

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Estaciones meteorológicas para las centrales hidroeléctricas Chocosuelas y
Cubujuquí**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Marco Aurelio Leitón Morera

Cartago, Junio de 2013

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

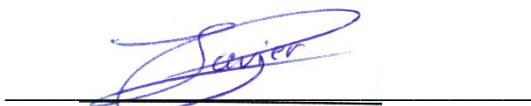
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

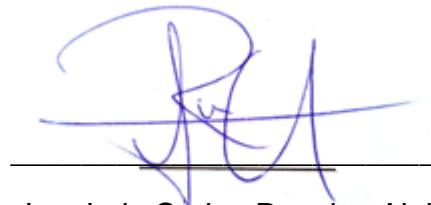
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor Lector



Ing. Luis Carlos Rosales Alpizar

Profesor Asesor

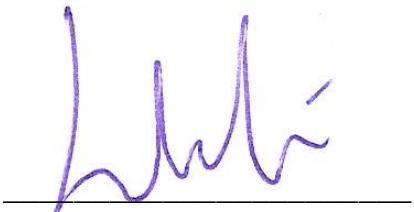
Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Junio 2013

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Marco Aurelio Leitón Morera
Cartago, 7 de junio de 2013
Céd: 1-1369-0666

Resumen

La generación hidroeléctrica de COOPELESCA depende de los distintos niveles de tarifa de compra de energía, pues la energía que COOPELESCA vende a sus abonados y no produce en sus plantas, debe comprarla al Instituto Costarricense de Electricidad, y este instituto tiene definido tres niveles de precio, en función de periodos horarios en el transcurso del día; así la tarifa es más alta cuando hay mayor demanda a nivel nacional (al medio día y al empezar la noche), la tarifa es mediana en el tránscurso de la mañana y parte de la tarde y tiene un precio sustancialmente más bajo en la noche. Entonces a COOPELESCA le interesa obviamente producir a su máxima capacidad en las horas en que la tarifa es más alta.

Actualmente la cooperativa no cuenta con información específica del comportamiento meteorológico en las microcuencas que abastecen los proyectos hidroeléctricos Chocosuelas y Cubujuquí, lo que le impide tomar decisiones oportunas que beneficien el aprovechamiento del agua.

Este informe plantea el uso de una estación meteorológica remota con un costo hasta diez veces menor a las estaciones meteorológicas comerciales, debido a su desarrollo con base en las necesidades específicas de la cooperativa, la habilidad de integrar sensores de distintos fabricantes y la capacidad de establecer una comunicación con el sistema SCADA aprovechando la plataforma de infocomunicaciones que dispone la cooperativa.

Palabras clave:

Estación Meteorológica, Arduino Mega, Datalogger, MODBUS SCADA.

Abstract

The hydroelectric generation of COOPELESCA depends on the different cost of the electricity. COOPELESCA sells electricity to its subscribers, and the demand that goes uncovered by self-produced electricity has to be purchased to ICE.

ICE has 3 different rates to sell electricity to COOPELESCA, according to the time of the day. The most expensive rate happens when the overall Costa Rica's electricity demand is higher: During noon and at the beginning of evening. During the morning and afternoon, the rate is intermediate and during night hours the rate is the lowest.

Thus, COOPELESCA's interest is to maximize electric generation on its own during the most expensive hours.

As of today, COOPELESCA lacks of specific information on the meteorological behavior affecting the micro-watersheds supplying water to the Chocosuelas and Cubujuqui hydro-electric generating stations, which adds uncertainty to the process of handling the water levels for optimal electric generation.

This document explores the use of a remote electronic meteorological station, built on very low cost components (10% comparable to market available solutions) and made to fit COOPELESCA's specific needs, such as the integration of specific weather sensors and providing a connection to the existing SCADA platform

Key Words:

Weather Station, Arduino Mega, Datalogger, MODBUS, SCADA.

Dedicatoria

A mis padres Avisaí Leitón Cambronero y
Lidiana Morera Vargas por el apoyo incondicional
en todas las acciones que he emprendido
a lo largo de mi vida.

Agradecimiento

A mi familia y a Vanessa por la confianza y apoyo total brindando durante el transcurso del proyecto.

A mis compañeros, amigos y profesores por el conocimiento adquirido durante los últimos años.

Al profesor asesor Ing. Luis Carlos Rosales Alpizar, por su servicial apoyo y asesoría brindada en el proyecto.

A Marcelino Blanco Umaña (Subgerente de Producción Eléctrica), a Eithel Osegueda Gómez (Jefe del Centro de Control) y Guido Rodríguez Murillo (Coordinador de la Unidad de Automatización), por la oportunidad que me dieron para realizar el proyecto de graduación en el Centro de Control de COOPELESCA.

A Minor Solís Ramírez (Ing. Electrónico), a Jorge Torres Díaz (técnico en telecomunicaciones) y los operadores del Centro de Control de COOPELESCA, por la colaboración brindada durante el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice de figuras	ix
Índice de Tablas	xiii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Entorno del proyecto	1
1.1.1. Distribución Eléctrica	3
1.1.2. Generación eléctrica ¹	3
1.1.3. Servicios de infocomunicaciones ¹	3
1.1.4. Servicios complementarios ¹	4
1.2 Generación eléctrica en COOPELESCA	4
1.2.1 Centrales hidroeléctricas	4
1.2.2 Operación automática de la producción	5
1.3 Problemática existente e importancia de la solución	6
1.4 Síntesis del problema	7
1.5 Enfoque de la solución.....	7
Capítulo 2 Meta y objetivos	10
2.1 Meta.....	10
2.2 Objetivo general.....	10
2.3 Objetivos específicos	10
Capítulo 3 Marco teórico	12
3.1 Meteorología y climatología	12
3.2 Principales variables atmosféricas	13
3.2.1 Presión atmosférica	13
3.2.2 Viento	13

3.2.3	Humedad	14
3.2.4	Temperatura	15
3.2.5	Precipitación	16
3.3	Sensores Meteorológicos.....	16
3.3.1	Barómetro BMP085	17
3.3.2	Termómetro y sensor de humedad relativa RHT03	23
3.3.3	Anemómetro Ultimeter Pro	28
3.3.4	Pluviómetro Ultimeter Pro.....	30
3.4	Datalogger	31
3.5	Entorno Arduino	31
3.5.1	Estructura	33
3.5.2	Programación	36
3.6	Comunicaciones Eléctricas	40
3.6.1	Protocolos de comunicación.....	40
3.7	Sistema SCADA.....	44
3.7.1	Elementos sistema SCADA	45
3.7.2	Módulos de un programa SCADA.....	49
3.8	Software SCADA utilizado por Coopelesca.....	52
3.8.1	Survalent Technology	52
3.8.2	Wonderware	56
Capítulo 4 Metodología.....	60	
4.1	Implementación de la solución	60
4.2	Selección de componentes	63
4.2.1	Sensores	63
4.2.2	Dispositivos de almacenamiento y procesamiento	68
4.2.3	Almacenamiento de datos	72
4.2.4	Reloj de tiempo real.....	73
4.2.5	Dispositivos para la trasmisión de datos.....	73
4.2.6	Dispositivos para la alimentación eléctrica	77
4.3	Descripción de rutinas	77
4.3.1	Módulo de almacenamiento.....	80

4.3.2	Módulo de adquisición de variables.....	81
4.3.3	Módulos de cálculo de velocidad y dirección del viento.....	85
4.3.4	Módulo de cálculo de precipitaciones	88
4.4	Selección de puntos geográficos	91
4.4.1	Complejo hidroeléctrico Chocosuelas.....	91
4.4.2	Central Hidroeléctrica Cubujuquí	93
Capítulo 5 Análisis de resultados		94
5.1	Comunicación con los sensores.....	94
5.1.1	RHT03	94
5.1.2	BMP085.....	95
5.1.3	Pluviómetro.....	97
5.1.4	Anemómetro	98
5.2	Operación del módulo de adquisición y procesamiento de las variables meteorológicas	103
5.2.1	Pruebas del reloj de tiempo real	103
5.2.2	Pruebas de almacenamiento	104
5.2.3	Operación del módulo.....	106
5.3	Operación del módulo de transmisión	108
5.3.1	Comunicación de la tarjeta Ethernet.....	108
5.3.2	Pruebas iniciales del protocolo MODBUS	109
5.4	Comunicación con Survalent Technology	111
5.4.1	Creación del perfil del datalogger	111
5.4.2	Almacenamiento histórico de las variables meteorológicas.....	116
5.5	Interfaz gráfica	118
5.6	Enlace inalámbrico.....	120
5.7	Instalación de la estación.....	122
Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones		125
6.1	Conclusiones	125
6.2	Recomendaciones	126
Bibliografía		127

Apéndices.....	6-1
Apéndice 1. SRS de Interfaz gráfica del prototipo de la estación meteorológica..	6-1
Apéndice 2. Evaluación de la interfaz gráfica.	6-2
Anexos.....	6-3
Anexo 1. Tabla de datos capturados por el prototipo de estación meteorológica, extraído de la base de datos del sistema SCADA.....	6-3
Anexo 2. Gráficos históricos de 5 días generados a partir de los datos aportados por el prototipo de la estación meteorológica.....	6-11

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DE COOPELESCA	2
FIGURA 1.2 DIAGRAMA GENERAL DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	8
FIGURA 3.1 SENSOR DE PRESIÓN BMP085 DE BOSCH.....	18
FIGURA 3.2 ESQUEMA DE UN SENSOR DE PRESIÓN PIEZORESISTIVO FABRICADO CON TECNOLOGÍA MEMS. ..	19
FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SENSOR BMP085	21
FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA OBTENER VALORES DE TEMPERATURA Y PRESIÓN CON EL SENSOR BMP085.....	22
FIGURA 3.5 DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RHT03 DE MAXDETECT.....	23
FIGURA 3.6 SENSORES UTILIZADOS POR EL DISPOSITIVO RHT03, A LA IZQUIERDA EL SENSOR CAPACITIVO DE HUMEDAD Y A LA DERECHA EL TERMISTOR DE 10KΩ.....	23
FIGURA 3.7 COMPOSICIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD DE TIPO CAPACITIVO.	24
FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DISPOSITIVO RHT03 DE MAXDETECT	24
FIGURA 3.9 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN 1-WIRE DE MAXDETECT.....	26
FIGURA 3.10 TIEMPOS DE LAS SEÑALES EN EL PROTOCOLO 1-WIRE DE MAXDETECT.....	26
FIGURA 3.11 ENVÍO DE UN BIT CON VALOR LÓGICO 0 MEDIANTE EL PROTOCOLO 1-WIRE DE MAXDETECT....	27
FIGURA 3.12 ENVÍO DE UN BIT CON VALOR LÓGICO 1 MEDIANTE EL PROTOCOLO 1-WIRE DE MAXDETECT....	27
FIGURA 3.13 ANEMÓMETRO ULTIMETER DE PEET BROS.	28
FIGURA 3.14 PARTES DEL ANEMÓMETRO ULTIMETER PRO DE PEET BROS.....	29
FIGURA 3.15 COMPOSICIÓN DE UN INTERRUPTOR DE LENGÜETA.	29
FIGURA 3.16 PLUVIÓMETRO ULTIMETER PRO DE PEET BROS.....	30
FIGURA 3.17 INTERFAZ GRÁFICA 1.0.3 DE LA PLATAFORMA ARDUINO.	35
FIGURA 3.18 INTERFAZ SERIAL DE LA PLATAFORMA ARDUINO.	36
FIGURA 3.19 EJEMPLO DE CONEXIÓN DE DISPOSITIVOS MEDIANTE PROTOCOLO I2C.....	41
FIGURA 3.20 MODO DE COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS CON PROTOCOLO MODBUS.....	43
FIGURA 3.21 ESTRUCTURA BÁSICA DE UN SISTEMA SCADA	45
FIGURA 3.22 TOPOLOGÍAS BÁSICAS EN UN SISTEMA SCADA.....	48
FIGURA 3.23 EJEMPLO DE INTERFAZ GRÁFICA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA CON WONDERWARE INTOCUH.	50
FIGURA 3.24 SISTEMA ELÉCTRICO DE LA ZONA NORTE DEL PAÍS.....	53
FIGURA 3.25 DIAGRAMA DE LAS REDES TRIFÁSICAS DE COOPELESCA.	53
FIGURA 3.26 DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE COOPELESCA	54
FIGURA 3.27 GENERACIÓN ELÉCTRICA APORTADA AL SISTEMA DE LA ZONA NORTE.....	55

FIGURA 3.28 CONSUMO DE POTENCIA ELÉCTRICA CLASIFICADO POR CIRCUITOS EN LA ZONA NORTE.	55
FIGURA 3.29 PANTALLA PRINCIPAL DE CONTROL DE LAS PLANTAS HIDROELÉCTRICAS DE COOPELESCA.....	57
FIGURA 3.30 NIVELES DE LOS TRES EMBALSE DEL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO CHOCOSUELAS.	58
FIGURA 3.31 INTERFAZ DE FACTURACIÓN DE COOPELESCA EN EL AMBIENTE WONDERWARE.....	59
FIGURA 4.1 MAPA CONCEPTUAL DEL PROYECTO ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	62
FIGURA 4.2 LECTURAS DEL SENSOR BMP085 DENTRO Y FUERA DEL GABINETE.	67
FIGURA 4.3 ESCUDO SOLAR PARA EL SENSOR RHT03.....	67
FIGURA 4.4 DATALOGGER METEODATA-HYDRODATA-3000C DE GEONICA.....	68
FIGURA 4.5 DATALOGGER CR800 DE CAMPBELL SCIENTIFIC.	69
FIGURA 4.6 TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO MEGA 2350 R3.....	71
FIGURA 4.7 TARJETA MICROSD.....	73
FIGURA 4.8 RELOJ DE TIEMPO REAL DS1307.....	73
FIGURA 4.9 TARJETA ARDUINO ETHERNET CON SOCKET MICROSD.....	74
FIGURA 4.10 RADIO MODEM TSUNAMI MP.11.....	75
FIGURA 4.11 ANTENA DE REJA PARA 2.4GHZ.....	76
FIGURA 4.12 DIAGRAMA DE ANTENA DE REJA 2.4 GHZ.....	76
FIGURA 4.13 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ARRANQUE DEL ARDUINO MEGA.....	78
FIGURA 4.14 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CICLO DEL ARDUINO MEGA.....	79
FIGURA 4.15 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DEL ALMACENAMIENTO.....	81
FIGURA 4.16 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE VARIABLES.	84
FIGURA 4.17 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DE CÁLCULO DE VELOCIDAD.....	85
FIGURA 4.18 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTADOR DE VELOCIDAD.....	86
FIGURA 4.19 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DE CÁLCULO DE DIRECCIÓN.....	87
FIGURA 4.20 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTADOR DE DIRECCIÓN.....	88
FIGURA 4.21 DIAGRAMA DEL MÓDULO DE CÁLCULO DE PRECIPITACIONES POR HORA.	89
FIGURA 4.22 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÓDULO DE CÁLCULO DE PRECIPITACIONES POR DÍA.	90
FIGURA 4.23 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTADOR DE PRECIPITACIONES.	91
FIGURA 4.24 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO CHOCOSUELAS.....	92
FIGURA 4.25 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PRIMERA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE CUBUJUQUÍ	93
FIGURA 5.1 PRUEBA DE COMUNICACIÓN CON SENSOR RHT03.	94
FIGURA 5.2 TIEMPO DE COMUNICACIÓN ENTRE MICROCONTROLADOR Y SENSOR RHT03.....	95
FIGURA 5.3 PRUEBA DE COMUNICACIÓN CON EL SENSOR BMP085.....	96
FIGURA 5.4 TIEMPO DE COMUNICACIÓN ENTRE MICROCONTROLADOR Y SENSOR BMP085.	97

FIGURA 5.5	PRUEBA DEL MÓDULO DESARROLLADO PARA EL PLUVIÓMETRO PEET BROS.....	98
FIGURA 5.6	COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL ANEMÓMETRO AL APUNTAR AL NORTE.....	99
FIGURA 5.7	CÁLCULO DE LA RUTINA DEL ANEMÓMETRO EN DIRECCIÓN NORTE.....	99
FIGURA 5.8	COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL ANEMÓMETRO AL APUNTAR AL OESTE.....	100
FIGURA 5.9	CÁLCULO DE LA RUTINA DEL ANEMÓMETRO EN DIRECCIÓN OESTE.....	100
FIGURA 5.10	COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL ANEMÓMETRO AL APUNTAR AL SUR.....	101
FIGURA 5.11	CÁLCULO DE LA RUTINA DEL ANEMÓMETRO EN DIRECCIÓN SUR.....	101
FIGURA 5.12	COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL DEL ANEMÓMETRO AL APUNTAR AL ESTE.....	102
FIGURA 5.13	CÁLCULO DE LA RUTINA DEL ANEMÓMETRO EN DIRECCIÓN ESTE.....	102
FIGURA 5.14	RESULTADOS DE LA RUTINA DS_1307.....	103
FIGURA 5.15	TIEMPO COMUNICACIÓN ENTRE MICROCONTROLADOR Y RTC.....	104
FIGURA 5.16	RESULTADOS DEL EJEMPLO CARDINFO.....	105
FIGURA 5.17	EXTRACTO DEL ARCHIVO DATALOGGER01.TXT.....	106
FIGURA 5.18	FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE CAPTURA, CÁLCULO Y ALMACENAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	107
FIGURA 5.19	MODULÓ DE CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	108
FIGURA 5.20	RESULTADO DE LA COMUNICACIÓN CON TARJETA ARDUINO ETHERNET.....	109
FIGURA 5.21	PRUEBA DE COMUNICACIÓN DEL DATALOGGER MEDIANTE PROTOCOLO MOBUS.....	111
FIGURA 5.22	VENTANA 1 DEL IED WIZARD.....	112
FIGURA 5.23	VENTANA 2 DEL IED WIZARD.....	113
FIGURA 5.24	VENTANA 3 DEL IED WIZARD.....	114
FIGURA 5.25	COMMUNICATION LINES, SCADA EXPLORER DE SURVALENT TECHNOLOGY.....	114
FIGURA 5.26	VENTANA 1 DE CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN CON EL PROTOTIPO.....	115
FIGURA 5.27	VENTANA 2 DE CONFIGURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN CON EL PROTOTIPO.....	116
FIGURA 5.28	VENTANA 1 DE CONFIGURACIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS DEL PROTOTIPO.....	116
FIGURA 5.29	VENTANA 2 DE CONFIGURACIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS DEL PROTOTIPO.....	117
FIGURA 5.30	VENTANA 3 DE CONFIGURACIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS DEL PROTOTIPO.....	117
FIGURA 5.31	MENÚ PRINCIPAL DEL SCADA DE COOPELESCA CON ACCESO AL PROTOTIPO.....	118
FIGURA 5.32	PANTALLA PRINCIPAL DEL PROTOTIPO.....	119
FIGURA 5.33	SIMULACIÓN DE FALLA EN LA COMUNICACIÓN CON EL PROTOTIPO.....	119
FIGURA 5.34	LISTA DE EVENTOS DEL SCADA.....	120
FIGURA 5.35	ENLACE DE COMUNICACIÓN DE LA ESTACIÓN PROTOTIPO CON EL CENTRO DE CONTROL.....	120
FIGURA 5.36	VENTANA 1 DE CONFIGURACIÓN DEL RADIO-MODEM DEL PROTOTIPO.....	121
FIGURA 5.37	VENTANA 2 DE CONFIGURACIÓN DEL RADIO-MODEM DEL PROTOTIPO.....	121

