de la pantalla LCD de la placa central.

- Desconectar, en caso de que no se haya hecho, los cables RJ11, la bornera con el cable de alimentación energética y el cable USB del Arduino MKR WiFi 1010.
- Retirar los módulos: RTC DS3231, adaptador microSD, BME280 y el Arduino MKR WiFi 1010, desconectándolos desde los headers hembra a los cuales se encontraban conectados.
- Solo deberán quedar montados la parte inferior de la bornera, los módulos LM2596, cables, resistencias y los conectores RJ11 hembra.
- Desajustar los tornillos que unen la placa central de procesamiento con la placa de madera posterior y retirarla.
- Desajustar los tornillos que unen la placa de madera con la pared posterior interior de la caja de PVC.
- Desajustar los pernos que unen la caja de pase de PVC con su estructura metálica de soporte en la parte trasera del mismo.

Cada uno de los componentes individuales desmontados deberán estar agrupados principalmente por el tipo de material o la función que cumplen, ya que el mantenimiento que se realice no será el mismo. Es conveniente que para cada módulo se elabore una lista de sus elementos componentes y verificar en qué estado se encuentra cada uno.

3.3. LIMPIEZA

Se deberá revisar cada uno de los componentes, teniendo en cuenta aspectos como la presencia de polvo, moho o cualquier otra suciedad en las superficies protectoras, estado de elementos mecánicos metálicos (presencia de óxidos o desgaste), presencia de sulfatos u óxidos en las placas de circuito impreso o cualquier elemento electrónico en cada módulo; o cualquier otro tipo de diagnóstico negativo que pudiera perjudicar la óptima funcionalidad del prototipo.

Se deberán disponer de algunos materiales, véase Figura 106, y herramientas para poder realizar satisfactoriamente estas actividades tales como:

- Franelas y/o paños de microfibra
- Papel toalla
- Lubricante Multiusos WD-40 u otro similar
- Detergente
- Escobilla para ropa
- Cepillos de alambre

- Cepillos de limpieza de botellas y superficies
- Agua potable
- Equipos de protección personal como lentes, mascarilla y guantes
- Guantes de plástico o quirúrgicos

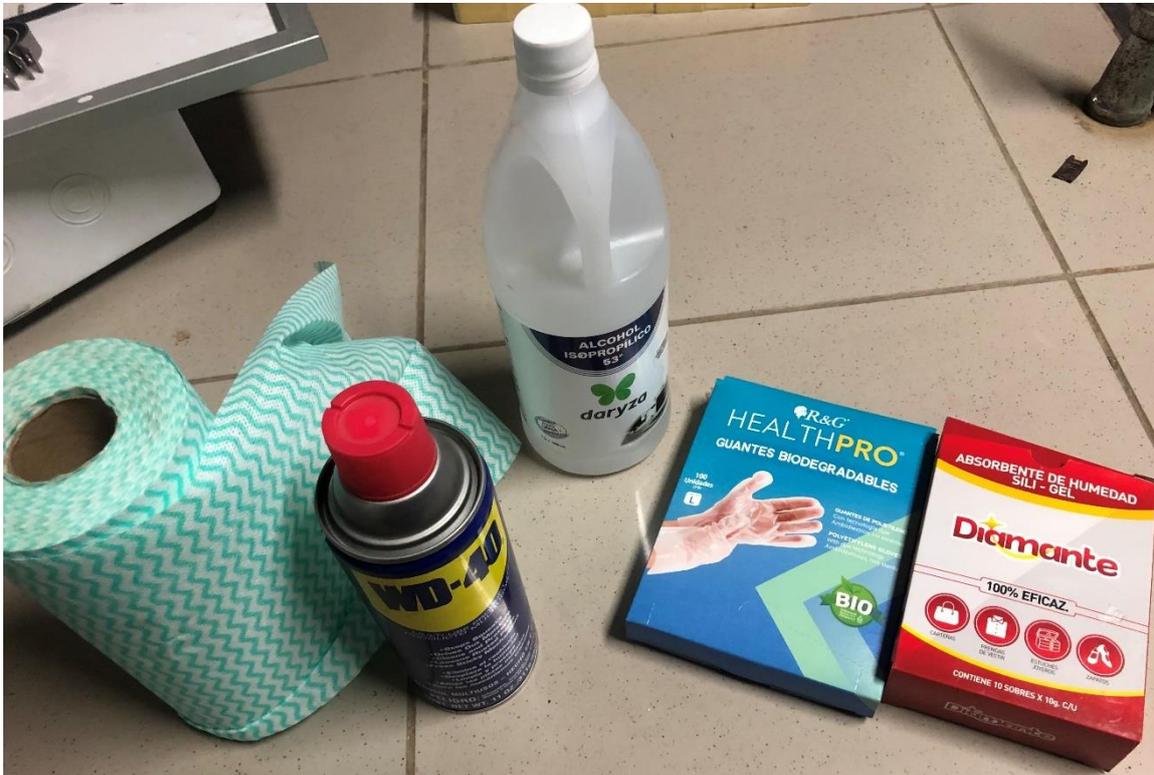


Figura 106: Materiales de limpieza principales para el prototipo

A continuación, se detalla las actividades principales para realizar la limpieza en cada elemento desmontado, de acuerdo al tipo de material del cual estén hechos o la función que cada uno cumple.

- Para elementos cuya función generalmente es la de protección o soporte de otros componentes como: la cámara compuesta de discos que protege el módulo de temperatura y humedad, las cazoletas del anemómetro, la veleta, el balde del pluviómetro, los contenedores de los sensores de radiación, las cajas de pase de PVC, las vigas de plástico de los módulos de viento, precipitación y radiación; podrán ser limpiados con agua y detergente, utilizando escobillas y cepillos para eliminar impurezas o suciedad presente en las superficies interiores y exteriores.
- En el caso de elementos estructurales de soporte o sujeción que sean metálicos, deberán ser limpiados utilizando el lubricante multiusos WD-40 para retirar el óxido que se pudo formar, dejándolos reposar por un periodo aproximado de 1

hora y posteriormente siendo frotados con cepillos, escobillas y franelas. Esto es aplicable para elementos como: tornillos, pernos, tuercas, arandelas, abrazaderas, tubos metálicos, perfiles, estructuras de soporte, etc.

- La limpieza de elementos eléctricos como cables, conectores, borneras, rosetas telefónicas, se deberá limpiar con franelas o papel toalla ligeramente humedecidas, evitando mojar los contactos metálicos a través del cual se realiza el paso de la corriente eléctrica, estas zonas recibirán otro tratamiento.
- Los elementos que contengan circuitos eléctricos o electrónicos como las PCB de los módulos y la placa central de procesamiento, deberán ser limpiados cuidadosamente con un cepillo pequeño y rociando en bajas cantidades el lubricante multiusos WD-40, esto para eliminar sulfatos en los contactos eléctricos, óxidos y polvo. En el caso de las zonas donde estén ubicados los sensores propiamente dichos que generalmente son circuitos integrados, deberán ser limpiados con un paño de microfibra y evitando contactos bruscos, especialmente con los sensores de radiación solar.

3.4. VERIFICACIÓN ELÉCTRICA Y MEDICIONES

Una vez realizada la limpieza de cada uno de los componentes, se procede a ensamblar parcialmente el prototipo de acuerdo a lo indicado a continuación y realizar las conexiones eléctricas de acuerdo a los esquemas mostrados en el apartado 2.6. Es importante que, para realizar adecuadamente esta fase, se deben tener los circuitos eléctricos de cada módulo al descubierto y no estar montados en la estructura de soporte, con la finalidad de realizar las verificaciones correspondientes sin problemas ni incomodidades.

La continuidad eléctrica es una medida de la presencia de una ruta completa para el flujo de corriente eléctrica desde dos puntos que deberían estar conectados entre sí, este indicador nos garantiza que las conexiones se hayan realizado adecuadamente y no hayan sido dañadas físicamente.

La medida de voltajes es un indicador de que el circuito se encuentre a la tensión adecuada y prevista en el momento del diseño electrónico, además de que con ello se eviten sobrecargas o deficiencia de cargas que impidan el funcionamiento del circuito.