FIGURA 5.38 VENTANA PRINCIPAL DE CONFIGURACIÓN DEL RADIO-MODEM DEL PROTOTIPO.	122
FIGURA 5.39 TÉCNICOS DE COOPELESCA EN LA INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO.	123
FIGURA 5.40 GABINETE DEL PROTOTIPO INSTALADO.....	123
FIGURA 5.41 PROTOTIPO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA INSTALADA.....	124
FIGURA A.1 GRÁFICA PRUEBA DE TEMPERATURA.....	6-11
FIGURA A.2 GRÁFICA PRUEBA DE HUMEDAD.....	6-11
FIGURA A.3 GRÁFICA PRUEBA DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	6-12
FIGURA A.4 GRÁFICA PRUEBA DE VELOCIDAD VIENTO.....	6-12
FIGURA A.5 GRÁFICA PRUEBA PRECIPITACIONES POR HORA.....	6-13
FIGURA A.6 GRÁFICA PRUEBA PRECIPITACIONES DEL DÍA.....	6-13

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR BMP085	18
TABLA 3.2 COEFICIENTES DE CALIBRACIÓN Y SU DISTRIBUCIÓN FÍSICA EN LA MEMORIA E ² PROM DEL BMP085.	
.....	20
TABLA 3.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR RTH03	25
TABLA 3.4 TARJETAS DE DESARROLLO DE ARDUINO	32
TABLA 3.5 VALORES Y CONVERSIONES DE VARIABLES ACEPTADOS POR ARDUINO.	36
TABLA 3.6 FUNCIONES BÁSICAS DE ARDUINO.....	37
TABLA 3.7 ESTRUCTURAS DE ARDUINO.	38
TABLA 3.8 BIBLIOTECAS BÁSICAS DE ARDUINO.....	40
TABLA 3.9 FUNCIONES DEL PROTOCOLO MODBUS.	42
TABLA 3.10 EJEMPLO DE SOLICITUD DEL MAESTRO UTILIZANDO PROTOCOLO MODBUS.....	44
TABLA 3.11 RESPUESTA DE UNIDAD ESCLAVO UTILIZANDO PROTOCOLO MODBUS.	44
TABLA 4.1 FECHA DE LAS GIRAS REALIZADAS PARA EL PROYECTO.	61
TABLA 4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS PLUVIÓMETROS.....	63
TABLA 4.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ANEMÓMETROS.	64
TABLA 4.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS BARÓMETROS.....	64
TABLA 4.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SENsoRES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.....	65
TABLA 4.6 COMPARACIÓN ENTRE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DATALOGGER EXISTENTES EN EL MERCADO Y DISPONIBLES POR LOS PROVEEDORES DE LA COOPERATIVA, EL QUE SE PRETENDE DESARROLLAR Y EL REQUERIDO PARA LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA SEGÚN ESPECIFICACIONES DE COOPELESCA.....	70
TABLA 4.7 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA TARJETA ARDUINO MEGA 2650 R3.	72
TABLA 4.8 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RADIO-MODEM TSUNAMI MP.11.	75
TABLA 5.1 VALORES DE CONFIGURACIÓN PARA PRUEBA DE TARJETA ARDUINO ETHERNET.	108
TABLA 5.2 RELACIÓN ENTRE LOS NÚMEROS DE REGISTROS DE MOBUS Y LAS VARIABLES QUE REPRESENTAN.	110
TABLA A.1 UNIDADES UTILIZADAS PARA LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	6-1
TABLA A.2 EVALUACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.	6-2
TABLA A.3 VALORES CAPTURADOS POR EL PROTOTIPO EL DÍA 19 DE MAYO DE 2013.....	6-3

Capítulo 1 Introducción

COOPELESCA es la empresa a cargo de generar, distribuir y mantener el servicio eléctrico para gran parte de la zona norte de Costa Rica.

En el área de generación, la cooperativa tiene la necesidad de monitorear remotamente datos meteorológicos de las microcuenca que alimentan las centrales hidroeléctricas para optimizar la producción de energía especialmente mediante el pronóstico confiable de la disponibilidad de agua.

Las soluciones disponibles en el mercado, aparte de estar fuera del presupuesto, cuentan con una serie de características que no son requeridas por COOPELESCA.

En este documento se describen el diseño, implementación y validación de la solución que se brindó a la empresa.

1.1 Entorno del proyecto

COOPELESCA es una cooperativa de electrificación rural fundada en 1965 que presta servicios de electricidad, alumbrado público e infocomunicaciones en la zona norte de Costa Rica.

COOPELESCA tiene un gobierno representado por 260 delegados, quienes a su vez representan a los cerca de 70.000 asociados de la empresa. Este gobierno se denomina Asamblea General de Delegados.

La Asamblea General hace operativas sus decisiones por medio del Consejo de administración, que está conformado por siete directores titulares quienes, como órgano colegiado, se encargan de dictar política de empresa, orientar la estrategia y velar porque la administración mantenga una correcta orientación.

La organización social se complementa con un comité de educación y bienestar social, un comité de vigilancia, que hace lo que un fiscal, un tribunal para los procesos

eleccionarios internos y una instancia propia de resolución de conflictos entre asociados y la organización.

La organización operativa está encabezada por el gerente general, máximo responsable de la operación de la empresa ante el consejo de administración. El gerente apoya su gestión en dos subgerencias corporativas (administración & finanzas y desarrollo organizacional).

Luego existen cuatro subgerentes encargados cada uno de una línea de negocio así:

- Producción de energía.
- Redes eléctricas y de infocomunicaciones.
- Producción y operación de infocomunicaciones.
- Relación con el asociado (servicios de valor agregado, mercadeo, trámites).

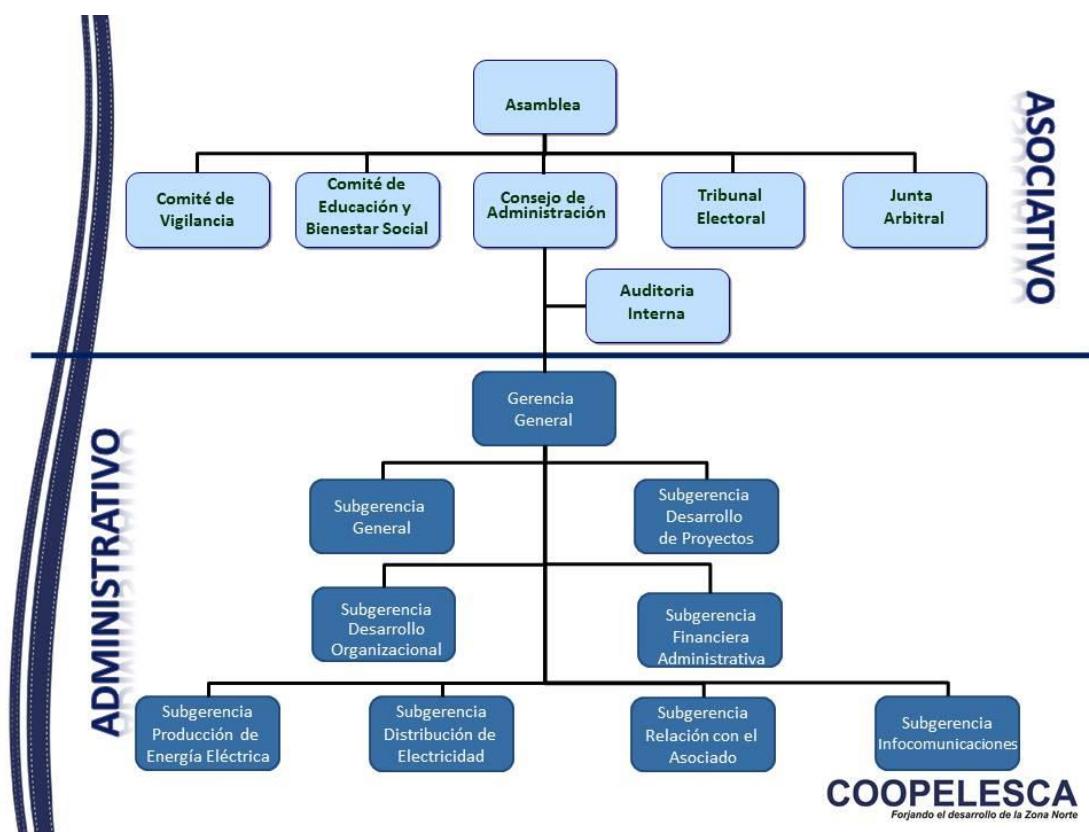


Figura 1.1 Estructura Organizacional de COOPELESCA

La unidad encargada del proyecto es la subgerencia de Producción Eléctrica de COOPELESCA encabezada por el ingeniero Marcelino Blanco. Los departamentos involucrados se encuentran a cargo de los ingenieros Eithel Osegueda Gómez Jefe del Centro de Control y Guido Rodríguez Murillo Coordinador de la Unidad de Automatización.

1.1.1. Distribución Eléctrica¹

Se ha instalado cerca de 80.000 servicios eléctricos (mezcla de servicios residenciales, comerciales e industriales) y se mantiene operativo el sistema público de alumbrado de ciudades, carreteras y parques en toda la zona que le corresponde servir. Las ventas anuales alcanzan los 365 GWH, alrededor de un 4 % de la demanda de todo el país. A pesar de atender una zona rural, con una densidad de población relativamente baja, ha logrado satisfacer el 99.9 % de la demanda de servicios, llegando incluso a poblados fronterizos (Costa Rica-Nicaragua).

1.1.2. Generación eléctrica¹

COOPELESCA es Propietaria de la Central Hidroeléctrica Chocosuela (Cuatro generadores instalados en tres casas con capacidad total de 25MW), central Cubujuquí (20MW), y posee un 45 % de participación en las Centrales Hidroeléctricas San Lorenzo (15 MW) y Sigifredo Solís (27MW), operada por un consorcio de Cooperativas del cual COOPELESCA es parte.

1.1.3. Servicios de infocomunicaciones¹

La Cooperativa tiene instalada una red de 309 km de cable coaxial y 344 km de fibra óptica para su negocio de infocomunicaciones, con un total de US\$6 millones de

¹ Memoria anual COOPELESCA 2011.

dólares invertidos. Las ventas de servicios como televisión por cable e internet son de aproximadamente US\$2 millones de dólares anuales.

1.1.4. Servicios complementarios¹

Adicionalmente la Cooperativa opera servicios dirigidos a la mejora en la calidad de vida de los asociados. Estos tienen que ver con ventajas en la compra de electrodomésticos y materiales eléctricos, seguros ajustados a las necesidades y conveniencia de las personas y un canal de televisión que contribuye a fortalecer los valores cooperativos y cívicos de la población en general y de los asociados en particular.

1.2 Generación eléctrica en COOPELESCA

1.2.1 Centrales hidroeléctricas

i. Complejo hidroeléctrico Chocosuelas:

El complejo está compuesto por 3 plantas en serie con dos tomas de agua y una sola descarga final. La toma y la descarga de agua se realizan del río La Vieja en San Carlos de Alajuela.

La etapa 1 de Chocosuela está ubicada 6 km al suroeste de Ciudad Quesada. Cuenta con una capacidad de 7 MW, mediante una turbina tipo Francis de eje horizontal y un generador que aprovecha una caída neta de 149 metros y un caudal de diseño de 6.17 m/s.

Las obras de derivación del caudal son dos presas de concreto, una sobre el río La Vieja y la otra sobre la quebrada San Cristóbal.

La etapa 2 de Chocosuela se inicia en el punto de descarga de Chocosuela 1 mediante un sifón que eleva el agua a un nuevo canal de conducción, este la lleva hasta un embalse y la descarga nuevamente a una casa de máquinas que cuenta con

2 equipos de generación con turbinas tipo Francis con una capacidad sumada de 14 MW.

La etapa 3 de Chocosuela toma el agua en el punto de descarga de Chocosuela 2 y por gravedad la conduce a una casa de máquinas que cuenta con un solo generador con turbina tipo Francis de 4MW. A partir de este punto el agua es devuelta al río.

ii. Central hidroeléctrica Cubujuquí:

COOPELESCA posee una central de generación hidroeléctrica ubicada en la cuenca del río Sarapiquí, que aprovecha las aguas del río Puerto Viejo y la quebrada Quebradón y se ubica aguas abajo de otra planta hidroeléctrica denominada Doña Julia. La central Cubujuquí aprovecha el potencial hidroeléctrico de ambas corrientes, gracias a una derivación temporal del agua de 5 km en su margen izquierda.

La información hidrológica existente del río Puerto Viejo se ha registrado desde noviembre de 1968, en la estación Hidrológica Puerto Viejo del ICE y los registros de 11 años de generación de la planta Doña Julia. COOPELESCA no tiene información propia sobre el comportamiento de la microcuenca en la que se ubica su planta y trabaja sobre los datos externos, facilitados por el proyecto hidroeléctrico Doña Julia, acomodándolos mediante triangulaciones para programar su producción, por lo que pretende, con el monitoreo remoto de las variables: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, precipitaciones, velocidad y dirección del viento, caracterizar el comportamiento del clima en la microcuenca.

1.2.2 Operación automática de la producción

Las plantas hidroeléctricas de la Cooperativa operan entre un 40 % y 50 % del día, según la cantidad de agua que se disponga en los embalses. Sin embargo las plantas de generación están sobrediseñadas para aprovechar la máxima producción posible en las horas del día en donde la tarifa de compra de energía eléctrica es la

más alta. Ya que de lo contrario, COOPELESCA tendría que comprarle la energía requerida al ICE a un mayor costo.

El agua es almacenada en los embalses por un determinado tiempo, para capturar una cantidad predeterminada de agua que posteriormente permitirá operar al 100 % la capacidad del generador en los momentos más oportunos del día.

El control y supervisión de las plantas hidroeléctricas de la Cooperativa se realizan desde un único Centro de Control ubicado en Ciudad Quesada, San Carlos, Alajuela, de manera remota por el sistema SCADA² (Supervisory Control And Data Acquisition) con plataforma de SURVALENT TECHNOLOGY³.

Actualmente, COOPELESCA maneja los volúmenes de agua en embalse basándose en los datos meteorológicos históricos contenidos en los estudios de factibilidad de cada planta y proyectados para los distintos meses del año, lo cual naturalmente agrega mucha incertidumbre.

Por esta razón, y por seguridad, los embalses se manejan con volúmenes de agua que pueden no ser los óptimos, y se busca una solución que, en tiempo real, permita monitorear las variables meteorológicas y comunicarlas a la plataforma SURVALENT TECHNOLOGY del Centro de Control para tomar decisiones con respecto al volumen del embalse.

1.3 Problemática existente e importancia de la solución

COOPELESCA actualmente necesita información meteorológica específica de precipitaciones, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa en las microcuencas que abastecen los embalses para optimizar la producción de energía en cada una de sus plantas. Es por ello que requiere desarrollar un sistema de monitoreo que produzca esa información significativa y en tiempo real,

² Software que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia.

³ Empresa que brinda soluciones que facilitan las operaciones en tiempo real de procesos industriales

para predecir en lo posible el comportamiento del recurso hídrico en cada una de las microcuenas de los ríos que abastecen las plantas hidroeléctricas.

Esta Cooperativa ya posee un sistema SCADA que trabaja en una plataforma fabricada por SURVALENT TECHNOLOGY el cual permite obtener información y contar con una operación automatizada de las plantas productoras de energía.

La información recogida por el monitoreo meteorológico se debe integrar al sistema SCADA existente, para que la operación y producción de las plantas hidroeléctricas pueda ajustarse de acuerdo con las condiciones proyectadas de recolección de agua en los embalses, para que los operadores de producción y despacho sepan que comportamiento puede esperarse de la microcuenca en cuanto a la producción de agua y con base en esa proyección puedan tomar decisiones de almacenar agua más o menos horas al día, o lo que es lo mismo, para que programen más o menos horas de producción según sea el caso, en coordinación con todo el sistema de distribución de energía que hace la Cooperativa a sus abonados.

1.4 Síntesis del problema

La Cooperativa requiere de información meteorológica integrada a su sistema existente de operación y control automatizado, de manera que pueda optimizar la operación remota de sus plantas hidroeléctricas.

1.5 Enfoque de la solución

El proyecto consiste en desarrollar un prototipo de una estación meteorológica compuesta por un pluviómetro, un anemómetro, un termómetro y un barómetro. La estación meteorológica debe ser capaz de almacenar y transmitir las variables meteorológicas al Centro de Control de las plantas hidroeléctricas para generar una base de datos integrada al sistema SCADA administrado con una plataforma de SURVALENT TECHNOLOGY. En la figura 1.2 se muestra el diagrama general del sistema a desarrollar.

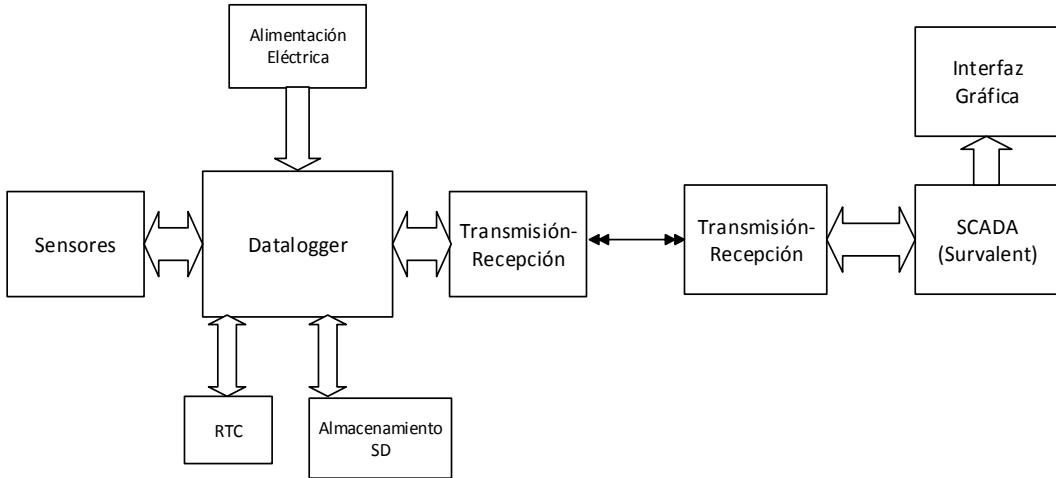


Figura 1.2 Diagrama general de la estación meteorológica

Cuando se desea llevar un registro de diferentes variables para analizar su comportamiento a través del tiempo se requiere contar con un dispositivo registrador de datos, conocido como datalogger, el cual permite almacenar un historial de la magnitud de cada variable con un orden cronológico.

A futuro, COOPELESCA pretende recolectar información mediante varias estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes lugares. Esto obliga a contemplar posibilidades para la transmisión de datos hacia el Centro de Control.

En el contexto de este proyecto, se establece la transmisión mediante un enlace inalámbrico por radio-frecuencia y transmisión de información a través de la red de datos (fibra óptica) que ya tiene la cooperativa.

De la misma manera que se contemplan opciones para transmisión de datos, cada estación meteorológica que se construya a futuro debe también considerar opciones de alimentación eléctrica.

En este proyecto, la ubicación de pruebas se encuentra dentro de la zona de servicio eléctrico de COOPELESCA, por lo que la alimentación se obtiene directamente de la red eléctrica, y se complementa con una batería que respalde la operación de la estación. Sin embargo, el diseño prototípico de la estación permite

alimentación a través de un panel solar como método alternativo para ubicaciones remotas.

Uno de los requisitos primordiales que COOPELESCA ha indicado es la integración de la información recolectada en la estación meteorológica remota directamente con su plataforma SCADA.

Esta plataforma es fabricada por SURVALENT TECHNOLOGY y soporta recepción de datos a través de protocolos abiertos como MODBUS y DNP3.

Para el prototipo se consideró el protocolo MODBUS, dado que se ajusta a los requerimientos de la plataforma SURVALENT TECHNOLOGY.

Capítulo 2 Meta y objetivos

2.1 Meta

Obtener información meteorológica oportuna de las diferentes cuencas que faciliten las estimaciones y operación de las centrales hidroeléctricas Chocosuelas y Cubujuquí.

2.2 Objetivo general

Construir un sistema electrónico capaz de medir variables meteorológicas, transportar los valores medidos a través de un enlace de datos y presentar la información en el sistema centralizado de control de generación y distribución eléctrica de COOPELESCA.

Indicadores:

1. Se logra construir un prototipo funcional electrónico capaz de medir y almacenar variables.
2. Se logra enlazar el prototipo electrónico con un receptor en el Centro de Control.
3. Se logra comunicar información en tiempo real desde el prototipo hasta el Centro de Control.
4. Se logra desplegar la información transportada en la interfaz de software del sistema existente de control y gestión

2.3 Objetivos específicos

- a. Diseñar e implementar un módulo de adquisición de variables eléctricas procedentes de los sensores meteorológicos.

Indicador: El sistema electrónico es capaz de interpretar las señales eléctricas producidas por el pluviómetro, el anemómetro, el barómetro, el termómetro y el sensor de humedad relativa.

b. Diseñar un módulo de control y procesamiento de las variables meteorológicas.

Indicador: Tiempo menor a los 2 segundos entre cada procesamiento de las variables meteorológicas por periodo.

c. Diseñar un módulo que permita una comunicación bidireccional por radio frecuencia entre la estación meteorológica y el Centro de Control.

Indicador: Durante un periodo de monitoreo de al menos 1 semana, el enlace de datos debe mantenerse operando normalmente y entregando información relacionada con las mediciones meteorológicas.

d. Diseñar una interfaz gráfica integrada al sistema de control automático de la Cooperativa.

Indicadores:

1. El software cumple con los requerimientos especificados en el SRS⁴ (ver apéndice 1).
2. El usuario final avala la solución de software según lo indicado en el formulario de aceptación. (ver apéndice 2)

e. Construir un prototipo del sistema para verificar su funcionamiento.

Indicador: Durante un tiempo de monitoreo de al menos 2 semanas, el prototipo debe mantenerse operando y sin reportar fallas.

⁴ Software requirements specification

Capítulo 3 Marco teórico

3.1 Meteorología y climatología

El estudio de la atmósfera a través del tiempo se ha dividido en dos principales áreas, meteorología y climatología.

La meteorología se puede definir como el uso de la física clásica de Newton en la atmósfera, en ella se estudian todos los fenómenos derivados de los movimientos y cambios de temperatura de las masas de aire (viento, nubes, huracanes, nieve, olas de calor entre otros fenómenos) [25].

La climatología se encarga de documentar, analizar y explicar las variaciones de las distintas variables meteorológicas en un determinado espacio geográfico y escala de tiempo (mensual, anual, estacional...) que permiten caracterizar el clima de una región [25].

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el clima es *el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizadas por los estados y la evolución del tiempo, a lo largo de un periodo suficientemente largo y de un dominio espacial determinado* [25].

Conocer el clima de una región geográfica y poder aproximar una predicción de su comportamiento tiene muchas aplicaciones, ya que permite planificar cosechas, cultivos, construcción y otras actividades humanas [7].

Para lograr una predicción más acertada del clima (y prepararse ante los posibles eventos), se debe contar con mecanismos que permitan una medición confiable de las principales variables atmosféricas:

3.2 Principales variables atmosféricas

3.2.1 Presión atmosférica

La presión atmosférica es la fuerza ejercida por unidad de área por el peso de la columna de atmósfera ubicada encima de un punto determinado, por lo su variación está directamente relacionada a la altitud, sin embargo dos puntos geográficos ubicados a la misma altura pueden presentar presiones atmosféricas distintas a causa de la temperatura, la cual provoca desplazamientos de grandes masas de aire seco y húmedo, por esta razón, para poder hacer comparaciones válidas de lugares distintos, es necesario referirlas a un nivel común, típicamente el nivel del mar, en donde se establece que la presión atmosférica a nivel del mar corresponde a una atmósfera (atm) [30].

Algunos instrumentos miden la presión atmosférica en mmHg (milímetros de mercurio), “atmósferas” o Pascales, sin embargo en meteorología, la forma más común de medirla es usando hPa. Para este proyecto se utilizarán las unidades de hPa.

3.2.2 Viento

Una diferencia de presión atmosférica entre 2 puntos genera un desplazamiento del aire. El aire en movimiento es lo que conocemos como viento, y físicamente está representado por un vector, ya que tiene una magnitud (velocidad del viento) y una dirección.

En meteorología se mide la velocidad del viento con un anemómetro, un instrumento típicamente giratorio impulsado por la fuerza del viento, de manera que a mayor velocidad del viento, más veloz será el giro del anemómetro.

Comúnmente el anemómetro incluye una veleta, que es simplemente un pequeño plano móvil que se orienta con la dirección del viento, lo que permite identificar el punto cardinal hacia el que se dirige el flujo de aire.

Con ambos instrumentos juntos se puede definir la velocidad en km/h y dirección del vector viento en grados °.

3.2.3 Humedad

La atmósfera está formada por una serie de gases en proporciones constantes, aire seco, y vapor de agua, este último compuesto es el que representa mayor variabilidad durante el día y de un lugar a otro, afectado principalmente por la temperatura ambiente, cuanto más caliente es una masa de aire⁵, mayor cantidad de vapor de agua puede acumular, de manera opuesta, a bajas temperaturas puede almacenar menos cantidad de vapor de agua [30].

La humedad se define como la cantidad de vapor de agua presente en el aire, La Humedad relativa: es uno de los índices más utilizados en meteorología, se expresa en porcentajes de la masa m_v de vapor de agua contenido en un volumen dado de aire y la masa m_{vs} de vapor de agua que contendría ese mismo volumen si estuviera saturado [30].

$$h = \frac{m_v}{m_{vs}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Si la humedad relativa es menor a 100% significa que el aire no está saturado, en otras palabras, no hay precipitaciones (lluvia, rocío, niebla).

Conforme se acerca a 100%, significa que aumenta la humedad en el aire, y que por ende, las probabilidades de experimentar precipitaciones aumentan.

Cuando existen precipitaciones, el aire presenta saturación de humedad, por lo que el índice relativo se ubica por encima de 100.

⁵ Una masa de aire es un volumen muy grande de aire con una temperatura y humedad prácticamente homogénea.

3.2.4 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que representa el grado o nivel del calor de los cuerpos o del medio que los rodea, la temperatura ambiente se va a ver influenciado por factores como [30]:

- Insolación: Corresponde a la cantidad de radiación solar que llega a un determinado punto de la tierra, el cual varía según el ángulo de incidencia de los rayos del sol.
- Excentricidad de la órbita: el planeta Tierra al tener una órbita elíptica, cuenta con dos puntos donde la distancia de la tierra con respecto al sol es máxima (afelio) y mínima (perihelio).
- La atmósfera: Dependiendo de la transparencia y el espesor de la capa atmosférica en un punto determinado existirá una atenuación de los rayos solares que caen sobre sobre dicho punto.

Además de las anteriores, existen otras variables que afectan la temperatura en un determinado lugar, por ejemplo:

- La composición del suelo y su capacidad para almacenar calor.
- Las condiciones del clima y el grosor de la capa atmosférica
- La hora del día (evidentemente en horas de la noche la temperatura descende)
- Vegetación y producción de gases de efecto invernadero.

Las escalas normalmente utilizadas para medir temperatura ambiente son la Celsius y la Farenheit. En el contexto de este proyecto, solamente se utilizará la escala Celsius.

3.2.5 Precipitación

La condensación es el cambio de estado gaseoso a líquido, en la atmósfera este proceso ocurre cuando grandes masas de aire caliente (con gran capacidad de almacenamiento de vapor de agua) ascienden a causa de convección en aire inestable, por presencia de montañas o convergencia asociada con ciclones, posteriormente se enfrian, provocando la condensación del vapor de agua que se libera en forma de pequeñas gotas [30].

Dependiendo de las condiciones atmosféricas, las gotas de agua que se producen a partir de la condensación se convierten en lluvia, rocío, neblina, granizo o nieve, que son las formas comunes de precipitación [15].

En Costa Rica, por su posición en los trópicos, la forma de precipitación dominante es la lluvia, seguida por el rocío y la neblina.

No existe registro de nieve, por lo que se considera improbable, y el granizo, aunque si se ha registrado, es un fenómeno aislado y muy poco común.

La medición de las precipitaciones se hace mediante un pluviómetro, el cual estima la altura, en milímetros, de una columna de agua por unidad de superficie [15].

3.3 Sensores Meteorológicos

Un sensor es un dispositivo que produce una señal en respuesta a la detección o medida de una propiedad física, como posición, fuerza, torque, presión, temperatura, humedad, velocidad, aceleración o vibración entre muchas otras [27].

Para escoger un sensor es necesario tomar en cuenta las siguientes características [27]:

- **Exactitud:** Debe poder detectar el valor verdadero de la variable sin errores sistemáticos. Sobre varias mediciones, la desviación de los errores cometidos debe tender idealmente a cero.

- **Precisión:** Una medida será más precisa que otra si los posibles errores aleatorios en la medición son menores.
- **Rango de funcionamiento:** Debe tener un amplio rango de funcionamiento, es decir, debe ser capaz de medir de manera exacta y precisa un amplio abanico de valores de la magnitud correspondiente.
- **Velocidad de respuesta:** Debe responder a los cambios de la variable a medir en un tiempo mínimo Lo ideal sería que la respuesta fuera instantánea.
- **Calibración:** Es el proceso mediante el cual se establece la relación entre la variable medida y la señal de salida que produce el sensor. La calibración debe poder realizarse de manera sencilla y además el sensor no debe precisar una recalibración frecuente.
- **Fiabilidad:** Debe ser fiable, es decir, no debe estar sujeto a fallos inesperados durante su funcionamiento.

A continuación se detallan las principales características y funcionamiento de los sensores meteorológicos seleccionados para la estación meteorológica.

3.3.1 Barómetro BMP085

El sensor BMP05 fabricado por Bosch es un sensor digital de alta precisión, de bajo consumo de potencia y bajo costo.

Funciona mediante una pequeña ventana sobre el encapsulado que estima la deformación que produce el peso del aire sobre una membrana sensitiva piezoresistiva, como se aprecia en la figura 3.2, haciendo que la resistencia varíe en función de la deformación de la membrana. Al utilizar el encapsulado CLLC ofrece una presentación muy compacta. A continuación en la figura 3.1 se observa el sensor BMP085 integrado a una tarjeta de Sparkfun⁶.

⁶ Tienda virtual de componentes electrónicos con sede en Estados Unidos, <https://www.sparkfun.com/>

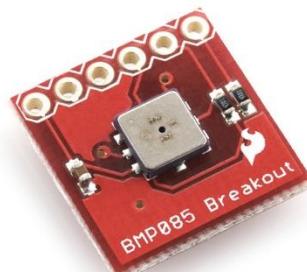


Figura 3.1 Sensor de presión BMP085 de BOSCH.

Tabla 3.1 Principales Características del sensor BMP085

Descripción	
Rango de presión	300hPa – 1100hPa (-500m – +9000m)
Alimentación eléctrica	1.8VDC – 3.6VDC
Encapsulado CLCC	
• Ultra delgado	1.2mm
• Ancho	5.0mm
• Largo	5.0mm
Bajo consumo de potencia	18µW en operación estándar
Bajo ruido	
• Modo bajo consumo de potencia	0.06hPa (0.5m)
• Modo alta precisión	0.03hPa (0.25m)
Comunicación serial I ² C	Frecuencia máxima 3.4MHz
Bajo tiempo de conversión	7.5ms máximo
Sensor de temperatura incluido	-35°C – +80 °C
Libre de plomo y halógenos	—
No requiere reloj externo	—

El sensor del BMP085 se basa en el efecto piezoresistivo⁷, está fabricado con tecnología MEMS⁸ y está constituido por una delgada membrana de silicio que cubre una cavidad sellada, unida en las cuatro caras por material piezoresistivo como se observa en la figura 3.2, cuando la presión atmosférica supera a la presión dentro de la cavidad, deforma la membrana y esta aplica una fuerza sobre los materiales piezoresistivos, alterando su resistencia eléctrica [10].

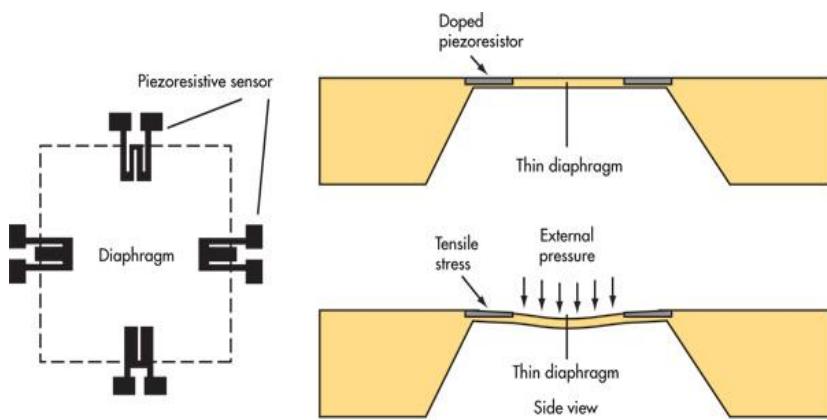


Figura 3.2 Esquema de un sensor de presión piezoresistivo fabricado con tecnología MEMS.

El BMP085 cuenta con una memoria E²PROM de 176bits, distribuida en 11 palabras, donde se almacenan los coeficientes de calibración mostrados en la tabla 3.2 [6].

⁷ Propiedad de algunos conductores y semiconductores de variar su resistencia eléctrica al estar sometidos a una fuerza mecánica.

⁸ Sistemas microelectromecánicos, es una reciente tecnología que integra circuitos microelectrónicos y estructuras mecánicas en un mismo chip, lo cual reduce significativamente el tamaño y el costo del componente. Más información en: <http://www.mems.metu.edu.tr/>

Tabla 3.2 Coeficientes de calibración y su distribución física en la memoria E²PROM del BMP085.

Coeficiente	Dirección de Registro BMP085	
	MSB	LSB
AC1	0xAA	0xAB
AC2	0xAC	0xAD
AC3	0xAE	0xAF
AC4	0XB0	0XB1
AC5	0XB2	0XB3
AC6	0XB4	0XB5
B1	0XB6	0XB7
B2	0XB8	0XB9
MB	0xBA	0xBB
MC	0xBC	0xBD
MD	0xBE	0xBF

El BMP085 está diseñado para conectarse directamente con un microcontrolador mediante el protocolo serial I²C, posee una unidad de control lógico propia para la comunicación externa, adquisición de datos del sensor piezoresistivo y lectura-escritura de su memoria E²PROM, en donde se almacenan las variables de calibración, como se observa en la figura 3.3, la dirección física del dispositivo varía en el bit menos significativo según sea la función que se desea hacer, 0xEE para escribir y 0xEF para leer [6].