La resistencia eléctrica es una propiedad de los materiales conductores que describe su oposición al flujo eléctrico.

Existen otras propiedades eléctricas como la intensidad de corriente, inductancia, capacitancia, impedancia, entre otros; que pueden ser verificadas, pero corresponden a un análisis más especializado, en especial en las placas de circuito impreso (PCB). Ante fallas que se presenten y no sean causados por las primeras medidas mencionadas, se deberá recurrir al cambio de componentes.

A continuación, se muestran algunas consideraciones especiales para cada módulo, las medidas que se deberán realizar y los puntos de conexión considerados.

3.4.1. Módulo de temperatura y humedad relativa

El módulo de temperatura y humedad denominado SHT31, véase Figura 107, se encuentra dentro de un encapsulado ventilado de color negro y este a su vez dentro de una cámara de protección, antes de cerrar dicha cámara y el encapsulado se deberán realizar las pruebas de continuidad eléctrica en los cuatro puntos de conexión que dicho módulo posee por un extremo del multímetro y por el otro se colocará en sus puntos correspondientes en la roseta telefónica RJ11 y en la placa central de procesamiento. Los puntos de conexión que deberán ser verificados son: SCL, SDA, 3V3 y GND.

Luego, se deberá verificar la tensión suministrada entre los puntos 3V3 y GND, asegurándose de tener un suministro de 3.3 voltios entre ambos puntos.

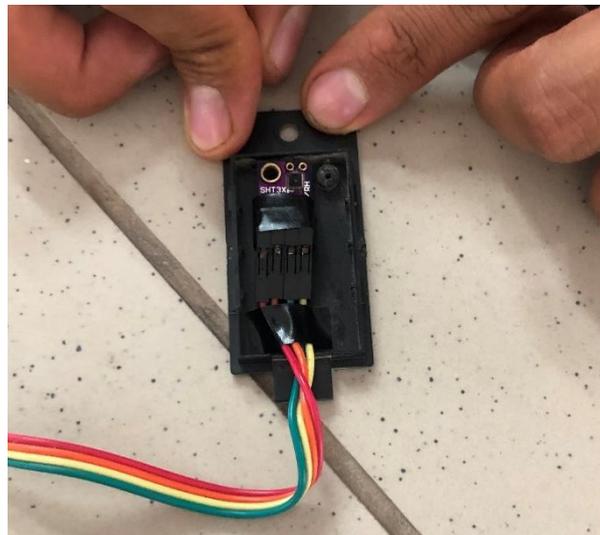


Figura 107: Vista interior del encapsulado que contiene al sensor SHT31.

3.4.2. Módulo de velocidad y dirección del viento

Este módulo denominado Weather Meter, es una estructura que contiene un anemómetro de cazoletas y una veleta, los cuales a su vez tienen interiormente unas placas de circuito

impreso. Se deberá extraer dichas placas para poder realizar la prueba de continuidad eléctrica entre los puntos de conexión en las placas de cada módulo y los mismos puntos ubicados en la placa central de procesamiento.

Para el sensor de velocidad del viento, véase Figura 108, la placa cuenta con un interruptor magnético con dos extremos que pueden formar una sola ruta dependiendo del estado de dicho interruptor, ambos extremos están conectados a diferentes puntos: uno a GND y el otro a una línea digital (D4 del Arduino MKR WiFi 1010).

Para el sensor de dirección del viento, véase Figura 108, la placa circular contiene ocho interruptores magnéticos, con el punto GND hacia el extremo de la placa y hacia el otro una resistencia eléctrica de diferente valor para cada interruptor, cada una de dichas resistencias tienen por el lado opuesto un punto en común que se dirige a línea analógica (A5 del Arduino MKR WiFi 1010) y a su vez se reparte hacia otra línea que contiene una resistencia de 10 K Ω , el cual por su otro extremo se dirige a la línea de alimentación 3V3. Se deberán verificar las resistencias eléctricas de acuerdo al valor especificado en la placa de manera impresa y también la resistencia de 10 K Ω .

El anemómetro se conecta desde su placa a la veleta a través de un cable RJ11 que contiene a las líneas GND y D4, los mismos que estarán presentes en la placa de la veleta, pero no interfieren en su circuito. Finalmente, desde la veleta se extrae un cable RJ11 con cuatro puntos: GND del anemómetro, D4, GND de la veleta y A5; los cuales deberán tener continuidad con sus correspondientes puntos en la placa central de procesamiento.



Figura 108: Vista de las placas del sensor de velocidad del viento y dirección del viento.

Estas dos líneas comparten un mismo cable RJ11 que se dirige al sensor de dirección del viento, por lo que también se debe verificar la continuidad de estos dos puntos con sus correspondientes puntos en la placa de la veleta.

3.4.3. Módulo piranómetro

Este cuenta con dos módulos o placas, véase Figura 109, uno correspondiente al denominado ML8511 y el otro al SI1145, estos se deberán verificar de manera idéntica al módulo del temperatura y humedad, es decir, verificar sus puntos de conexión en el módulo, en sus rosetas telefónicas y en la placa central de procesamiento.

Los puntos de conexión del módulo ML8511 son OUT, correspondiente a la línea analógica A6 del Arduino MKR WiFi 1010, GND y 3V3, correspondiente a la línea de alimentación de 3.3 voltios y que deberá estar a su vez conectado al punto EN de dicho módulo.

Luego, los puntos de conexión del módulo SI1145 son: SCL, que corresponde a la línea digital D1 del microcontrolador Arduino y una resistencia de 10 K Ω hacia la línea de alimentación 3V3, SDA, que corresponde a la línea digital D0 del Arduino y una resistencia de 10 K Ω hacia 3V3, 3V3 que se dirige a la línea de alimentación de 3.3 voltios, y GND. Se debe tener en cuenta que los puntos SCL y SDA de este módulo, no son los mismos que los utilizados en los otros.

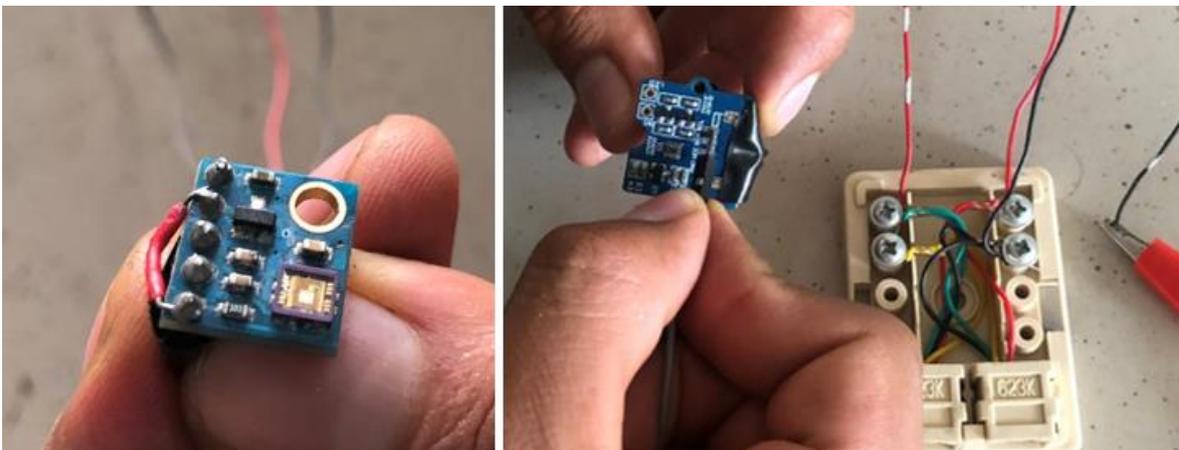


Figura 109: Vista de los módulos ML8511 y SI1145.

Finalmente, se deberá verificar el valor de las resistencias utilizadas en este módulo y los valores de tensión entre los pines 3V3 (o cualquier otra nomenclatura de alimentación eléctrica) y GND.

3.4.4. Placa central de procesamiento

En esta se encuentran los módulos de presión barométrica, reloj de tiempo real, adaptador de memoria microSD y la pantalla LCD; véase Figura 110, los cuales son placas de circuito impreso que tienen sus contactos eléctricos agrupados y tienen soldados unos pines que les permiten conectarse a la placa a través de conectores header tipo hembra. Se deberá verificar que al momento de conectarse cada uno de ellos, sus pines respectivos deberán estar en continuidad eléctrica con sus extremos ubicados en el microcontrolador, para el caso de líneas de comunicación, y en los módulos de alimentación eléctrica, para el caso de líneas de alimentación energética. Además, se deberá verificar las tensiones necesarias entre los pines de alimentación y tierra de cada uno de los módulos.

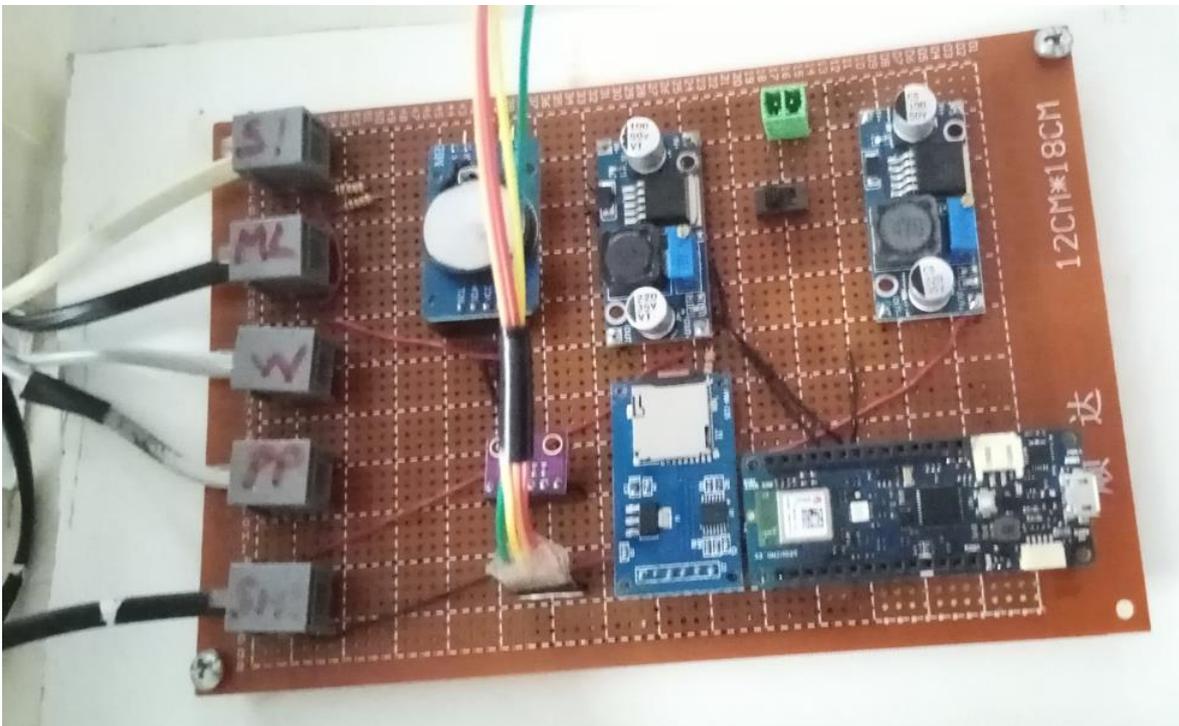


Figura 110: Vista final de la placa central de procesamiento con los módulos BME280, RTC DS3231 y adaptador microSD conectados; y los cables del módulo LCD.

El módulo de presión barométrica cuenta con cuatro líneas: SCL, SDA, 3V3 y GND; el módulo de reloj de tiempo real, con cuatro líneas: SCL, SDA, 3V3 y GND; el módulo adaptador de memoria microSD o datalogger, con seis líneas: MISO (corresponde al pin 10 del microcontrolador), MOSI (corresponde al pin 8 del microcontrolador), SCK (corresponde al pin 9), CS (corresponde al pin 7), 5V (alimentación a una tensión de 5 voltios) y GND; y el módulo de visualización LCD, con cuatro líneas SCL, SDA, 5V y GND. Nótese que los dos primeros tienen los mismos pines de conexión y además estos

comparten las líneas SCL (corresponde al pin 12 del microcontrolador) SDA (corresponde al pin 11 del microcontrolador) y GND con el módulo LCD.

3.4.5. Sistema de alimentación energética

Se deberá verificar que ambos módulos LM2596, véase Figura 111, se encuentren en los niveles de tensión requeridos en sus contactos de salida, según se muestra en el esquemático eléctrico, con la finalidad de garantizar las líneas de 3.3 y 5 voltios de manera precisa. En caso contrario, se deberá regular dichos valores conectando un multímetro para la medición de tensión entre ambos polos de salida y girar el potenciómetro que poseen con un desarmador pequeño y lograr los valores de tensión requeridos para cada uno.

Es importante verificar que exista continuidad en las líneas de alimentación y las líneas de tierra entre cada una de las conexiones de los componentes.

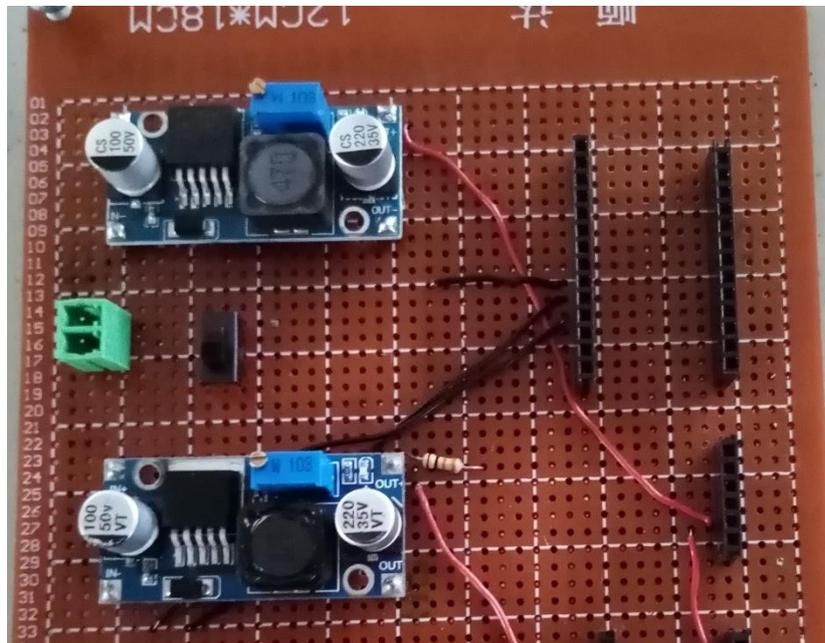


Figura 111: Módulos LM2596 conectados a la placa central de procesamiento.

3.5. VERIFICACIÓN DIGITAL

Luego de verificar las características eléctricas de los dispositivos utilizados, se procede a realizar la verificación digital, el cual consiste en evaluar cada uno de los módulos y sensores utilizados en el prototipo y que interactúen con el microcontrolador. Esto se llevará a cabo subiendo programas de prueba en el microcontrolador, el cual deberá estar conectado satisfactoriamente a cada módulo en evaluación, a través de un ordenador de mesa que cuente con el programa Arduino IDE. A continuación, se describe la secuencia de actividades a realizar para llevar a cabo satisfactoriamente esta fase:

- Descargar el software Arduino IDE en su última versión, para el sistema operativo que sea compatible con el del ordenador.
- Conectar el módulo en evaluación, considerando los esquemas eléctricos y en las mismas condiciones como se realizó con la verificación eléctrica.
- Abrir el programa o sketch correspondiente al módulo evaluado con el programa Arduino IDE o en caso de no tener dicho programa, escribirlo de manera manual en un nuevo archivo.
- Conectar el microcontrolador al ordenador a través del puerto USB con el que cuenta.
- Conectar el sistema fotovoltaico y dotar de energía eléctrica a la placa central de procesamiento. Debido a que estas actividades se realizan en un lugar cerrado, el sistema fotovoltaico dependerá exclusivamente de la batería solar, por lo que esta deberá estar cargada lo suficiente para las pruebas.
- Seleccionar el puerto correspondiente al microcontrolador en el software Arduino IDE y el tipo de placa utilizada, en este caso: Arduino MKR WiFi 1010.
- Subir el programa al microcontrolador y verificar la respuesta en el monitor serial del mismo. De acuerdo a ello, se diagnostica que el módulo funciona adecuadamente.