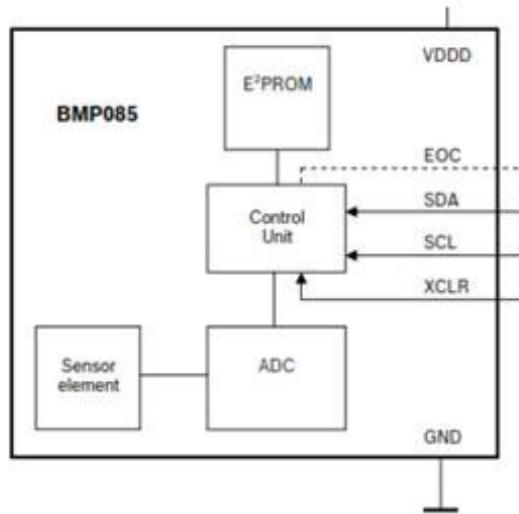


Figura 3.3 Diagrama de bloques del sensor BMP085

Para obtener las mediciones de presión atmosférica y temperatura del sensor BMP085 es necesario seguir el diagrama de flujo de la figura 3.4, a través de la presión es posible obtener la altitud mediante la ecuación 2 [6].

$$\text{altitud (m)} = 44330 \times \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right)$$
Ecuación 2

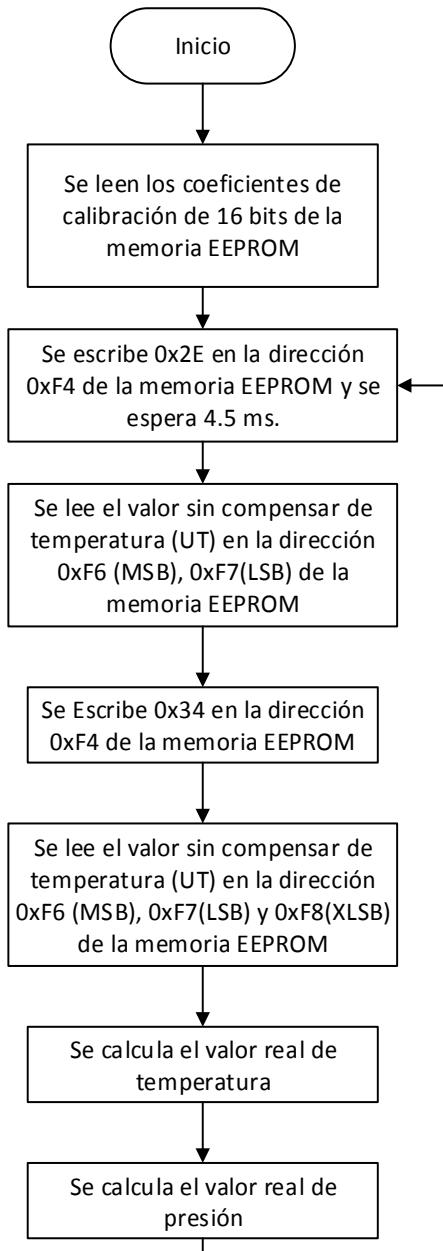


Figura 3.4 Diagrama de flujo para obtener valores de temperatura y presión con el sensor BMP085.

3.3.2 Termómetro y sensor de humedad relativa RHT03

El sensor RHT03 desarrollado por la compañía china MaxDetect representado en la figura 3.5, es un dispositivo compacto de bajo consumo de potencia que destaca por su bajo costo y gran desempeño, cuenta con sensor de tipo capacitivo para medir la humedad relativa y una resistencia variable con la temperatura, conocido típicamente como termistor, en la figura 3.6 se pueden observar ambos sensores [14].

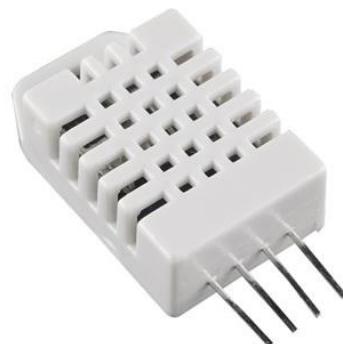


Figura 3.5 Dispositivo de medición de temperatura y humedad RHT03 de MaxDetect.



Figura 3.6 Sensores utilizados por el dispositivo RHT03, a la izquierda el sensor capacitivo de humedad y a la derecha el termistor de $10k\Omega$.

Los sensores de humedad de tipo capacitivo cuentan con una delgada capa de un polímero muy sensible a las moléculas de agua suspendidas en el aire, el cual varía su permitividad⁹ dependiendo de la cantidad de vapor de agua contenido en el ambiente. En la figura 3.7 se detalla la composición de un sensor de humedad capacitivo.

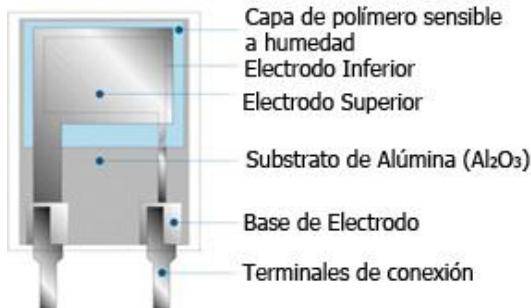


Figura 3.7 Composición de un sensor de humedad de tipo capacitivo.

El dispositivo cuenta con coeficientes de calibración, por lo que no requiere ajustes al momento de utilizarlo, como se observa en la figura 3.8, incluye una unidad de control y conversor analógico-digital con resolución de 8 bits, por otra parte para la comunicación utiliza el protocolo exclusivo MaxDetect 1-wire bus, el cual permite la transmisión de datos hasta 100 metros por un solo cable, en la tabla 3.3 se resumen sus principales características [14].

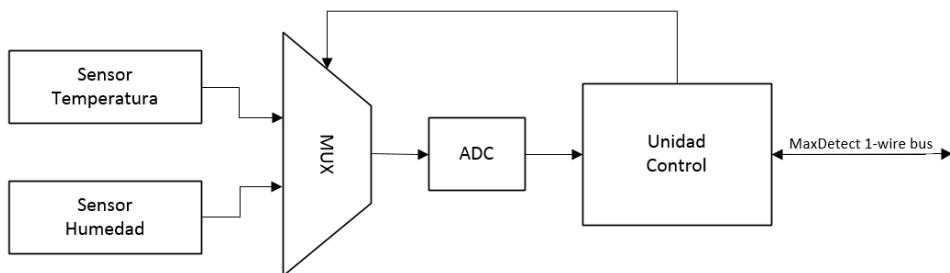


Figura 3.8 Diagrama de bloques del dispositivo RHT03 de MaxDetect.

⁹ La permitividad conocida como constante dieléctrica, es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

Tabla 3.3 Principales características del sensor RTH03

Descripción	
Alimentación eléctrica	3.3VDC – 5VDC
Tipo de salida	Digital (1-wire bus Maxdetect)
Rango de Operación	
• Humedad	0 – 100% RH
• Temperatura	-40°C – +80°C
Tipo de Sensor	
• Humedad	Capacitor con polímeros de humedad
• Temperatura	baristor
Resolución	
• Humedad	0.1% RH
• Temperatura	0.1 °C
Precisión	
• Humedad	+/- 2% RH
• Temperatura	+/- 0.5 °C
Gran estabilidad	+/- 0.5 RH año
Fácil remplazo	

La comunicación por medio de un cable de este dispositivo utiliza el protocolo exclusivo MaxDetect 1-wire bus, el cual requiere ciertas consideraciones que se detallan a continuación, para la explicación se le llamará maestro al microcontrolador que solicita los datos al sensor [14].

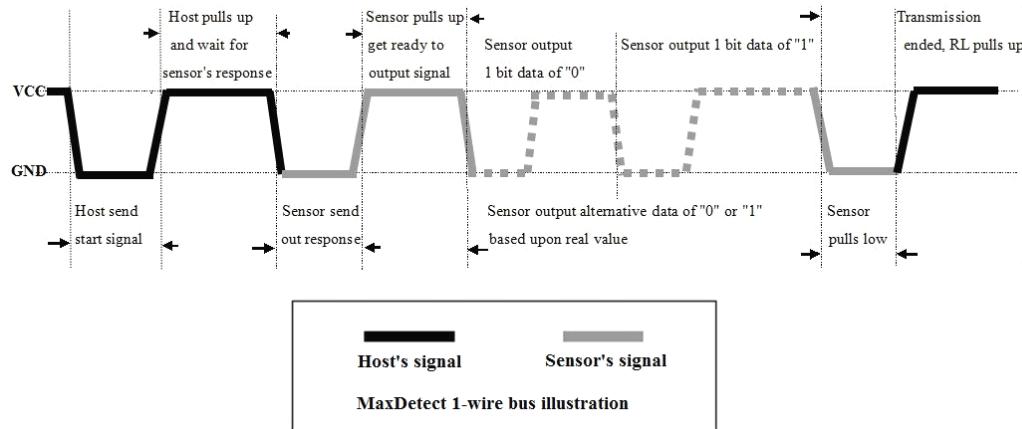


Figura 3.9 Protocolo de comunicación 1-wire de MaxDetect.

Para iniciar la comunicación como se observa en las figura 3.9 y figura 3.10, el maestro pone el canal en bajo por un intervalo de 1 a 10ms para asegurar que el sensor detecte la señal, luego lo pasa a alto a la espera de que sensor responda, aproximadamente 40µs, cuando el sensor detecta la señal de inicio del maestro, pasa el canal a bajo por 80µs como señal de respuesta, durante ese tiempo el sensor se prepara para el realizar el envío de datos [14].

Posteriormente el sensor pone en nivel alto el canal durante otros 80µs e inicia con el envío de datos al maestro.

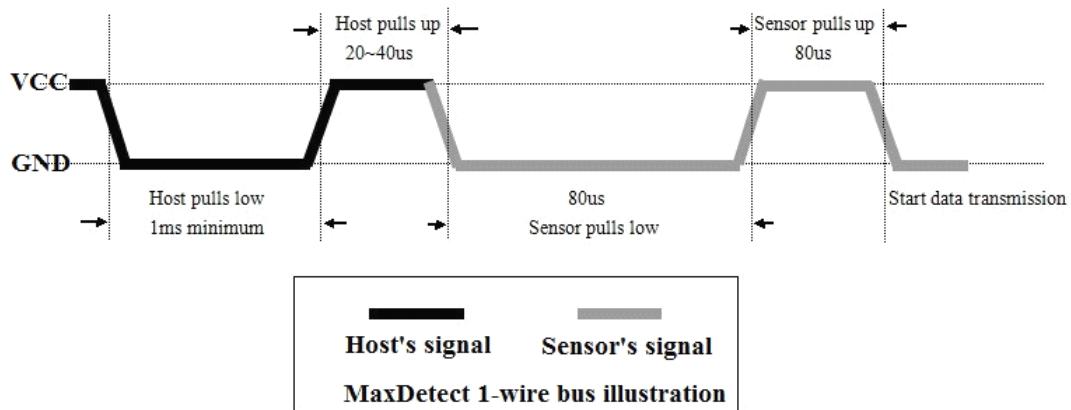


Figura 3.10 Tiempos de las señales en el protocolo 1-wire de MaxDetect.

Durante el envío de datos, cada bit comienza en nivel bajo con un lapso de 50μs, luego pasa el canal a nivel alto con una duración que depende del valor del bit, cuando se trata de un valor lógico 0 el canal permanecerá en nivel alto durante 26 o 28μs, y para un valor lógico de 1, el canal estará en alto por 70μs. en las figura 3.11 y figura 3.12 se muestra el comportamiento del canal durante el envío de un bit con valor lógico 0 y 1 respectivamente [14].

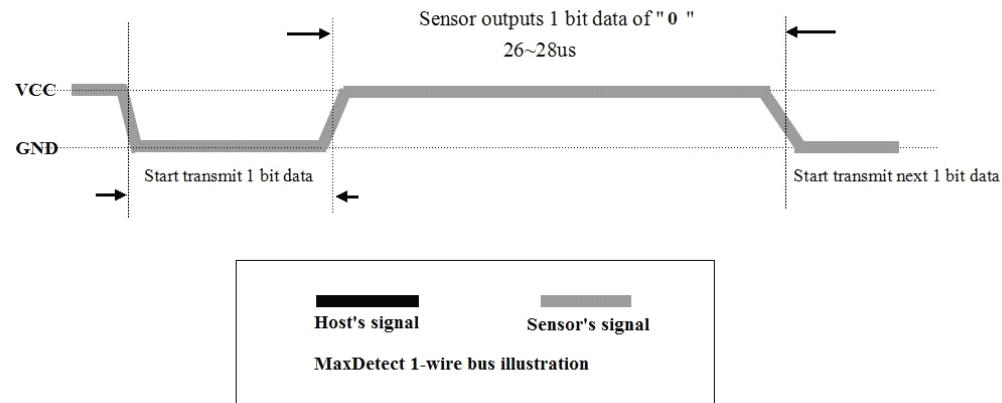


Figura 3.11 Envío de un bit con valor lógico 0 mediante el protocolo 1-wire de MaxDetect.

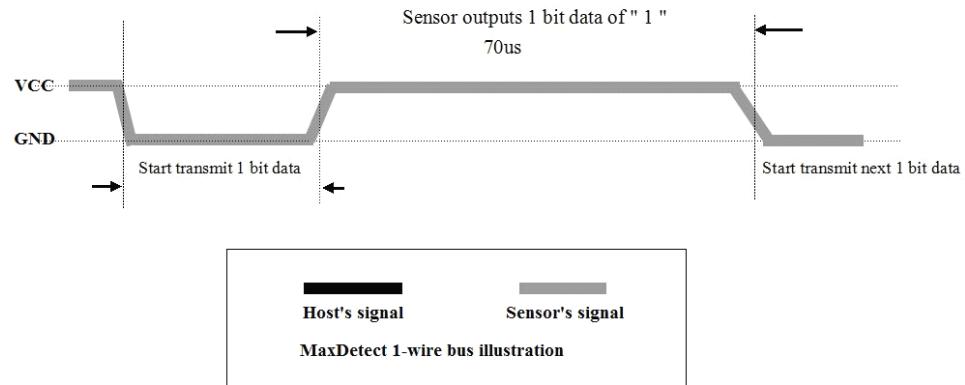


Figura 3.12 Envío de un bit con valor lógico 1 mediante el protocolo 1-wire de MaxDetect.

3.3.3 Anemómetro Ultimeter Pro

El anemómetro Ultimeter Pro de la compañía Peet Bros representado en figura 3.13 , es un dispositivo de alta calidad, fabricado en policarbonato resistente a los rayos UV y partes metálicas de acero inoxidable, cuenta con copas de 6.6cm de diámetro, las cuales ofrecen 34cm^2 de área transversal, muy superior a otros anemómetros existentes en el mercado, lo que le permite tener una alta precisión en la velocidad del viento (0.1m/s), así como una veleta de 32.8cm de largo y 8.9cm de alto, la cual ofrece una rápida respuesta en cambios de la dirección del viento [17].



Figura 3.13 Anemómetro Ultimeter de Peet Bros.

Su funcionamiento depende de dos reed switch¹⁰ o interruptores de lengüeta como se observa en la figura 3.14. Los cuales interactúan con los imanes colocados en las partes móviles de la unidad, abriendo y cerrando los contactos en relación con las vueltas que den las copas y la posición de la veleta [17].

¹⁰ Interruptor eléctrico activado por un campo magnético, inventado por W. B. Elwood en 1936.

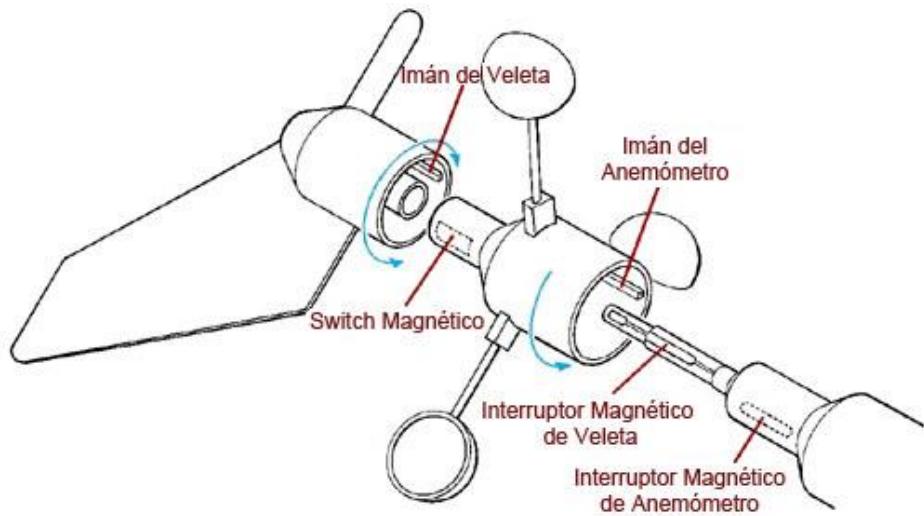


Figura 3.14 Partes del anemómetro Ultimeter Pro de Peet Bros.

Los reed switch se componen de dos placas metálicas, aisladas por un gas interno presurizado contenido en una cápsula de vidrio, en donde los contactos se abren o cierran al estar bajo influencia de un campo magnético. En la figura 3.15 se detallan las partes de este interruptor magnético.

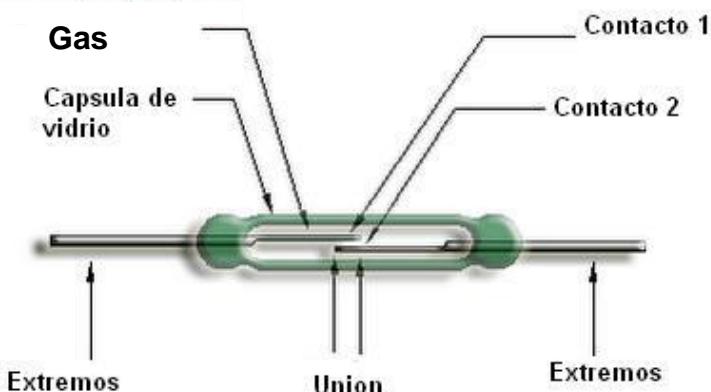


Figura 3.15 Composición de un interruptor de lengüeta.

3.3.4 Pluviómetro Ultimeter Pro

El pluviómetro Ultimeter Pro de la compañía Peet Bros representado en la figura 3.16, es un dispositivo digital, que ofrece una alta precisión y confiabilidad en las mediciones a lo largo del tiempo, debido a que no requiere calibración y no tiene partes móviles. Está fabricado con policarbonato resistente a los rayos UV y el circuito impreso se encuentran recubierto por una capa de barniz para protegerlo de insectos, humedad y polvo [20].

Este sensor opera bajo el principio de conteo de gotas por caída, la alta precisión de las mediciones se debe al embudo parabólico exclusivo del fabricante el cual atrapa las gotas de lluvia sin permitir salpicaduras, el embudo deja precipitar gotas que equivalen a 0,001 pulgadas de lluvia, el circuito electrónico dispone de un contador de décadas por lo que reporta cada 0.01 pulgadas de lluvia [19].



Figura 3.16 Pluviómetro Ultimeter Pro de Peet Bros

3.4 Datalogger

Un datalogger es un dispositivo electrónico encargado de obtener mediciones de diversas magnitudes y registrarlas de manera cronológica. Dichas magnitudes pueden venir de sensores u otras fuentes de información. Luego cada medición, se almacenan los datos en una memoria junto con su respectiva fecha u hora.

Los datalogger se utilizan en procesos donde se desea estudiar las características de variación a través del tiempo de una o un grupo de variables determinadas. Su aplicación va desde el ámbito industrial, doméstico o experimentos de laboratorio.