Estas actividades son comunes para cada uno de los módulos, no obstante, cada una difiere en las conexiones, por lo que se deberá tomar en cuenta lo expuesto en el apartado 3.4. Luego, los programas informáticos o sketches utilizados en el software Arduino IDE para la verificación digital se muestran a continuación:

3.5.1. Módulo de temperatura y humedad relativa SHT31

El programa de verificación se muestra en la Figura 112, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software deberá contener el texto: “SHT31 CORRECTO” y una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundos, de valores que corresponden a la temperatura y la humedad relativa registrados al momento de la prueba. En caso de error con la inicialización, el monitor serial mostrará el texto “SHT31 ERROR” y el programa se paralizará. Luego, en caso de algún deterioro o problema interno que no afecte la conexión, los valores registrados serán valores nulos, fuera del rango de medición de los sensores o que no representen el entorno, lo cual se puede verificar al momento de una calibración rutinaria.

SHT31

```
1 #include <Wire.h> // Permite la conexión a través del protocolo I2C
2 #include <Adafruit_SHT31.h> // Permite la conexión con el sensor de temperatura y humedad SHT31
3 // Instancia de la clase "Adafruit_SHT31" para temperatura y humedad.
4 Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();
5
6 void setup(){
7   // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial
8   Serial.begin(9600);
9   while (!Serial) delay(10);
10
11  // Bloque condicional para verificar si el módulo se conectó correctamente.
12  if (!sht31.begin(0x44)) { // Iniciando el módulo a través de la dirección I2C: 0x44
13    Serial.println("SHT31 ERROR");
14    while(1);
15  }Serial.print("SHT31 CORRECTO");
16 }
17
18 void loop(){
19   float t = sht31.readTemperature(); // Creando variable para temperatura
20   float h = sht31.readHumidity(); // Creando variable para humedad relativa
21
22   if (!isnan(t)) { // Verificando si el dato emitido por el módulo es numérico
23     Serial.print("Temp °C = "); Serial.print(t); Serial.print("\t\t");
24   } else {
25     Serial.println("Error en la lectura de temperatura");
26   }
27
28   if (!isnan(h)) { // Verificando si el dato emitido por el módulo es numérico
29     Serial.print("Hum. % = "); Serial.println(h);
30   } else {
31     Serial.println("Error en la lectura de humedad relativa");
32   }
33   delay(2000);
34 }
```

Figura 112: Código de programación para la verificación digital del módulo SHT31.

3.5.2. Módulo de presión barométrica BME280

El programa de verificación se muestra en la Figura 113, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software deberá contener el texto: “BME280 CORRECTO” y una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundos, de valores que corresponden a la presión barométrica registrada al momento de la prueba. En caso de error con la inicialización, el monitor serial mostrará el texto “BME280 ERROR” y el programa se paralizará. Luego, en caso de algún deterioro o problema interno que no afecte la conexión, los valores registrados serán valores nulos, fuera del rango de medición del sensor o que no representen el entorno, lo cual se puede verificar al momento de una calibración rutinaria.

```
BME280
1 #include <Wire.h> // Permite la conexión a través del protocolo I2C
2 #include <Adafruit_BME280.h> // Permite la conexión con el sensor de presión barométrica BME280
3 // Instancia de la clase "Adafruit_BME280" para presión barométrica.
4 Adafruit_BME280 bme;
5
6 void setup(){
7 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial
8 Serial.begin(9600);
9 while (!Serial) delay(10);
10
11 // Bloque condicional para verificar si el módulo se conectó correctamente.
12 if (!bme.begin()) { // Inicialización del módulo BME280
13 Serial.print("BME280 ERROR");
14 while (1);
15 } Serial.print("BME280 CORRECTO");
16 }
17
18 void loop(){
19 float p = bme.readPressure(); // Creando variable para presión barométrica
20
21 if (!isnan(p)) { // Verificando si el dato emitido por el módulo es numérico
22 Serial.print("Pres. hPa = "); Serial.println(p);
23 } else {
24 Serial.println("Error en la lectura de presión barométrica");
25 }
26 delay(2000);
27 }
```

Figura 113: Código de programación para la verificación digital del módulo BME280.

3.5.3. Módulo de velocidad y dirección del viento Weather Meter

El programa de verificación se muestra en la Figura 114 y la Figura 115, cuyos resultados mostrados en el monitor serial del software, deberán contener una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundo, de tres grupos de valores que corresponden a: el número de vueltas del anemómetro, el número de balanceos del pluviómetro y la dirección del viento en puntos cardinales. En caso de algún error de conexión, los valores del anemómetro serán igual a cero o no aumentarán su valor, aunque aquel esté girando, y los valores de dirección del viento se mantendrán en un solo valor a pesar de que la veleta se encuentre girando. Luego, en caso de otro tipo de error, se podrá verificar en una calibración rutinaria.

```

Weather_Meter
1 #define PIN_ANEMOMETRO 4 // Definición del PIN digital D4 del microcontrolador
2 #define PIN_RAINGAUGE 5 // Definición del PIN digital D5 del microcontrolador
3 #define PIN_VELETA A5 // Definición del PIN analógico A5 del microcontrolador
4 #define NUMDIRS 16 // Número de valores de dirección de viento
5
6 volatile int numRevsAnemometro = 0; // Variable para el conteo de revoluciones del anemómetro
7 volatile int numGotasPluviometro = 0; // Variable para el conteo de balanceos del pluviómetro
8
9 // Valores analógicos para cada punto cardinal:
10 unsigned long adc[NUMDIRS] = {17, 21, 24, 33, 48, 63, 77, 105, 121, 153, 162, 180, 202, 211, 230, 256};
11 char *strVals[NUMDIRS] = {"ONO", "OSO", "O", "NNO", "NO", "NNE", "N", "SSO", "SO", "ENE", "NE", "SSE", "S", "ESE", "SE", "E"};
12 byte dirOffset = 0; // variable para ajustar la veleta
13
14 void setup() {
15 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
16 Serial.begin(9600);
17 while (!Serial) delay(10);
18
19 // Configurando el estado de los pines digitales D4 y D5 para funcionar como contadores:
20 pinMode(PIN_ANEMOMETRO, INPUT);
21 pinMode(PIN_RAINGAUGE, INPUT);
22 digitalWrite(PIN_ANEMOMETRO, HIGH);
23 digitalWrite(PIN_RAINGAUGE, HIGH);
24 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO), contarAnemometro, FALLING);
25 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_RAINGAUGE), contarAnemometro, FALLING);
26 }

```

Figura 114: Primer fragmento del código de programación para la verificación digital del módulo Weather Meter.

```

Weather_Meter
27
28 void loop() {
29
30 // Velocidad del viento y precipitación pluvial:
31 float v = numRevsAnemometro;
32 float pp = numGotasPluviometro;
33 Serial.print("Vel. m/s (nro. de revoluciones) = "); Serial.println(v);
34 Serial.print("Pp. mm (nro. de balanceos = "); Serial.println(pp);
35 numRevsAnemometro = 0;
36 numGotasPluviometro = 0;
37
38 // Dirección del viento del Weather Meters:
39 byte x;
40 int d = analogRead(PIN_VELETA) >> 2;
41 for (x = 0; x < NUMDIRS; x++) {
42 if (adc[x] >= d) break;
43 }
44 x = (x + dirOffset) % 16;
45 char* dir = strVals[x];
46 Serial.print("Dir. = "); Serial.println(dir);
47
48 delay(2000);
49 }
50
51 void contarAnemometro() { // Función creada para configurar el anemómetro
52 numRevsAnemometro++;
53 }
54
55 void contarPluviometro() { // Función creada para configurar el pluviómetro
56 numGotasPluviometro++;
57 }

```

Figura 115: Segundo fragmento del código de programación para la verificación digital del módulo Weather Meter.

3.5.4. Módulo de radiación UV ML8511

El programa de verificación se muestra en la Figura 116, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundos, de valores que corresponden a la radiación UV en bits registrados al momento de la prueba. En caso de algún error de conexión o inicialización, los valores registrados oscilarán incoherentemente o se mantendrán en cero. Luego, en caso de algún deterioro o problema interno que no afecte la conexión, los valores registrados serán valores fuera del rango de medición del sensor o que no representen el entorno, lo cual se puede verificar al momento de una calibración rutinaria.

```
ML8511
1 #define PIN_RADIACION A6 // Definición del PIN analógico A6 del microcontrolador
2
3 void setup() {
4 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
5 Serial.begin(9600);
6 while (!Serial) delay(10);
7 }
8
9 void loop() {
10
11 float r = analogRead(PIN_RADIACION); // Valor en bits
12 Serial.print("Rad. W/m^2 (bits) = "); Serial.println(r);
13
14 delay(2000);
15 }
```

Figura 116: Código de programación para la verificación digital del módulo ML8511.

3.5.5. Módulo de radiación SI1145

El programa de verificación se muestra en la Figura 117, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener el texto: “SI1145 CORRECTO” y una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundos, de tres valores que corresponden a la radiación para cada espectro que el sensor pueda medir (visible, infrarrojo y ultravioleta), los cuales son registrados al momento de la prueba. En caso de error con la inicialización, el monitor serial mostrará el texto “SI1145 ERROR” y el programa se paralizará. Luego, en caso de algún deterioro o problema interno que no afecte la conexión, los valores registrados serán nulos, fuera del rango de medición de los sensores o que no representen el entorno, lo cual se puede verificar al momento de una calibración rutinaria.

```

SI1145 §
1 #include <Adafruit_SI1145.h> // Permite la conexión con el sensor SI1145 Grove Sensor de Luz
2 #include <wiring_private.h> // Permite la inclusión de la función pinPeripheral()
3
4 Adafruit_SI1145 si1145 = Adafruit_SI1145();// Instancia de la clase "SI1145" para el sensor de luz visible, infrarrojo y UV.
5 // Instancia de la clase TwoWire para generar un nuevo puerto i2c debido al conflicto
6 // entre la dirección del sensor SI1145 y Arduino MKR
7 TwoWire myWire(&sercom3, 0, 1); // D0 -> SDA y D1 -> SCL
8
9 void setup(){
10 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
11 Serial.begin(9600);
12 while (!Serial) delay(10);
13
14 myWire.begin(); // Inicio del nuevo puerto i2c
15 pinPeripheral(0, PIO_SERCOM); // Asignando función SDA al pin 0
16 pinPeripheral(1, PIO_SERCOM); // Asignando función SCL al pin 1
17
18 // Inicialización del módulo SI1145 en la dirección 0x60 y con el nuevo puerto i2c creado
19 while (!si1145.begin(0x60, &myWire)){
20 Serial.println("SI1145 ERROR");
21 } Serial.println("SI1145 CORRECTO");
22 }
23
24 void loop(){
25 float rvis = si1145.readVisible(); // Creando variable de rad. solar, en el espectro visible
26 float rir = si1145.readIR(); // Creando variable de rad. solar, en el espectro infrarrojo
27 float ruv = si1145.readUV(); // Creando variable de rad. solar, en el espectro ultravioleta
28
29 Serial.print("Rad. Vis. = "); Serial.println(rvis);
30 Serial.print("Rad. IR = "); Serial.println(rir);
31 Serial.print("Rad. UV = "); Serial.println(ruv);
32
33 delay(2000);
34 }

```

Figura 117: Código de programación para la verificación digital del módulo SI1145.

3.5.6. Módulo de reloj de tiempo real DS3231

El programa de verificación se muestra en la Figura 118, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener el texto: “RTC CORRECTO” y una secuencia iterativa, en intervalos de 2 segundos, de valores que corresponden a la fecha y hora del momento con un pequeño desfase y en el formato definido al inicio del programa. En caso de error con la inicialización, el monitor serial mostrará el texto “RTC ERROR” y el programa se paralizará. Luego en caso de algún deterioro o error interno independiente a la conexión, se presentarán valores incoherentes o nulos, lo que indica que será necesario un cambio de módulo.

```

RTC_DS3231
1 #define FORMATO_FECHA "DD/MM/YYYY hh:mm:ss AP"
2
3 #include <RTClib.h> // Permite la conexión con el módulo RTC DS3231 (Reloj de tiempo real)
4
5 RTC_DS3231 rtc; // Instancia de la clase "RTC_DS3231" para el módulo de reloj de tiempo real.
6 DateTime reloj; // Instancia de la clase "DateTime" que almacenará valores de hora y fecha.
7
8 void setup(){
9 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
10 Serial.begin(9600);
11 while (!Serial) delay(10);
12
13 // Inicialización del módulo DS3231 mediante el protocolo i2c
14 while (!rtc.begin()) {
15 Serial.println("RTC ERROR");
16 } Serial.println("RTC CORRECTO");
17
18 rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
19 }
20
21 void loop(){
22
23 reloj = rtc.now();
24 String fecha_y_hora = reloj.toString(FORMATO_FECHA);
25
26 Serial.print("Fecha y hora = "); Serial.println(fecha_y_hora);
27
28 delay(2000);
29 }

```

Figura 118: Código de programación para la verificación digital del módulo DS3231.

3.5.7. Módulo de adaptador de memoria extraíble microSD

El programa de verificación se muestra en la Figura 119, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener el texto: “SD CORRECTO” para una inicialización exitosa, seguido por el texto “Escritura correcta” en caso de haber creado con éxito el archivo de prueba y seguido a su vez por el contenido de dicho archivo “Probando 1, 2, 3” en caso de haber guardado el archivo correctamente. En caso de error con la inicialización, el monitor mostrará el texto “SD ERROR” y el programa se detendrá. Luego, en caso de algún error con el nombre del archivo o una desconexión inesperada, se mostrará el texto “Error en apertura de prueba.txt” y seguido por “Error en la lectura del archivo prueba.txt”. Finalmente, en caso de algún deterioro o error interno, luego de haber verificado todas las conexiones se deberá probar con alguna otra memoria extraíble microSD, para descartar que el error sea por dicha memoria, y en caso continúe el fallo, será necesario el cambio de módulo.

```

microSD
1 #define PIN_SD 7 // Definiendo pin digital D7 para la comprobación del módulo adaptador microSD
2
3 #include <SPI.h> // Permite la comunicación a través del protocolo SPI
4 #include <SD.h> // Permite la conexión con el módulo adaptador de memoria microSD
5
6 File archivo; // Instancia de la clase "File" que permitirá interactuar con la memoria
7
8 void setup(){
9 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
10 Serial.begin(9600);
11 while (!Serial) delay(10);
12
13 while (!SD.begin(PIN_SD)) { // inicialización de tarjeta microSD
14 Serial.println("SD ERROR");
15 } Serial.println("SD CORRECTO");
16
17 // Abre o crea un archivo denominado "prueba.txt" y devuelve TRUE si se tuvo éxito y FALSE en caso contrario
18 archivo = SD.open("prueba.txt", FILE_WRITE);
19
20 if (archivo) { // Almacenamiento de información
21 archivo.println("Probando 1, 2, 3"); //escribirá en el archivo prueba.txt
22 Serial.println("Escribiendo en archivo prueba.txt...");
23 archivo.close(); // Para evitar errores en el proceso de almacenamiento
24 Serial.println("Escritura correcta");
25 } else {
26 Serial.println("Error en apertura de prueba.txt");
27 }
28
29 archivo = SD.open("prueba.txt"); // Lectura de datos del archivo prueba.txt
30 if (archivo) {
31 Serial.println("Contenido de prueba.txt: ");
32 while (archivo.available()){
33 Serial.write(archivo.read()); // lectura de a un caracter por vez hasta finalizar
34 } archivo.close();
35 } else { Serial.println("Error en la lectura del archivo prueba.txt");
36 }
37 }
38
39 void loop(){}

```

Figura 119: Código de programación para la verificación digital del módulo adaptador de memoria extraíble microSD.