En general los datalogger son dispositivos programables pequeños y alimentados VDC, están conformados por un microprocesador, un reloj de tiempo real (RTC) para mantener la fecha y hora en las mediciones, una memoria para el almacenamiento de los datos obtenidos de los sensores y puertos de comunicación para extraer los datos registrados, típicamente USB o RS232 [24].

3.5 Entorno Arduino

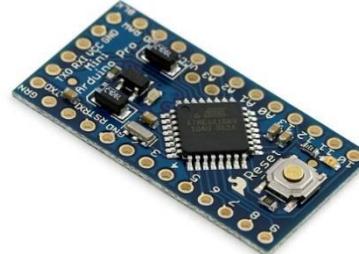
Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos [13].

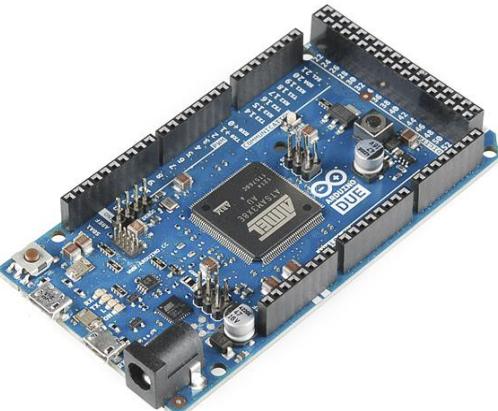
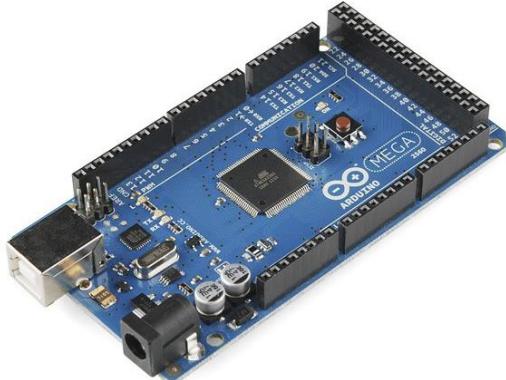
La plataforma Arduino nació como un proyecto educativo en el año 2005, desarrollado por el profesor Massimo Banzi con ayuda de estudiantes como Hernando Barragan quien desarrolló la plataforma de programación Wiring¹¹ en el Instituto de diseño interactivo IVREA en Italia [13].

¹¹ Sistema de programación multiplataforma para microcontroladores de fabricantes como Atmega, ARM, Microchip que vienen integrados en tarjetas de desarrollo.

En la actualidad Arduino es utilizado para fabricación de prototipos en diversas áreas, como sistemas de automatización, comunicaciones eléctricas, control automático entre otros. Reporta la venta de más 400 mil placas a nivel mundial (sin contar con las versiones clones o compatibles con el lenguaje), por lo que se considera el líder mundial de proyectos electrónicos DIY de las siglas en inglés de “Do It Yourself”. A continuación, en la tabla 3.4 se muestran las tarjetas de desarrollo ofrecidas por Arduino.

Tabla 3.4 Tarjetas de desarrollo de Arduino

Modelo	Diseño
Mini Light	 The image shows the Arduino Mini Light development board, which is a blue rectangular board with a central ATmega328 microcontroller. It features several pins, a small crystal oscillator, and a pushbutton. The word "ARDUINO" is printed on the board.
Pro Mini 328	 The image shows the Arduino Pro Mini 328 development board, which is a smaller blue rectangular board. It has a central ATmega328 microcontroller and various pins. The word "ARDUINO" is visible on the board.
Leonardo	 The image shows the Arduino Leonardo development board, which is a larger blue rectangular board. It has a central ATmega32U4 microcontroller and a USB port. The word "ARDUINO" is visible on the board.

Uno REV 3	
Due	
Mega 2560 R3	

3.5.1 Estructura

El ambiente de Arduino es de tipo IDE¹², programado en lenguaje Java y permite una comunicación con las tarjetas de desarrollo Arduino mediante puerto serial (USB) a través de la biblioteca RXTX de Java. En la figura 3.17 se muestra la ventana

¹² Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, está formado principalmente por un editor de código, un compilador y un constructor.

principal del programa, a continuación se explica brevemente la interfaz según los números de la figura [3]:

1. Verifica el código en búsqueda de errores.
2. Compila, construye y carga el programa en la tarjeta seleccionada.
3. Crea una nueva ventana para programar.
4. Abre archivos de programación previamente elaborados (en formato .ino).
5. Guarda el código de programación (en formato .ino).
6. Abre la ventana de la terminal serial (ver figura 3.18).
7. Muestra el tipo de tarjeta y el número de puerto en el que se encuentra conectada.
8. Muestra el estado en el que se encuentra trabajando el programa al utilizar los íconos 1 y 2, así como el despliegue de advertencias o errores encontrados en el código elaborado [3].

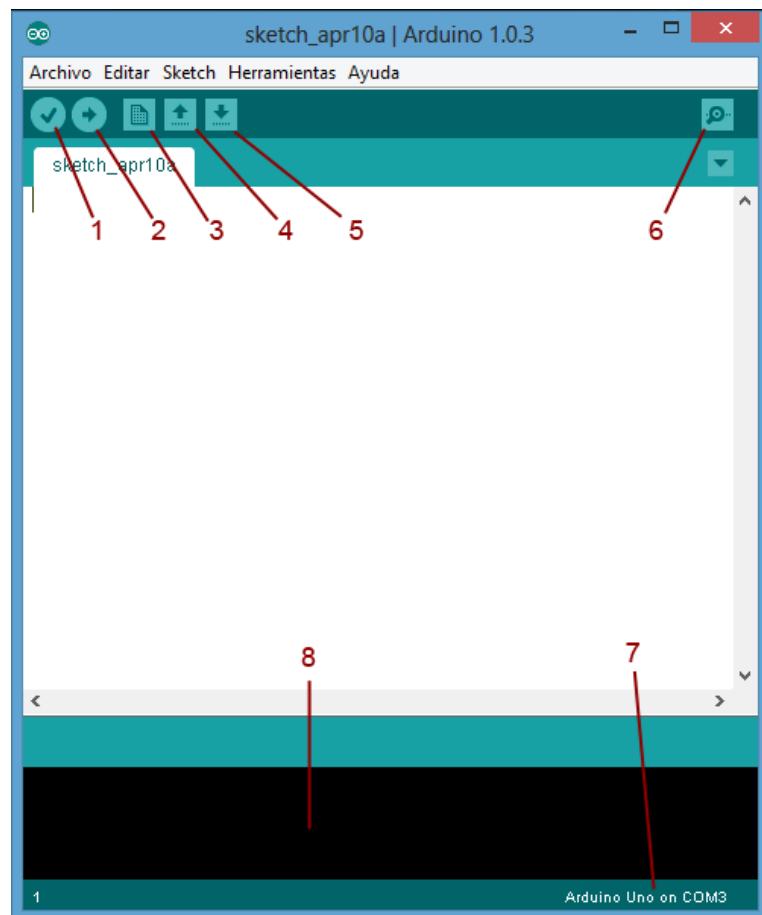


Figura 3.17 Interfaz gráfica 1.0.3 de la plataforma Arduino.

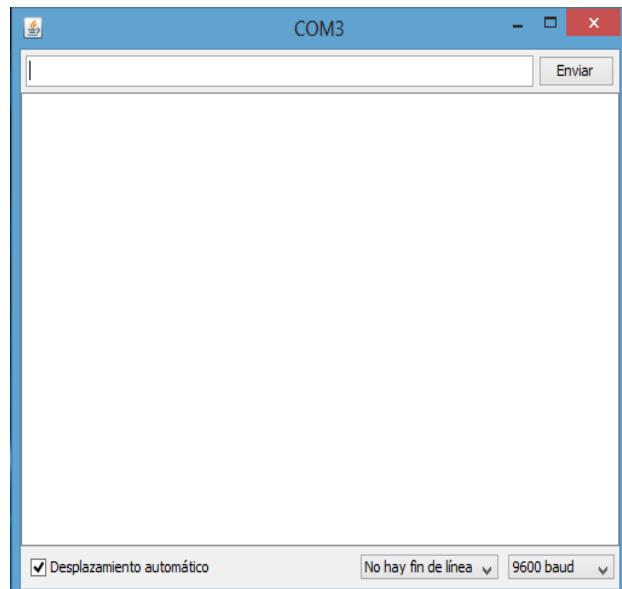


Figura 3.18 Interfaz serial de la plataforma Arduino.

3.5.2 Programación

Los programas hechos con Arduino se dividen en 3 principales partes, estructura, funciones y valores, que pueden ser constantes y variables. A continuación en las tabla 3.5, 3.6 y 3.7 se detallan dichas secciones [3]:

Tabla 3.5 Valores y conversiones de variables aceptados por Arduino.

Tipos de Datos	boolean, char, byte, int, unsigned int, long, unsigned long, float, double, string, array, void
Constantes	HIGH, LOW, INPUT, OUTPUT, TRUE, true, false
Conversiones	char(), byte(), int(), long(), float()

Tabla 3.6 Funciones básicas de Arduino.

Entradas-Salidas Digitales	pinMode() digitalWrite() digitalRead()
Entradas-Salidas Analógicas	analogRead() analogWrite() (PWM)
Entradas-Salidas Especiales	tone() noTone() shiftOut() pulseIn()
Tiempo	millis() micros() delay() delayMicroseconds()
Matemáticas	min() max() abs() constrain() map() pow() sq() sqrt()
Trigonometría	sin() cos() tan()
Números aleatorios	randomSeed() random()
Comunicación	Serial

Tabla 3.7 Estructuras de Arduino.

Principal	<i>setup()</i> <i>loop()</i>
Estructuras de control	<i>if</i> (comparador si-entonces) <i>if...else</i> (comparador si...sino) <i>for</i> (bucle con contador) <i>switch case</i> (comparador múltiple) <i>while</i> (ciclo por comparación booleana) <i>do... while</i> (bucle por comparación booleana) <i>break</i> (salida de bloque de código) <i>continue</i> (continuación en bloque de código) <i>return</i> (devuelve valor a programa)
Continuación tabla 3.7	
Sintaxis	$:$ (finalizar línea) $\{ \}$ (delimita operación) $//$ (comentarios en una línea) $/* */$ (comentarios en múltiples líneas)
Operadores aritméticos	$=$ (asignación) $+$ (suma) $-$ (resta) $*$ (multiplicación) $/$ (división) $\%$ (resto)
Operadores comparativos	$==$ (igual a) $!=$ (distinto de) $<$ (menor que) $>$ (mayor que) $<=$ (menor o igual que) $>=$ (mayor o igual que)
Operadores Booleanos	$ $ (or) $&&$ (and) $!$ (negación)

Continuación de tabla 3.7	
Operadores de composición	++ (<i>incremento</i>) -- (<i>resta</i>) +- (<i>composición suma</i>) -+ (<i>composición resta</i>) *= (<i>composición multiplicación</i>) /= (<i>composición división</i>)

Las bibliotecas de Arduino proporcionan funcionalidades adicionales a un sketch¹³, por ejemplo: al requerir una comunicación con protocolo I²C entre la tarjeta Arduino y otro dispositivo, simplemente se importa la librería Wire, la cual viene equipada con todos los comandos necesarios para lograr la comunicación. Para utilizar una de las tabla 3.8 en un sketch, se accede a la pestaña Sketch > Importar Librería.

En caso de necesitar una biblioteca adicional a las incluidas en el IDE de Arduino, agrupadas en la tabla 3.8, existen diversas bibliotecas desarrolladas por usuarios de Arduino con el fin de satisfacer necesidades de comunicación con otros dispositivos gracias a que es un lenguaje de código abierto. Para agregar una biblioteca al IDE de Arduino simplemente se pega la carpeta que incluye dicha biblioteca en la carpeta “libraries” y finalmente se reinicia el IDE de Arduino para que reconozca la biblioteca; para acceder a la biblioteca, como se mencionó anteriormente, se accede a la pestaña Sketch > Importar Librería [3].

¹³ Nombre que utiliza el ambiente Arduino para proyectos elaborados por los usuarios.

Tabla 3.8 Bibliotecas básicas de Arduino.

EEPROM	Para leer y escribir en memorias "permanentes".
Ethernet	Para conectar a internet usando el Ethernet Shield.
Firmata	Para comunicarse con aplicaciones en la computadora usando un protocolo estándar Serial.
LiquidCrystal	Para controlar displays de cristal líquido (LCD).
Servo	Para controlar servomotores.
SoftwareSerial	Para la comunicación serial de cualquier pin digital.
Stepper	Para controlar motores paso a paso (Stepper motors).
Wire	Interfaz de dos cables, TWI/I2C, para enviar y recibir datos a través de una red de dispositivos y sensores.

3.6 Comunicaciones Eléctricas

3.6.1 Protocolos de comunicación

i. I²C

Inter Integrated Circuits desarrollado por Phillips Semiconductors a inicios de los años 80, más conocido como I²C, es un protocolo de comunicación serial síncrono que cuenta con dos líneas. Las especificaciones de software y hardware del protocolo I²C están descritas en el I²C-bus specification and user manual¹⁴.

El protocolo I²C permite comunicar múltiples dispositivos de forma paralela a las líneas como se observa en la figura 3.19. Las transferencias de datos siempre se

¹⁴ http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf

realizan entre dos dispositivos a la vez y en una relación maestro – esclavo. Los dispositivos maestros son normalmente los microcontroladores y los dispositivos esclavos pueden ser memorias, conversores DAC y ADC, controladores de LCD y sensores entre otros dispositivos.

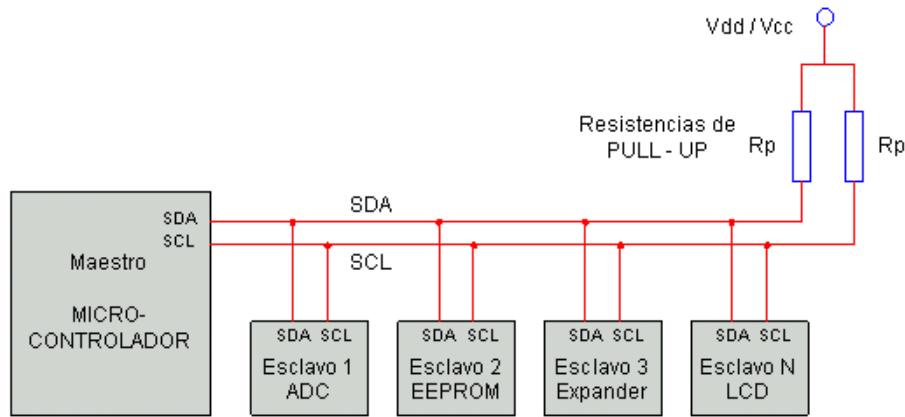


Figura 3.19 Ejemplo de conexión de dispositivos mediante protocolo I²C.

Las transferencias de datos se llevan a cabo mediante dos líneas: línea serial de datos SDA y línea serial de reloj SCL. Ambas son bidireccionales. SDA se encarga de conducir los datos entre el dispositivo maestro y los esclavos. SCL es la señal de reloj que sincroniza los dispositivos que se están comunicando.

El dispositivo maestro (microcontrolador) es quien siempre tiene la iniciativa de la comunicación: el maestro genera la señal de reloj y controla cuando se transmiten o reciben los datos.

Puede haber varios esclavos en la red I²C, pero el maestro solo se comunica con uno a la vez. Por eso cada dispositivo esclavo debe ser identificado por una dirección única.

ii. MODBUS TCP/IP

MODBUS es un protocolo abierto desarrollado por la compañía Modicon en el año 1979 para la comunicación con sus PLC's. sin embargo, gracias a su fácil implementación y ser de especificación abierta, hoy en día es ampliamente utilizado por diversos equipos como: HMI, RTU, sensores, actuadores remotos y controladores entre muchos otros [28].

Dentro de sus principales características cabe mencionar:

- Los dispositivos que intervienen en una comunicación con protocolo MODBUS, se clasifican en maestros y esclavos.
- El protocolo especifica el formato de la trama, secuencia y control de errores.
- Cada esclavo tiene asignada una dirección estática.
- Existen 2 variantes del protocolo, RTU y TPC/IP.

A continuación, en la tabla 3.9, se muestran las funciones establecidas para el protocolo MODBUS.[28]

Tabla 3.9 Funciones del protocolo MODBUS.

Función	Acción	Significado
01	Leer coils ¹⁵	Obtiene el estado actual (1 o 0) de una o varias coils.
02	Leer entradas	Obtiene el estado actual (1 o 0) de una o varias entradas lógicas.
03	Leer registros	Obtiene el valor binario de uno o varios registros de almacenamiento.
04	Leer registros	Obtiene el valor binario de uno o varios registros de entrada.
05	Escribir bobina	Fuerza el estado de una coil.

¹⁵ Nombre con el que se le conoce a las variables digitales de 1 bit en MODBUS.

continuación tabla 3.9

06	Escribir registro	Escribe el valor binario de un registro de almacenamiento.
15	Escribir coils	Fuerza el estado de un grupo de coils.
16	Escribir registros	Escribe el valor binario de un grupo de registros de almacenamiento.

En la figura 3.20, se observa una comunicación entre dispositivos configurados como maestro-esclavo, en donde inicialmente el dispositivo maestro envía la dirección del esclavo con el que desea comunicarse, después la función que desea que realice el esclavo, la cantidad de registros o bobinas que va a leer o si fuera el caso de escribir, los datos que desea almacenar en el esclavo, y para finalizar, un segmento para control de errores.[28]

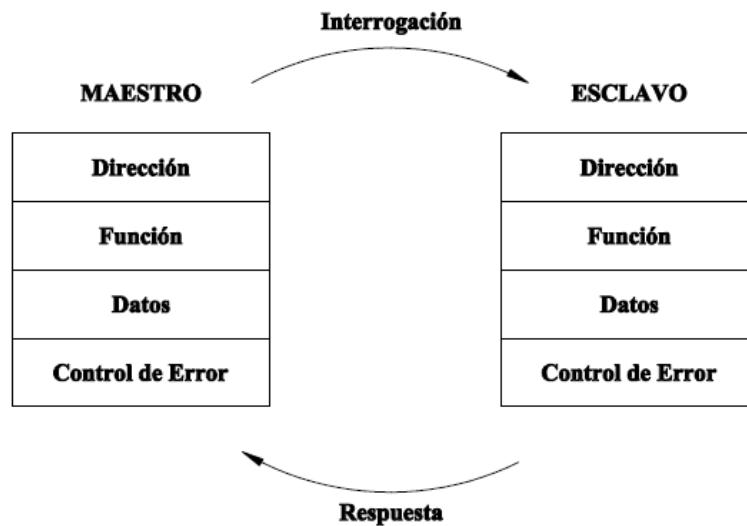


Figura 3.20 Modo de comunicación entre dispositivos con protocolo MODBUS.