3.5.8. Módulo de visualización LCD

El programa de verificación se muestra en la Figura 120, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener el texto: “LCD CORRECTO” para una inicialización exitosa, además la pantalla LCD deberá mostrar los textos: “LCD CORRECTO” y “HOLA MUNDO” separados por un salto de línea. En caso de error con la inicialización, el monitor mostrará el texto “LCD ERROR” y el LED del microcontrolador al que esté conectado la pantalla comenzará a parpadear. En caso de pasar la prueba exitosa pero no mostrar ningún contenido, se deberá verificar el potenciómetro ubicado en la parte posterior de la pantalla para poder ajustar su contraste, en caso ello no funcione, se deberá verificar eléctricamente para dar constancia de sus conexiones y en caso persista el fallo, se deberá reemplazar el módulo por uno nuevo.

```

LCD
1 #include <Wire.h>           // Permite la conexión del módulo LCD 20x4 o 16x2 con adaptador i2c, mediante el protocolo i2c
2 #include <hd44780.h>       // ... a través del protocolo I2C mediante la biblioteca hd44780
3 #include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h> // Esta librería requiere de las dos anteriores y es la que crea la clase para trabajar con el LCD
4
5 hd44780_I2Cexp lcd;       // Instancia de la clase "hd44780_I2Cexp" para la pantalla lcd 20x4 o 16x2
6
7 const int LCD_COLS = 20;  // Número de columnas en la matriz de la pantalla LCD
8 const int LCD_ROWS = 4;   // Número de filas en la matriz de la pantalla LCD
9
10 void setup(){
11 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
12 Serial.begin(9600);
13 while (!Serial) delay(10);
14
15 int estado = lcd.begin(LCD_COLS, LCD_ROWS); // Inicializando el módulo LCD, da 1 cuando existe error
16 if(estado){
17     hd44780::fatalError(estado); // Función que hace que parpadee el LED del microcontrolador
18     Serial.println("LCD ERROR");
19 } Serial.println("LCD CORRECTO");
20
21 lcd.backlight(); // Permite el encendido de la luz trasera del módulo
22 lcd.setCursor(0,0); lcd.print("LCD CORRECTO");
23 lcd.setCursor(0,2); lcd.print("HOLA MUNDO");
24 }
25
26 void loop(){
27

```

Figura 120: Código de programación para la verificación digital del módulo LCD.

3.5.9. Microcontrolador Arduino MKR WiFi1010

El programa de verificación de la conexión WiFi del microcontrolador se muestra en la Figura 121, cuyo resultado mostrado en el monitor serial del software, deberá contener el texto: “Conectado con éxito a la red Wi-Fi”, mientras que, en caso de error deberá mostrar el texto “No conectado a Wi-Fi! Conectando...” lo que indica que tratará una vez más de conectarse a la red incluida por el usuario. Luego, el resultado mostrado en el monitor serial luego de 2 segundos deberá mostrar el texto “Conectado a la red Wi-Fi” y en caso de continuar con el error, se mostrará el texto “No se puede conectar al Wi-Fi”. En caso de persistir en este error, se deberá verificar el estado de la red con un dispositivo externo y si dicha red se encuentra operativa, se deberá reemplazar el microcontrolador en caso no se pueda prescindir de la función de conexión a la red.

```

WiFi_ArduinoMKR
1 #include <WiFiNINA.h>       // Permite la conexión a redes WiFi para la placa MKR WiFi 1010
2
3 char ssid[] = "USUARIO";   // Variable que almacena el SSID de la red WiFi a la que se desea conectar
4 char pass[] = "CONTRASEÑA"; // Variable que almacena la contraseña de la red WiFi seleccionada
5
6 void setup(){
7 // Configuración de la comunicación serial a través del monitor serial:
8 Serial.begin(9600);
9 while (!Serial) delay(10);
10
11 // Conectando a la red Wi-Fi seleccionada:
12 Serial.println("Conectando a Wi-Fi...");
13
14 WiFi.begin(ssid, pass); // Inicializando la conexión inalámbrica del Arduino MKR WiFi 1010
15 if (WiFi.status() != WL_CONNECTED){
16     Serial.println("No conectado a Wi-Fi! Conectando...");
17     WiFi.begin(ssid, pass); // Inicializando la conexión nuevamente
18     delay(2000);           // tiempo en milisegundos, para obtener alguna conexión
19 if (WiFi.status() != WL_CONNECTED){
20     Serial.println("No se puede conectar al Wi-Fi.");
21 } else Serial.println("Conectado a la red Wi-Fi");
22 } else Serial.println("Conectado con éxito a la red Wi-Fi");
23 }

```

Figura 121: Código de programación para la verificación digital de la conexión a la red del microcontrolador Arduino MKR WiFi 1010.

3.6. CALIBRACIÓN RUTINARIA

Luego de haber realizado las verificaciones eléctricas y digitales de cada uno de los módulos y sensores, se procede a ensamblarlos nuevamente. Previo a poner en funcionamiento continuo el prototipo, se deberá verificar que cada uno de los sensores se encuentre adecuadamente calibrado, esto se logrará mediante el registro de datos con el programa provisto por el desarrollador y las funciones de calibración predeterminadas, por un periodo de al menos tres días y se comparará dicha información con los datos registrados por una estación patrón o de referencia para el mismo periodo. Se deberá verificar que los valores estadísticos de regresión lineal y correspondencia sean los mejores posibles y que los errores encontrados sean los mínimos posibles.

Es recomendable realizar este proceso con la verificación del desarrollador del proyecto para garantizar que los procesos se realizaron adecuadamente y determinar si los sensores se encuentran en óptimo funcionamiento, requieren un cambio en sus funciones de calibración o requieren un reemplazo.

ANEXO 6: Panel fotográfico durante el proceso de investigación



Figura 122: Ensamblaje del trípode para montar la estación.



Figura 123: Trípode de estación meteorológica ensamblado.



Figura 124: Colocación de estructura de panel con el panel solar.



Figura 125: Ajuste angular de la estructura de soporte del panel solar.



Figura 126: Unión de cables de panel solar para conexión.



Figura 127: Colocación de caja de protección de batería y regulador sobre mástil.



Figura 128: Instalación de estructura de soporte de panel sobre mástil.



Figura 129: Conexión de cables con batería solar.



Figura 130: Conexión entre controlador de carga solar y batería solar.



Figura 131: Conexión de controlador de carga solar con batería y panel solar.

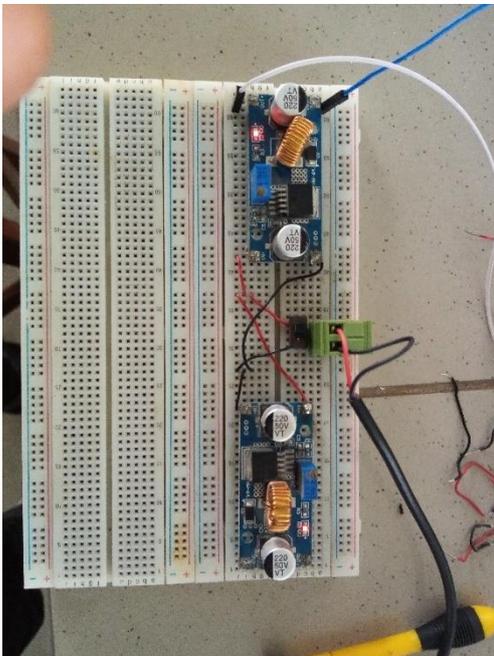


Figura 132: Implementación de reguladores LM2596 para líneas de 5V y 3.3V.



Figura 133: Primera habilitación de la unidad central de procesamiento con placas de pruebas.



Figura 134: Segunda habilitación de la unidad central de procesamiento con placas de pruebas.

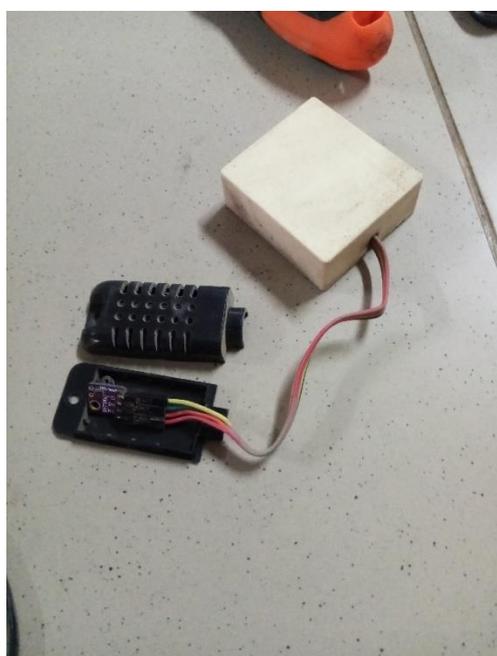


Figura 135: Habilitación del sensor SHT31 con adaptador RJ11.



Figura 136: Verificación eléctrica de PCB del anemómetro.

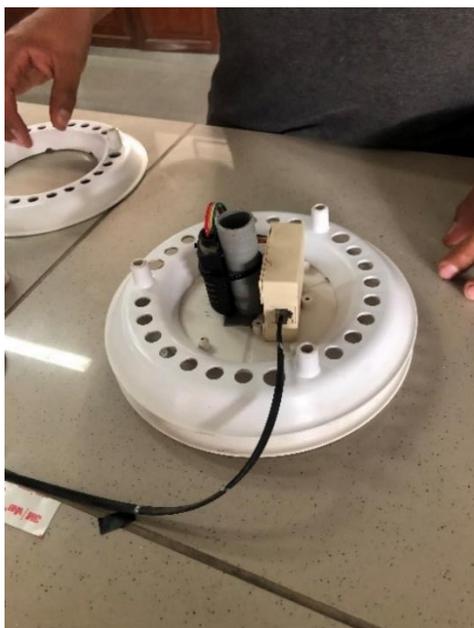


Figura 137: Colocación del sensor SHT31 dentro de cámara de protección basada en pantalla de Stevenson.



Figura 138: Ensamblaje de estructura de soporte con módulo de medición de temperatura y humedad relativa.



Figura 139: Ensamblaje de anemómetro y veleta del módulo Weather Meter.



Figura 140: Módulos de temperatura y humedad, y de velocidad, dirección del viento y precipitación ensamblados.

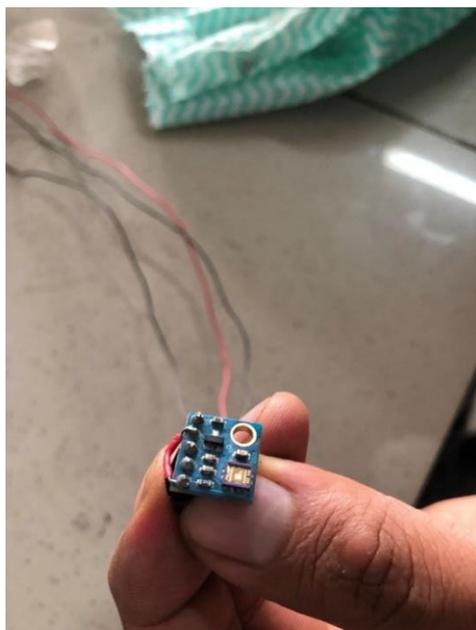


Figura 141: Habilitación del sensor ML511.

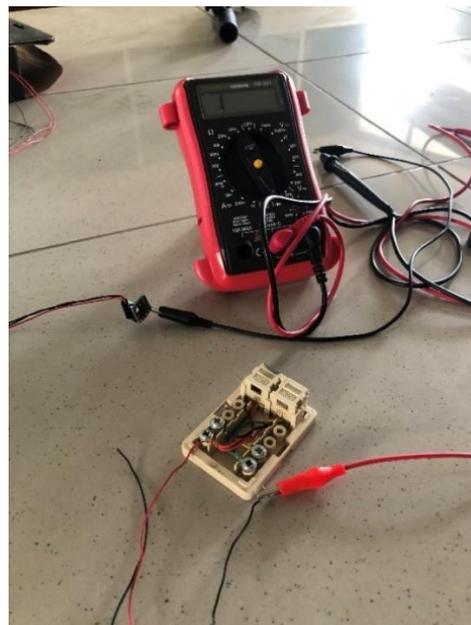


Figura 142: Verificación eléctrica de continuidad del sensor ML511.

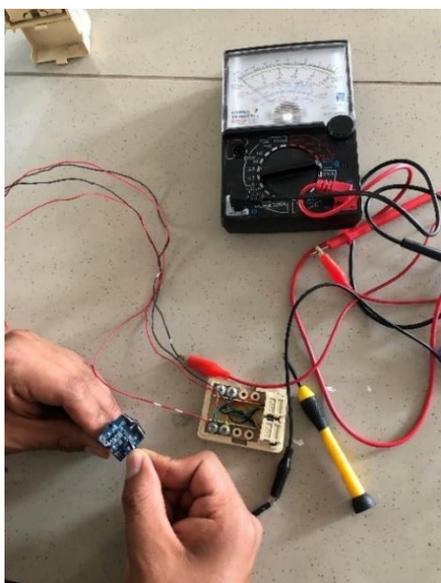


Figura 143: Verificación de continuidad eléctrica del sensor SI1145.

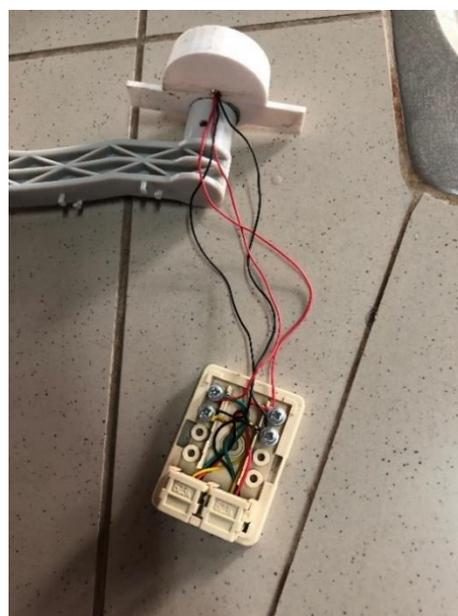


Figura 144: Habilitación del sensor SI1145 y estructura del módulo piranómetro.



Figura 145: Módulo piranómetro habilitado.



Figura 146: Ensamblaje de los módulos de temperatura y humedad, velocidad y dirección del viento, y radiación solar con mástil superior del trípode.



Figura 147: Vista superior de los módulos piranómetro y Weather Meter unidos.

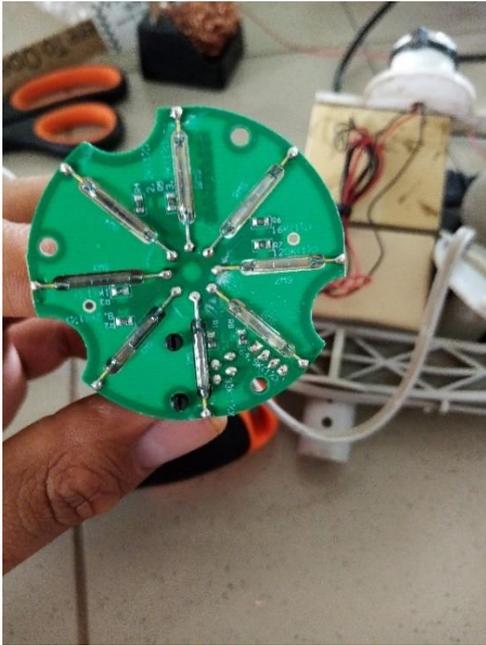


Figura 148: Placa PCB del sensor de dirección del viento.

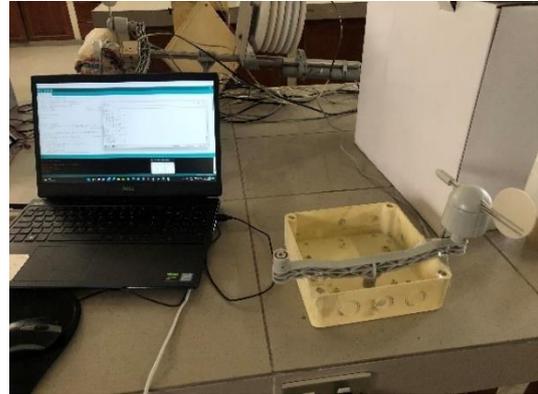


Figura 149: Calibración del sensor de velocidad del viento.