Posteriormente a recibir la información del maestro, el dispositivo esclavo devolverá su dirección, la función que le solicitaron realizar, y los datos solicitados, ordenados de forma ascendente al número de registro o bobina solicitado, finalmente el segmento de control de errores.

A continuación un ejemplo de comunicación utilizando el protocolo MODBUS. En la tabla 3.10, el maestro solicita los datos de un registro de almacenamiento, mientras que en la tabla 3.11, el esclavo devuelve los valores de los registros solicitados.[28]

Tabla 3.10 Ejemplo de solicitud del maestro utilizando protocolo MODBUS.

11	03	00	6B	00	03	7E
		alto	bajo	bajo	alto	
ID esclavo	función	Registros de comienzo		Cantidad registros		Control de error

Tabla 3.11 Respuesta de unidad esclavo utilizando protocolo MODBUS.

11	03	06	02	2B	00	00	00	64	55
			alto	bajo	alto	bajo	alto	bajo	
ID esclavo	función	Cuenta de bytes	Registro 40108		Registro 40109		Registro 40110		Control de error

Para el proyecto se utilizará la función 03 “leer registros de almacenamiento” mediante el protocolo MODBUS TCP/IP.

3.7 Sistema SCADA

SCADA, de sus siglas en inglés de “Supervisory Control and Data Acquisition” es un software diseñado para funcionar como plataforma de comunicación entre unidades remotas (RTU) o dispositivos de campo y un Centro de Control (MTU A continuación, en la figura 3.21 se muestra una estructura básica de un sistema SCADA. [22]

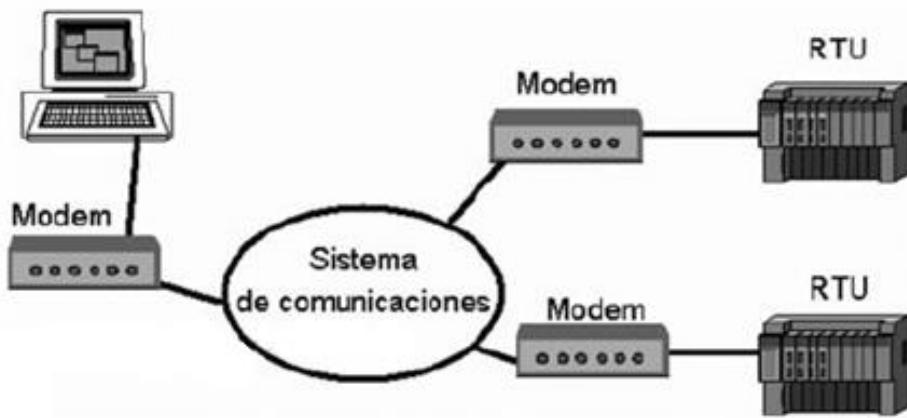


Figura 3.21 Estructura básica de un sistema SCADA

La estructura funcional de un sistema de visualización y adquisición de datos está basado en la estructura maestro-esclavo. La unidad de control (master) se comunica con el resto de las estaciones (esclavos) para solicitar datos u ordenar alguna acción.

3.7.1 Elementos sistema SCADA

Un sistema SCADA básicamente está compuesto por los siguientes elementos:

i. HMI

De las siglas en inglés “Human Machine Interface”, son los dispositivos que se utilizan para la representación gráfica simplificada del sistema que está bajo control, como los paneles sinópticos y pantallas de visualización de datos [22].

ii. MTU

Reúne el mando del sistema, utiliza un gran repertorio de protocolos abiertos y en algunos casos propietarios, con el fin de ofrecer comunicación con distintas plataformas y marcas industriales. Con ello es posible intercambiar información en

tiempo real entre el Centro de Control, subestaciones y finalmente estaciones remotas. Dentro de sus principales funciones se encuentran: [22]

- Gestionar las comunicaciones.
- Recopilar los datos de las estaciones remotas (RTU).
- Envío de información.
- Comunicación con los operadores del sistema.
- Análisis de la información recibida.
- Visualización de los datos.
- Control.
- Seguridad.

iii. RTU

Las unidades remotas se encargan principalmente de recopilar los datos de los elementos de campo y transmitirlos hacia la unidad de control, así como enviar órdenes desde la unidad de control hacia los elementos de campo como reguladores y controladores. Suelen estar basadas en ordenadores que controlan directamente el proceso mediante instrucciones hacia los PLC o reguladores. Tienen una construcción robusta, lo que les permite operar en condiciones difíciles de temperatura, presión, interferencias electromagnéticas o variaciones de alimentación entre otros casos [22].

iv. PLC

Los sistemas lógicos programables están dedicados principalmente al control de instalaciones, máquinas o procesos industriales. Con el paso del tiempo se les ha ido agregando elementos que permiten establecer una comunicación con MTU, lo cual ha estrechado la similitud entre un PLC y un RTU [22].

v. IED

Siglas en ingles de Intelligent Electronic Devices, en español conocido como periféricos inteligentes, son todos aquellos dispositivos que tienen decisión propia y que se encarga de tareas de control, regulación y comunicación. Dentro de esta clasificación se pueden mencionar PLC, reguladores, variadores de frecuencia, registradores, procesados de comunicaciones, generadores de tiempo y frecuencia, transductores, controladores de energía reactiva, entre muchos otros dispositivos, principalmente de ámbito industrial [22].

vi. Sistemas remotos

Los sistemas remotos se pueden ver como un subsistema SCADA que pertenece a un sistema SCADA mayor, un sistema remoto cuenta con funciones de control, HMI, adquisición de datos, protocolos de seguridad y comunicaciones internas. Por ejemplo un sistema remoto puede ser una subestación o una casa de máquinas, dentro de un sistema de control de una empresa de generación y distribución eléctrica con un Centro de Control a distancia [22].

vii. Sistemas de comunicación

Estos sistemas permiten el intercambio de datos de manera bidireccional entre la unidad de control y las unidades remotas mediante el uso de protocolos de comunicaciones y medios de transporte de información, típicamente: cable coaxial, fibra óptica, telefonía fija o celular o radio enlaces [22].

Existen distintas formas de establecer una comunicación entre unidades MTU y RTU, entre las más utilizadas se encuentran [22].

- **Punto a punto:** es una comunicación en donde un solo elemento RTU está conectado al sistema de control MTU mediante una línea de comunicación.
- **Multipunto dedicado:** es una variante del modelo anterior, en donde un solo sistema MTU se encuentra conectado a varias unidades remotas mediante

enlaces directos permanentes. Esta configuración es de cuidado, debido a que todo el tráfico de la red acaba en un solo punto, por lo que debe ser capaz de gestionar todo el tráfico generado por el resto de elementos del sistema.

- **Multipunto compartido estrella:** es de tipo maestro-esclavo. Esta configuración en estrella utiliza un solo puerto de comunicaciones, en donde las RTU se muestrean por turnos, este sistema es posible implementarlo siempre y cuando las unidades remotas cuenten con un identificador único en el sistema.
- **Multipunto compartido en bus:** es similar a la topología anterior, pero con estructura maestro-esclavo, multimaestro o cliente-servidor. En donde una o varias unidades centrales están conectadas a una o varias estaciones RTM con un medio común. El acceso también es por orden y está gestionado por el sistema maestro.
- **Multipunto compartido en anillo:** es la topología más robusta, ya que proporciona dos caminos para la información, por lo que en caso de algún fallo en uno de los nodos, el tráfico de datos no se interrumpirá.

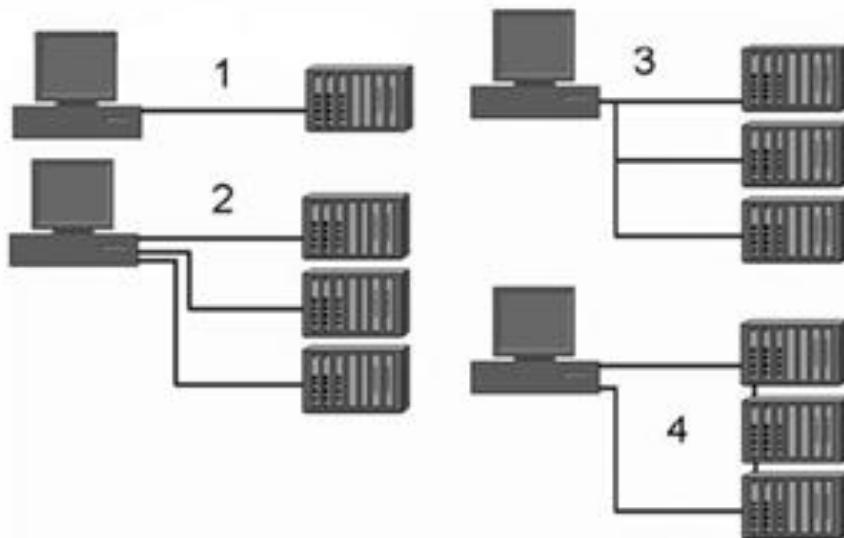


Figura 3.22 Topologías básicas en un sistema SCADA

3.7.2 Módulos de un programa SCADA

Cualquier sistema de visualización requiere de ciertas utilidades para realizar la configuración del sistema de comunicaciones, pantallas, contraseñas, alarmas, impresiones, entre muchas otras características.

Para establecer un entorno de trabajo adaptado a una necesidad determinada es necesario considerar ciertos aspectos. La estructura de pantalla se debe organizar en forma lineal o de árbol. Los usuarios se clasifican según su importancia, por lo que se concentran en grupos con privilegios que permiten o limitan su mando en el sistema. Las pantallas de interfaz proporcionan una serie de herramientas que permiten realizar las tareas más comunes de forma rápida y sencilla [22].

i. Interfaz gráfica

Permiten al operador tener en pantalla funciones de control y supervisión de la planta con combinaciones de imágenes, líneas de tiempo y textos. A continuación en la figura 3.27 se muestra un ejemplo de una interfaz gráfica de una planta de tratamiento de agua elaborada con el sistema Wonderware Intouch.

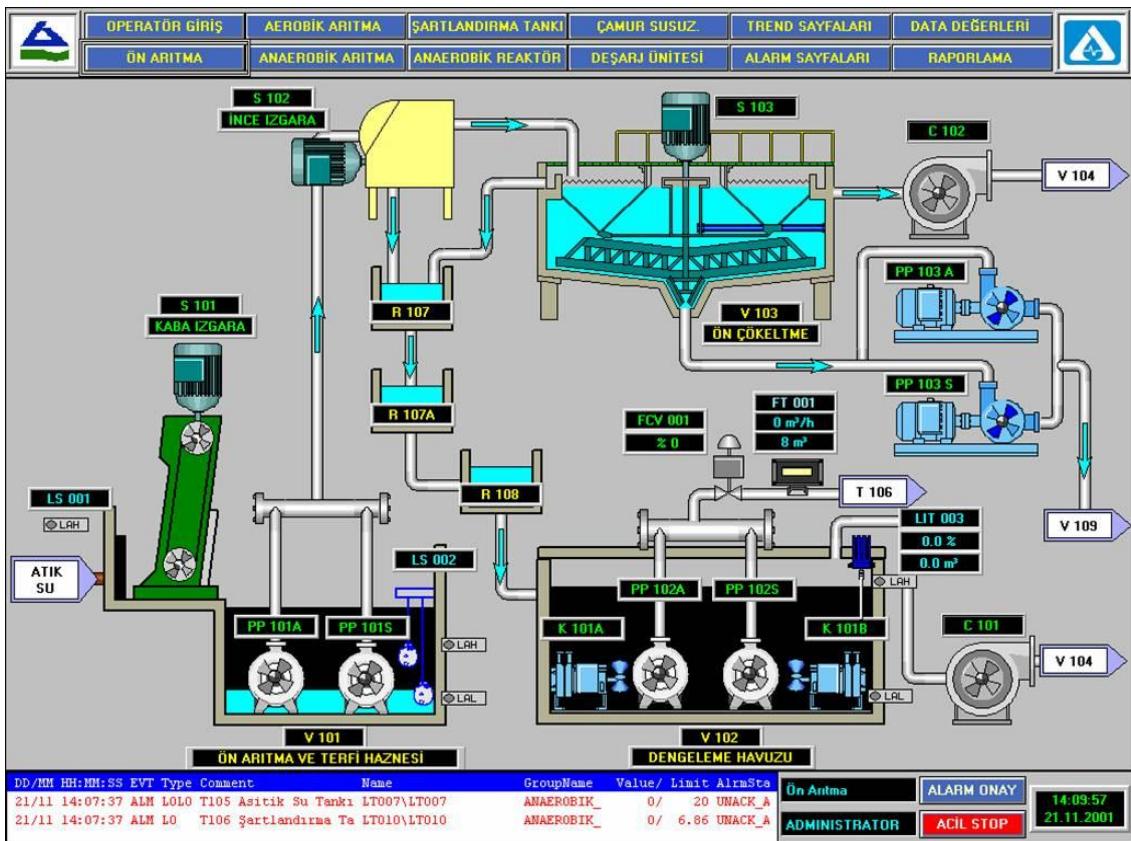


Figura 3.23 Ejemplo de interfaz gráfica de una planta de tratamiento de agua con Wonderware Intouch.

ii. Alarmas y eventos

Las alarmas se basan en vigilancia de los rangos de las variables de un sistema. Son los eventos no deseados del sistema, ya que su aparición normalmente está ligada a problemas en el funcionamiento del sistema. Estos eventos suelen ser registrados para evaluar el funcionamiento histórico del equipo.

Por ejemplo, un sistema SCADA para el control de un horno, en donde la temperatura es una variable fundamental para el sistema, va a llevar ligada una serie de valores que definen el comportamiento de esta variable en el sistema, tales como: valor máximo, valor alto aviso, valor bajo aviso y valor mínimo.

Las alarmas suelen estar centralizadas y clasificadas en grupos de alarmas, con el fin de mejorar su gestión, así como asignarle un nivel de prioridad para desplegar las de mayor importancia para el sistema primero.

iii. Registro y eventos

Un registro es un archivo temporal de los valores de las variables del sistema, por lo general se definen con un tamaño limitado y con un patrón cíclico. Los datos de alarmas y eventos que ocurren un sistema suelen ir acompañados de otros identificadores, como la hora en que ocurrió o el usuario que se encontraba activo en el momento.

iv. Generación de informes

Surge como complemento a los registros de datos y generación de alarmas, con el fin de que el mismo sistema SCADA cuente con la posibilidad de generar información útil para la toma de decisiones, con información como: producción en tiempo real, generación y registro de alarmas, adquisición de datos para análisis histórico, control de calidad, cálculo de costos y mantenimiento preventivo.

v. Control de proceso

Son paquetes complementarios al sistema SCADA que permiten programar tareas que respondan a eventos del sistema, por ejemplo: enviar un correo electrónico al activarse una alarma específica, incluso poner en marcha o detener secciones del sistema a razón de los valores de las variables adquiridas.

3.8 Software SCADA utilizado por Coopelesca

3.8.1 Survalent Technology

La compañía canadiense Survalent Technology es una de las empresas líderes en software SCADA para sistemas de generación y distribución eléctrica, control de tráfico y tratamientos de aguas residuales en Norteamérica. Cuenta con 50 años de experiencia para sistemas de control y monitoreo, permite adquirir y visualizar datos necesarios para una correcta operación del sistema en tiempo real, cuenta con interfaces intuitivas y permite ir agregando funciones especiales según nuevas necesidades del usuario.

En COOPELESCA se utilizan los programas SmartSCADA¹⁶ y WorldView¹⁷ de Survalent Technology para el control y monitoreo de toda la red eléctrica de la zona norte mediante el diagrama de red unifilar, mostrado en la figura 3.26, esto incluye las redes de distribución de 13.5kV y 24.9 kV, las líneas de subtransmisión de 69kV que interconectan las 3 subestaciones de la cooperativa Muelle, Pital y Puerto Viejo de Sarapiquí, además puede controlar y monitorear remotamente las subestaciones de distribución antes mencionadas y así como las subestaciones de las plantas hidroeléctricas de la cooperativa. Con este diagrama del sistema eléctrico, el Centro de Control de la cooperativa, puede aislar sectores de la red en caso de averías, tener lecturas en tiempo real de los valores de tensión y corriente eléctrica de las líneas trifásicas entre otras acciones.

A continuación se muestra el sistema eléctrico de la zona norte del país y las redes trifásicas del sistema en las figura 3.24 y figura 3.25 respectivamente.

¹⁶ Para más información: <http://www.survalent.com/en/solutions/smart-scada>

¹⁷ <http://www.survalent.com/en/solutions/worldview>

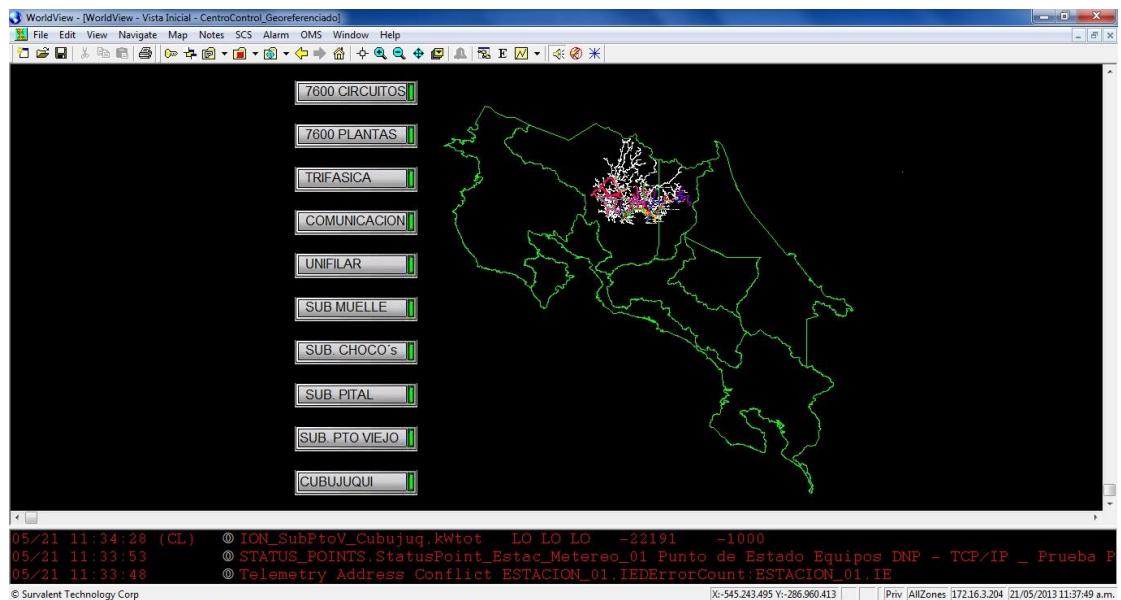


Figura 3.24 Sistema eléctrico de la zona norte del país.

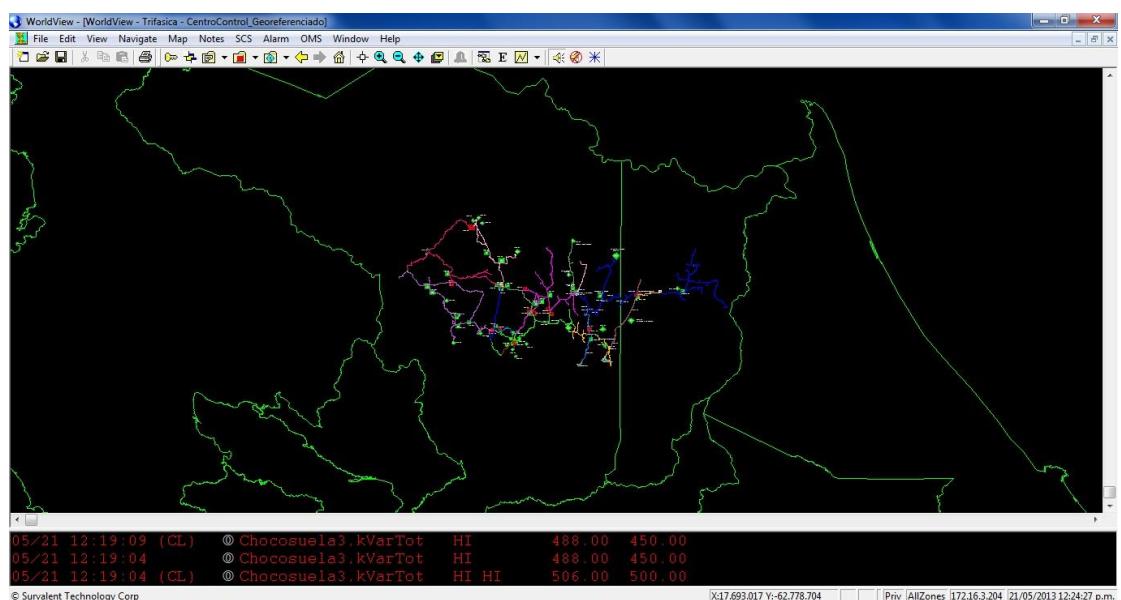


Figura 3.25 Diagrama de las redes trifásicas de COOPELESCA.

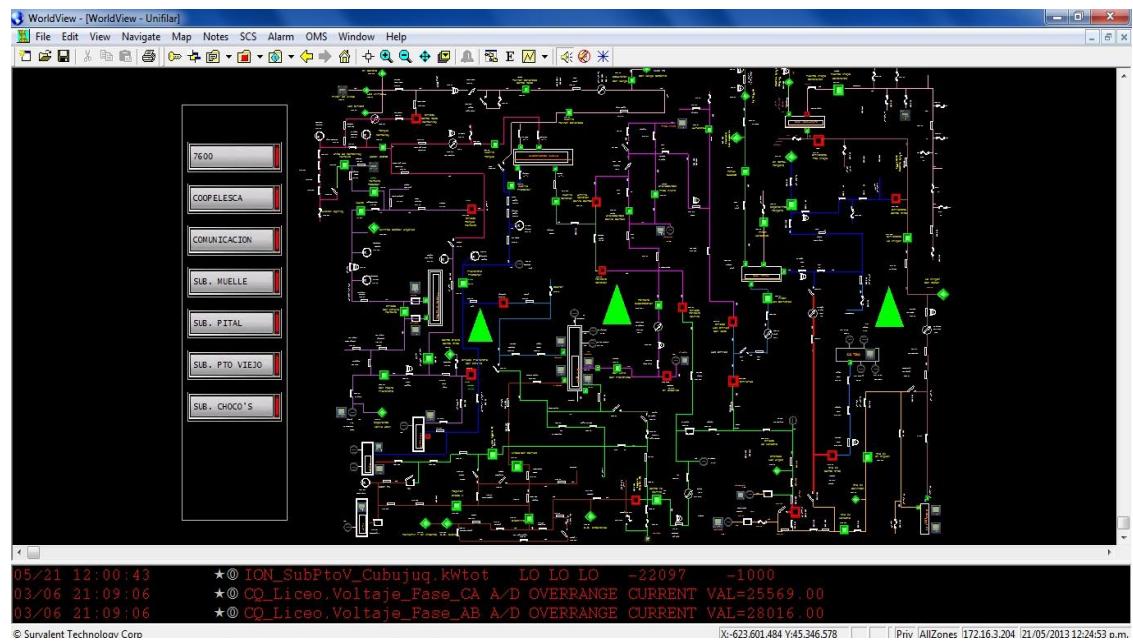


Figura 3.26 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de COOPELESCA

Por otra parte, este software permite mostrar en tiempo real y almacenar un historial de la lista de eventos de la red, desplegados en la parte inferior de la interfaz, con ello se puede alertar a los operadores de sobretensiones o sobre frecuencias, salida de la red de los generadores, apertura o cierre de los reconnectionadores por mencionar algunos ejemplos.

También le permite a la cooperativa tener el tiempo real los aportes de potencia eléctrica y facturación por generación de las plantas hidroeléctricas privadas, de CONELECTRICAS¹⁸, propias de COOPELESCA y el aporte de las subestaciones del ICE en los distintos puntos de interconexión al sistema de la cooperativa como se aprecia en la figura 3.27, así como el consumo en la red por circuitos, mostrado en la figura 3.28.

¹⁸ Consorcio nacional de cooperativas eléctricas.

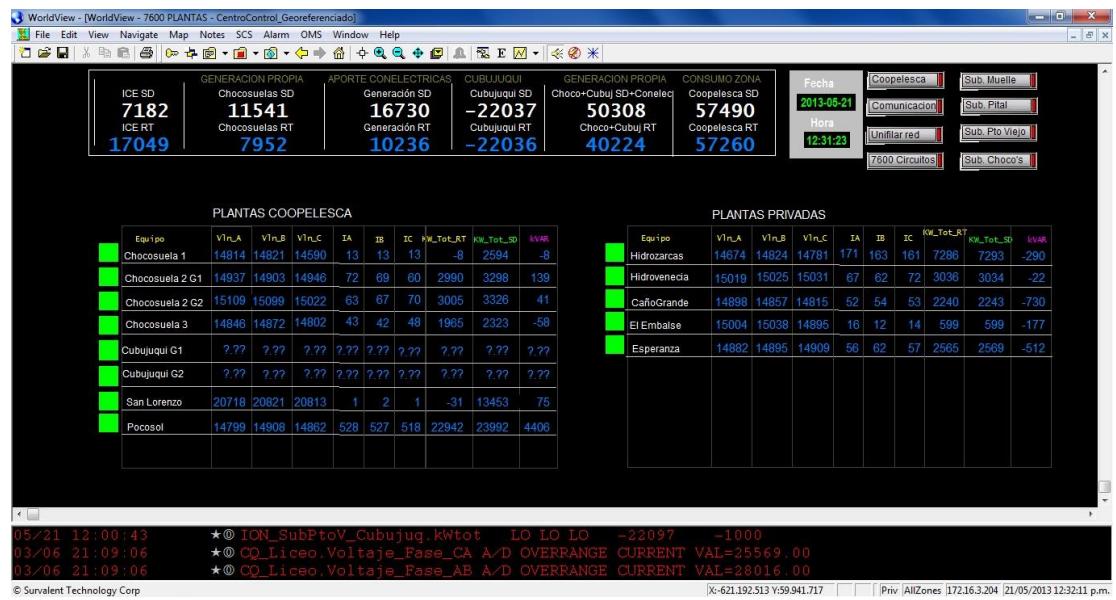


Figura 3.27 Generación eléctrica aportada al sistema de la zona norte.

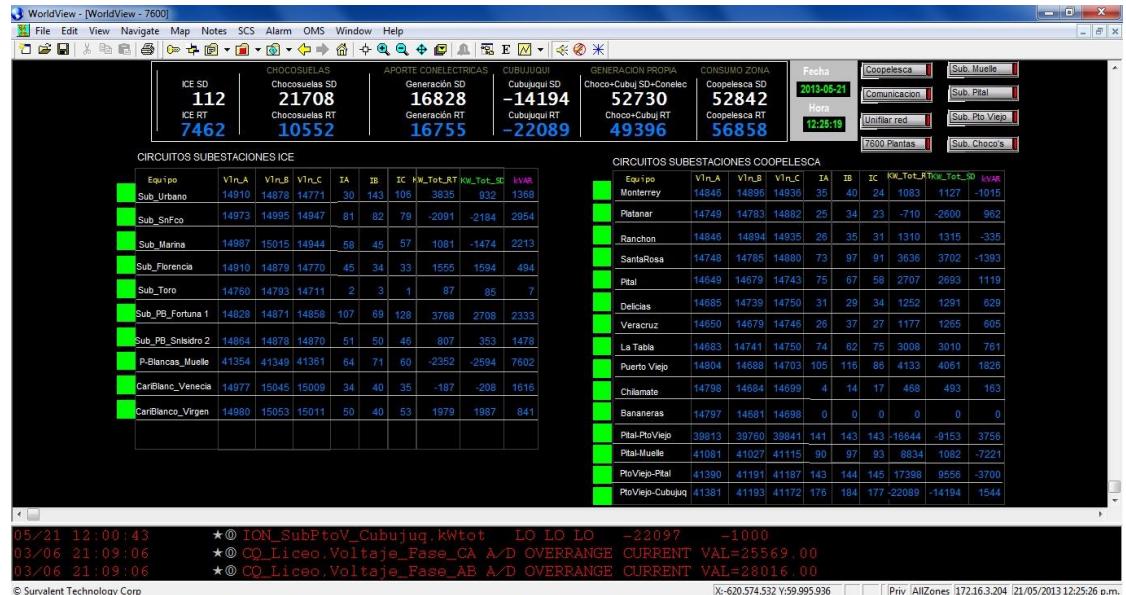


Figura 3.28 Consumo de potencia eléctrica clasificado por circuitos en la zona norte.

3.8.2 Wonderware

Wonderware es una unidad de negocios de la empresa británica Invensys PLC, fundada en 1987 con la finalidad de desarrollar y vender software de Interfaz Hombre-Máquina (HMI) en PC, para aplicaciones industriales y de automatización de procesos.

Dentro de las opciones que ofrece Wonderware se encuentra HMI/SCADA, la cual utiliza la tecnología ArchestrA, que brinda una arquitectura de software única, abierta y escalable que puede conectarse a prácticamente cualquier sistema de automatización, unidad terminal remota (RTU), dispositivo electrónico inteligente (IED), controlador lógico programable (PLC), base de datos, historiador o sistema de negocios que se utilizan hoy en día.

Permite implementar aplicaciones geográficamente dispersas, que pueden ir desde unos cuantos cientos hasta un millón de I/O (entradas y salidas), y desde un solo nodo hasta cientos de estaciones, puede realizarse de manera rápida y segura.

Dentro de los principales beneficios que ofrece la plataforma HMI/SCADA de Wolderware se pueden mencionar su fácil implementación, configuración y mantenimiento, es un software de alta seguridad y cuenta con escalabilidad prácticamente ilimitada. A continuación se resumen sus principales características:

- Visualización HMI y SCADA distribuido geográficamente
- Mantenimiento y desarrollo a base de plantillas
- Despliegue de aplicaciones remotas y gestión de cambios
- Seguridad de niveles de datos integrada al sistema
- Definición de alarmas fácil y flexible
- Análisis y recolección de datos para sistemas nuevos y existentes
- Generación de reportes fácil de usar
- Acceso abierto a datos históricos

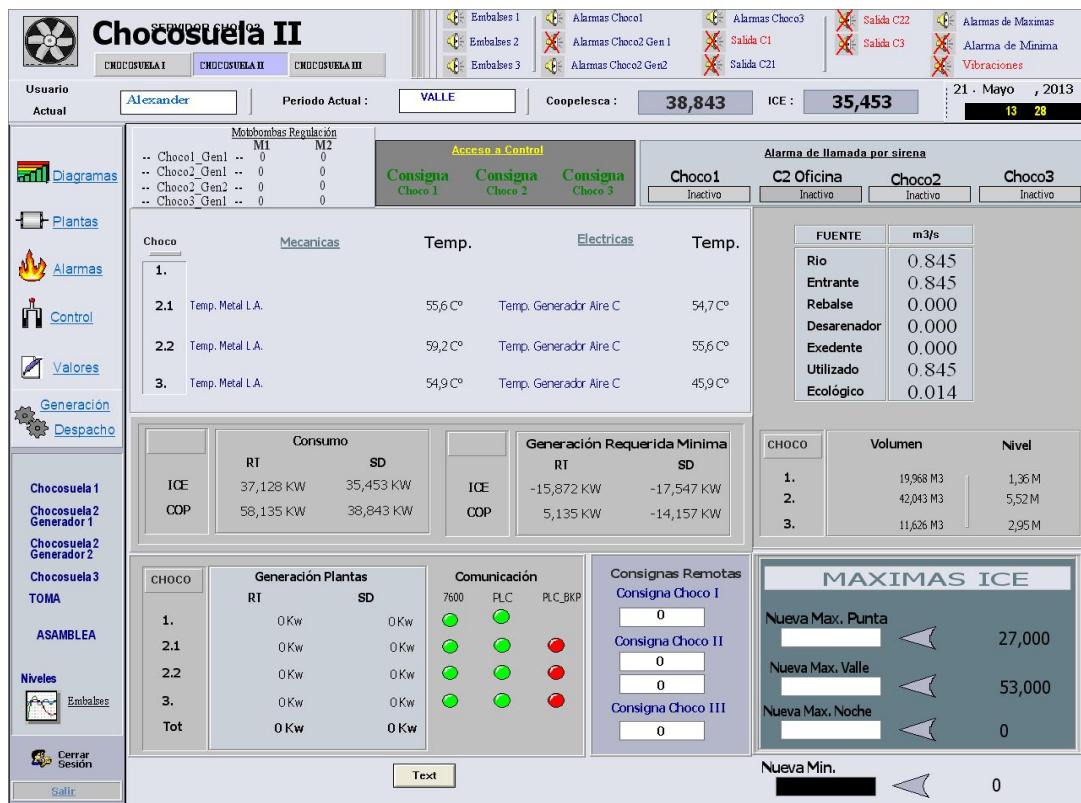


Figura 3.29 Pantalla principal de control de las plantas hidroeléctricas de COOPELESCA.

En COOPELESCA, el programa WonderWare es utilizado para controlar los arranques y paros de las centrales hidroeléctricas propias de la cooperativa, en la figura 3.29 se muestra la pantalla principal de control del complejo hidroeléctrico Chocosuelas, su interfaz gráfica permite tener monitoreo de la unidad paso a paso en los arranques y paros. Por otra parte permite controlar los cierres y aperturas de las compuertas en la toma de agua y en el embalse, así como los niveles de agua presente en los embalses como se aprecia en la figura 3.30. Cuenta con alarmas para controlar las temperaturas en los cojinetes y el generador, los niveles de vibración de la unidad, la potencia aportada por las plantas hidroeléctricas.

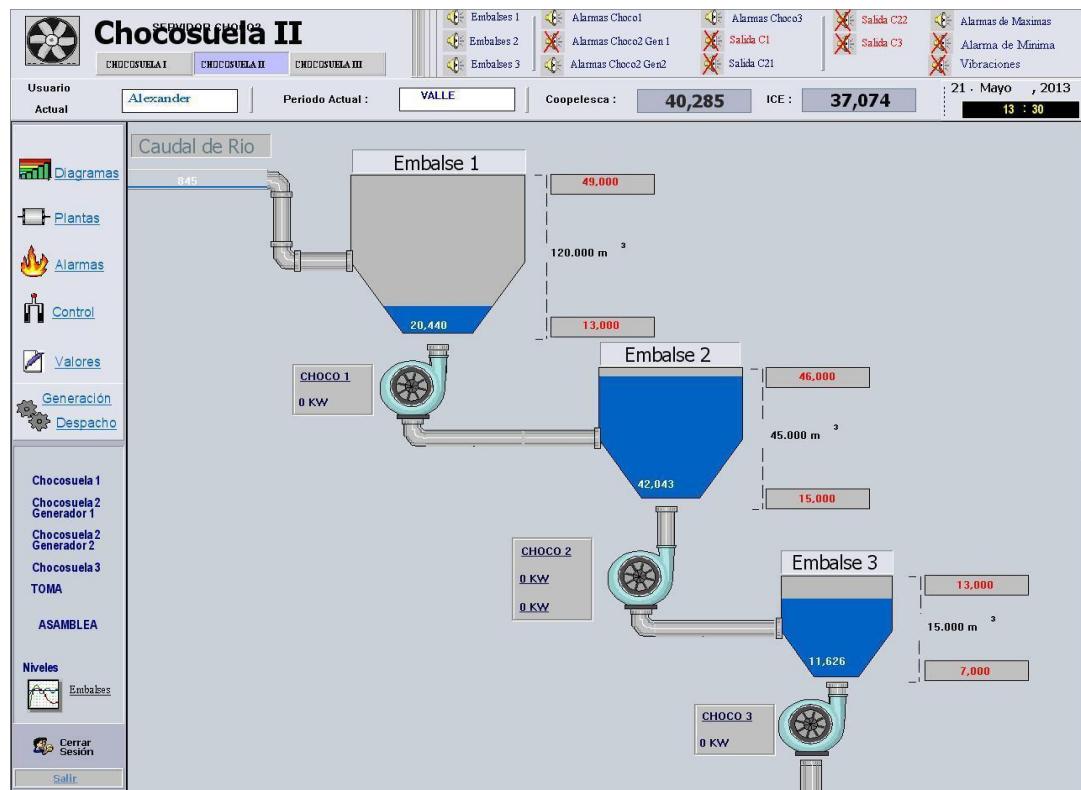


Figura 3.30 Niveles de los tres embalse del complejo hidroeléctrico Chocosuelas.