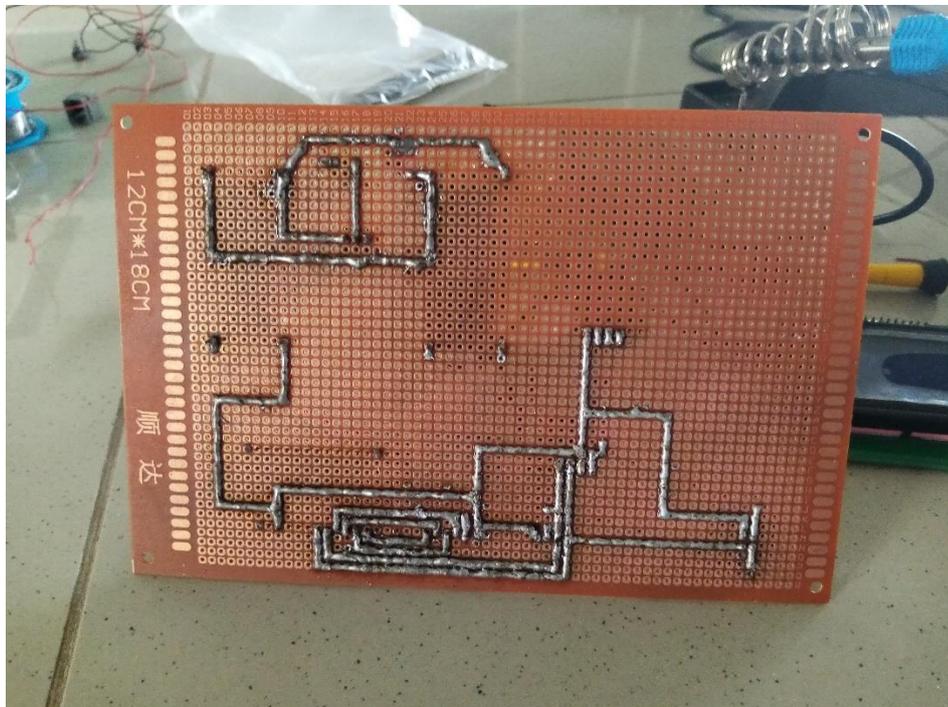


Figura 150: Vista posterior de placa central de procesamiento en proceso de soldadura de conexiones.

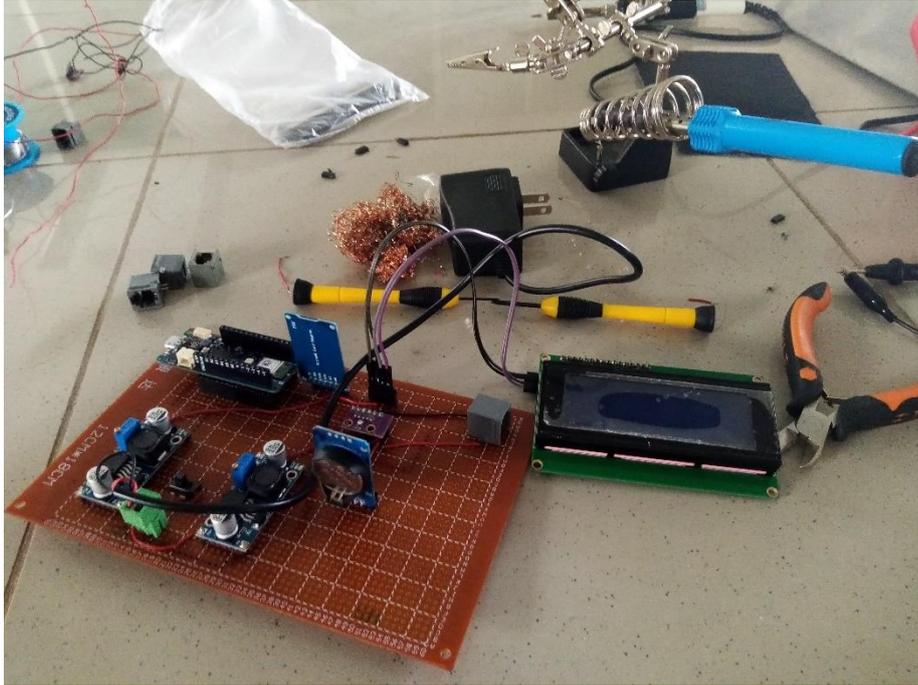


Figura 151: Vista superior de placa central de procesamiento, incluye microcontrolador, módulo RTC, módulo datalogger, sensor de presión atmosférica y reguladores de voltaje.



Figura 152: Toma de coordenadas del lugar de instalación del prototipo.



Figura 153: Vista del subsistema de gestión de datos con prototipo instalado en campo.



Figura 154: Datos de medición mostrados en pantalla LCD en intervalos de 10 segundos para generar promedios de 1 minuto.



Figura 155: Vista del prototipo puesto en funcionamiento para la fase de calibración.

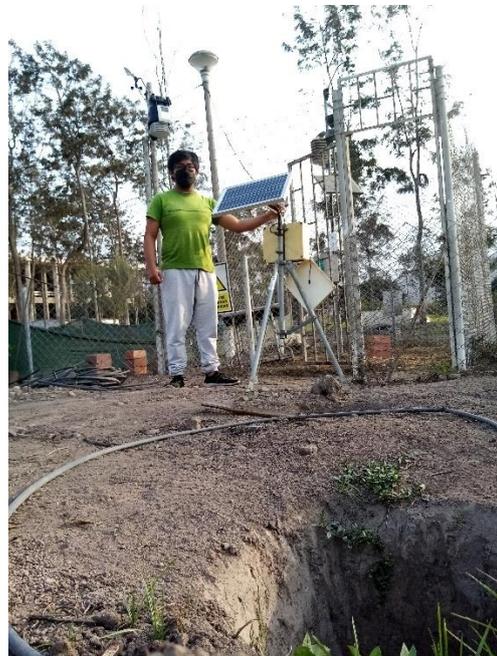


Figura 156: Parte inferior del prototipo luego del desensamblaje de la parte superior, para el transporte del equipo.



Figura 157: Módem de internet y router repetidor para garantizar la red inalámbrica WiFi.



Figura 158: Habilitación de la zona de instalación para colocación de grass americano.



Figura 159: Colocación de mangueras para riego por goteo subterráneo para grass americano.



Figura 160: Zona de instalación de estaciones meteorológicas con cobertura vegetal renovada.



Figura 161: Herramientas y materiales utilizados en el desarrollo del proyecto.



Figura 162: Mantenimiento y limpieza del sistema fotovoltaico.



Figura 163: Verificación eléctrica del prototipo.



Figura 164: Lavado y limpieza de la cámara del módulo de temperatura y humedad.



Figura 165: Limpieza de sulfatos con WD-40 del sensor ML8511.



Figura 166: Mantenimiento y limpieza de la caja de protección de la batería y regulador de carga.



Figura 167: Estructuras en acero inoxidable de reemplazo para panel solar y cajas de protección.



Figura 168: Componentes sujetadores para estructuras metálicas utilizadas en el ensamblaje del prototipo.

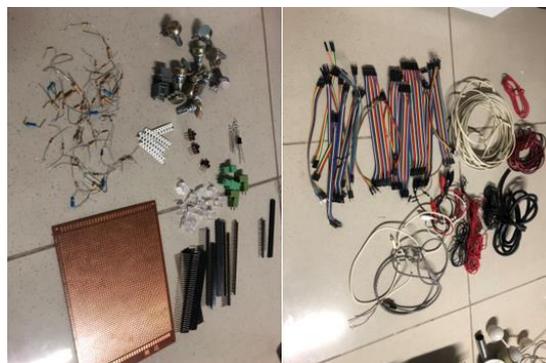


Figura 169: Componentes electrónicos y eléctricos utilizados para el desarrollo del proyecto.



Figura 170: Mantenimiento y calibración estación meteorológica de referencia Davis Vantage Pro2 de la FIA por parte del personal de la empresa Davis Instruments, en la UNALM.