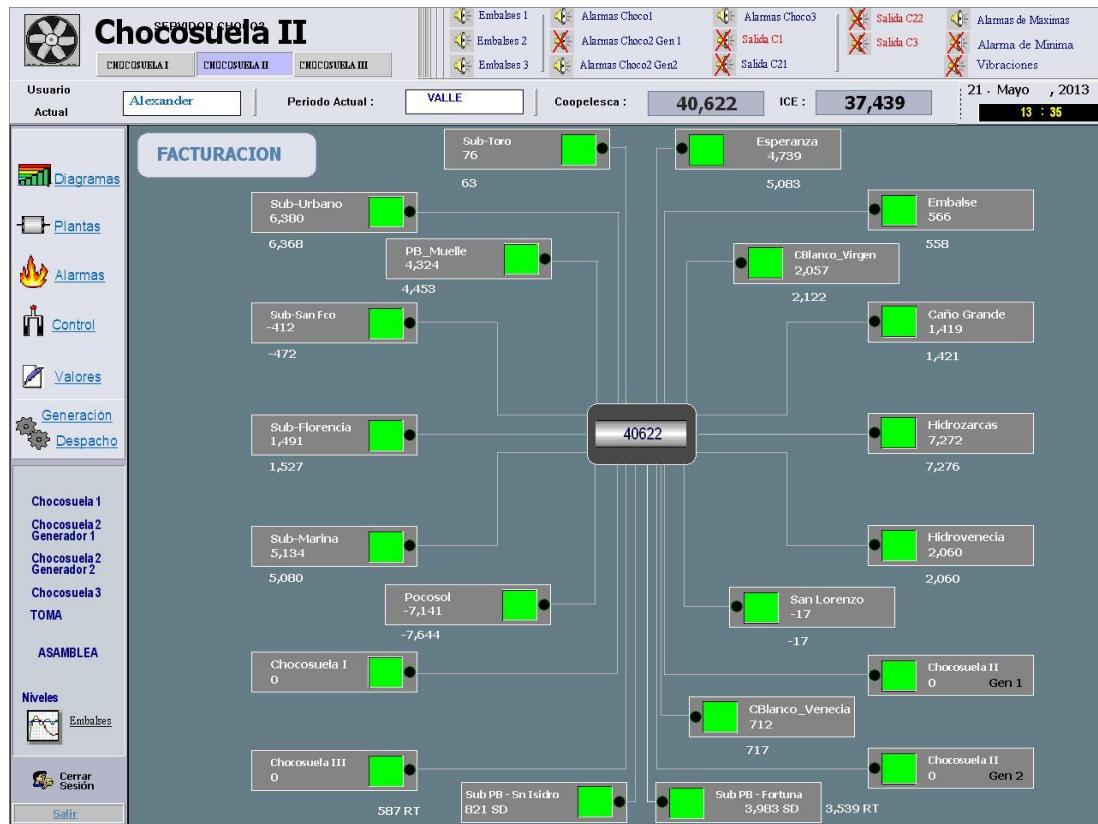


Figura 3.31 Interfaz de facturación de COOPELESCA en el ambiente Wonderware.

Sin embargo, la cooperativa se encuentra en una etapa de traslado de los sistemas de control y monitoreo que administra Wonderware hacia Survalent, como se mencionó anteriormente en las pantallas de Survalent ya están los valores de facturación de la figura 3.31, con el fin de tener en un solo sistema SCADA en el Centro de Control de la cooperativa, por lo que la idea finalmente sería dejar el software de Wonderware en las casas de máquinas de las plantas hidroeléctricas para fines de monitoreo por parte de los operadores.

Capítulo 4 Metodología

4.1 Implementación de la solución

Para el desarrollo del proyecto, inicialmente se diseñó un mapa conceptual, mostrado en la figura 4.1 que abarcara los requerimientos de la cooperativa, así como los principales componentes que requería la estación para poder adquirir las variables meteorológicas, procesarlas, almacenarlas y transmitirlas desde un punto geográfico seleccionado por COOPELESCA, así como la recepción, interpretación y despliegue de los datos en el sistema SCADA utilizado por la cooperativa. Además se incluyeron los indicadores que se definieron para corroborar el cumplimiento de los objetivos.

Inicialmente se discutieron las condiciones que requería la cooperativa para la implementación de las estaciones meteorológicas, el presupuesto, los posibles puntos geográficos de interés para los proyectos hidroeléctricos, las variables que necesitaban monitorear y la necesidad de incorporar las estaciones meteorológicas al sistema de monitoreo y control con que cuenta la cooperativa.

Luego se realizó una investigación de aproximadamente 15 días con base en literatura y cotizaciones a los distintos proveedores de la cooperativa para contar con referencia de los equipos y tecnologías existentes en el mercado así como los costos de dichos equipos.

De manera paralela se recopiló información de tarjetas de desarrollo programables de Arduino, así como bibliotecas existentes y dispositivos necesarios para solucionar el problema del datalogger y la integración del equipo con el sistema SCADA de la cooperativa.

Posteriormente a tener definidos los equipos que se utilizarían para el proyecto, se realizaron las giras a campo en las fechas indicadas en la tabla 4.1:

Tabla 4.1 Fecha de las giras realizadas para el proyecto.

Fecha	Descripción de la gira
• 17 de abril de 2013:	Selección del punto representativo para la vertiente atlántica para Chocosuela, donde se instalará el prototipo.
• 25 de abril de 2013:	Selección del punto en Cubujuquí, cercano a la toma de agua del proyecto.
• 8 de mayo de 2013:	Selección del punto representativo de la vertiente pacífica para Chocosuela.
• 21 de mayo de 2013:	Instalación del prototipo.
• 28 de mayo de 2013:	Verificar el funcionamiento del prototipo.

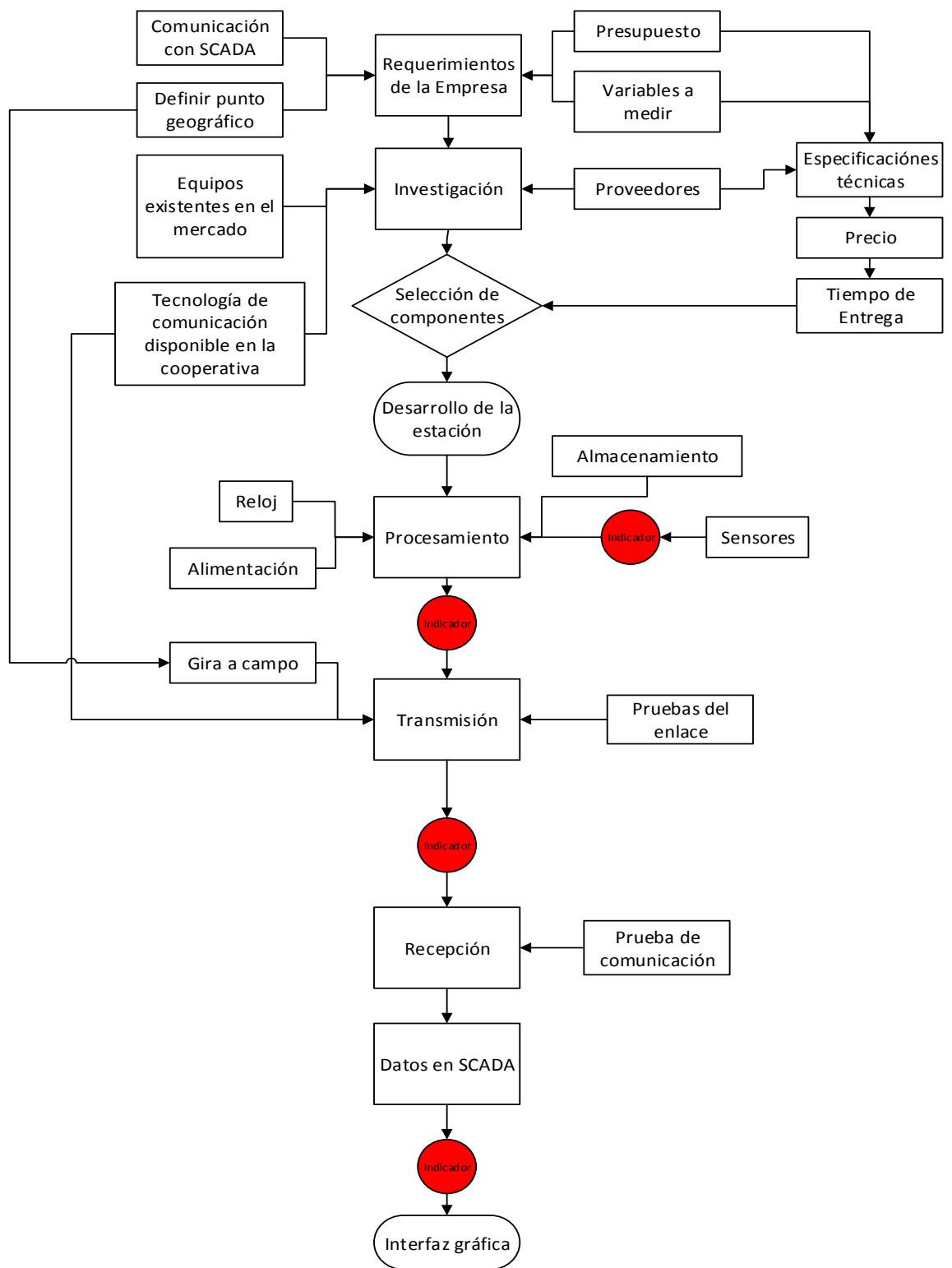


Figura 4.1 Mapa conceptual del proyecto estaciones meteorológicas.

4.2 Selección de componentes

4.2.1 Sensores

Para la selección de los sensores de la estación meteorológica se solicitaron cotizaciones a los distintos proveedores de la Cooperativa, así como cotizaciones a fabricantes estadounidenses y se escogieron según la mejor oferta económica, sin sacrificar alguna especificación técnica necesaria para el acople de los sensores con el datalogger a desarrollar.

A continuación en las siguientes cuatro tablas, se muestra una comparación técnica de los distintos sensores ofrecidos por los proveedores de COOPELESCA y fabricantes estadounidenses que se podrían escoger para la estación meteorológica, así como el precio y la entrega ofrecida por los distribuidores¹⁹.

Tabla 4.2 Características técnicas de los pluviómetros.

Modelo	7852	52202	TE525MM-L	ULTIMETER PRO
Fabricante	Davis	Geonica	Campbell Scientific	Peet Bros
Conecotor	RJ-11	-	-	RJ-45
Dimensiones				
Diámetro	16.5cm Ø	18cm Ø	24.5cm Ø	11.43cm Ø
Altura	24cm	30cm	29.21cm	13.018cm
Peso	1kg	-	1.1kg	0.8kg
Resolución	0.2mm	0.1mm	0.1mm	0.1mm
Exactitud				
<10mm/h	±3%	±2%	±1%	±2%
10<20mm/h	±4%	±3%	+0, -3%	±2%
>20mm/h	±5%	±3%	+0, -5%	±2%
Tipo de señal de salida	analógica	analógica	analógica	analógica
Precio	US\$ 75	US\$ 1463.15	US\$ 541	US\$ 90
Entrega	Inmediata (USA)	4 meses	1.5 meses	Inmediata (USA)

¹ Los precios mostrados en las tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 no incluyen el impuesto de ventas ni el costo del transporte.

Tabla 4.3 Características técnicas de los anemómetros.

Modelo	7911	03002	034B	ULTIMETER PRO
Fabricante	Davis	Geonica	Campbell Scientific	Peet Bros
Conector	RJ-11	-	-	RJ-11
Dimensiones				
Altura	19.1cm	32cm	24.4cm	18cm
Diámetro de copa		12cm		6.6cm
Largo de veleta	47cm	22cm	11.4cm	32.8cm
Peso	1.33kg	1.3kg	0.907kg	0.900kg
Exactitud				
Velocidad	1.5m/s	±0.5m/s	0.79m/s	0.90m/s
Dirección	±7°	±5°	±4°	5±0
Rango				
Velocidad	1-67m/s	0-50m/s	0-75 m/s	0-71.0m/s
Dirección	360°	360°	360°	360°
Tipo de señal de salida				
Velocidad		senoidal		analógica
Dirección	analógica	analógica	analógica	analógica
Voltaje de salida	0-5VDC	0-5VDC	0-5VDC	-
Alimentación	0-12VDC	8-24VDC	0-12VDC	0VDC
Precio	US\$ 75	US\$ 1441.91	US\$ 371	US\$ 90
Entrega	Inmediata (USA)	4 meses	1.5 meses	Inmediata (USA)

Tabla 4.4 Características técnicas de los barómetros.

Modelo	61202	092	BMP085
Fabricante	Geonica	Campbell Scientific	BOSH
Dimensiones (cm)	11.8x7.3x5.4	12.0x8.0x5.5	1.65x1.65x.03
Peso	600g	250g	50g
Precisión a 20°C	±0.3hPa	±0.1hPa	±0.2hPa
Rango	600-1100hPa	600-1100hPa	300-1100hPa
Tipo de señal de salida	digital	digital	digital

continuación tabla 4.4			
Protocolo de comunicación	SDI	SDI	I ² C
Alimentación	10-30VDC	6-12VDC	1.8-3.6VDC
Precio	US\$ 1463.15	US\$ 1003	US\$ 20
Entrega	4 meses	1.5 meses	Inmediata (CR)

Tabla 4.5 Características técnicas de los sensores de temperatura y humedad relativa.

Modelo	7817	STH-5031	CS215	RTH03
Fabricante	Davis	Geonica	Campbell Scientific	MaxDetect
Conector	RJ-11	-	RJ-11	-
Dimensiones (cm)	0.32x0.65Ø	-		1.5x2.5x0.7
Peso	128g	-	150g	20g
Precisión				
Temperatura °C	±0.1	±0.1	±0.4	±0.5
Humedad	-	±3%	±4%	±2%
Rango				
Temperatura °C	-45 - 60	-30 – 70	-40 - 70	-40 - 80
Humedad	-	0-100%	0-100%	0-100%
Tipo de señal de salida	analógica	Analógica	analógica	digital
Protocolo de comunicación	-	-	-	MaxDetect 1 wire bus
Alimentación	5-12VDC	12-14VDC	6-16VDC	3.3-5.5CVD
Precio	US\$ 20	US\$ 542.63	US\$ 412	US\$ 10
Entrega	Inmediata (USA)	4 meses	1.5 meses	Inmediata (CR)

Como se puede observar en las tablas anteriores, los sensores meteorológicos cuentan con características similares en cuanto a rangos de operación, precisión, tipo de señal y resoluciones, por lo que estos no son elementos determinantes para seleccionar cuales utilizar; caso contrario ocurre con los precios y las fechas de entrega, como lo indican las tablas. Las marcas Campbell Cientific y Geonica, distribuidas en Costa Rica por Campbell Scientific Centro Caribe S.A. y EBISTIC S.A respectivamente, ofrecen plazos de entrega muy extensos y precios significativamente

elevados en comparación con los otros dos fabricantes estadounidenses Davis y Peet Bros. Por lo que la cooperativa optó por comprar el pluviómetro anemómetro y escudo de protección solar (para el sensor de temperatura y humedad) con la empresa Peet Bros.

De igual forma ocurrió con los barómetros ofrecidos por los proveedores de la cooperativa cuyos precios resultaron hasta 50 veces superiores al sensor BMP085 distribuido en Costa Rica por la tienda virtual CRCibernetica, sin embargo es importante aclarar que los barómetros de US\$1000 están fabricados para instalar directamente sobre el poste de la estación, por lo que cuentan con protección para la intemperie, mientras que el BMP085 es un circuito integrado hecho para trabajos bajo techo y su vida depende de los cuidados que se le den, razón por la cual se acordó con la cooperativa utilizar este sensor dentro del gabinete del datalogger para mayor protección. De presentarse algún deterioro del sensor, su precio justifica un remplazo sin que resulte en un costo adicional importante para el proyecto de estaciones meteorológicas de la cooperativa.

En la figura 4.2 se muestran los resultados de pruebas hechas el día 24 de abril, donde se colocó el sensor dentro del gabinete y el día 25 de abril, donde el sensor estaba fuera del gabinete, en azul y verde respectivamente, se realizaron 1000 lecturas en un intervalo de 4 horas, entre las 8:00 am y 12:00 md de ambos días, como se puede observar, no existe una variación significativa al tener el sensor dentro o fuera del gabinete. Es importante aclarar que esos dos días tuvieron un comportamiento meteorológico muy similar y el sensor se colocó a la misma altura, por lo que no influyó en las mediciones realizadas.

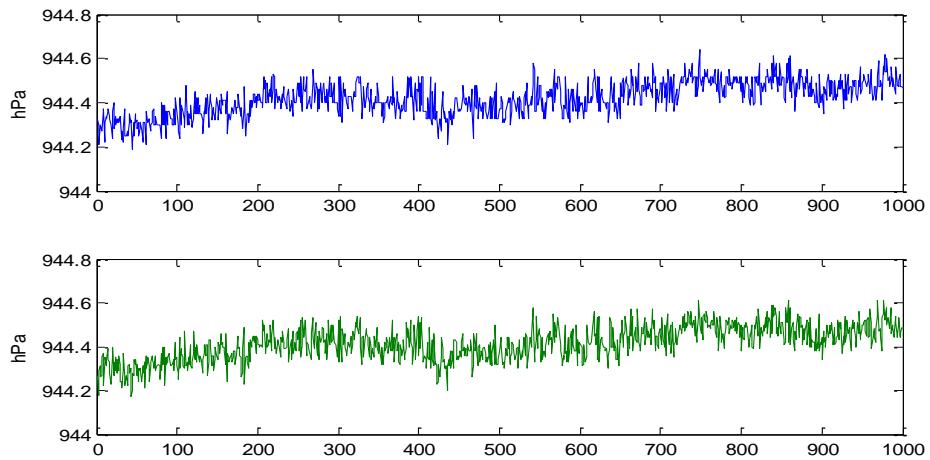


Figura 4.2 Lecturas del sensor BMP085 dentro y fuera del gabinete.

Con los sensores de humedad y temperatura también fue similar, las cotizaciones solicitadas a los proveedores de la cooperativa indicaron precios hasta 50 veces más altos que el RHT03 distribuido por la tienda virtual CRCibernética, la tabla 4.5 muestra en la segunda columna un sensor de la compañía norteamericana Davis que cuesta US\$20, pero no cuenta con sensor para humedad relativa, por lo que finalmente se escogió el RHT03, que se colocó dentro de un protector solar de la compañía Peet Bros, representado en la figura 4.3 e incluido en el mismo pedido del anemómetro y pluviómetro con un costo de US\$80. Al igual que con el sensor BMP085, su bajo costo justifica su remplazo sin impactar el precio final del proyecto.



Figura 4.3 Escudo solar para el sensor RHT03.

4.2.2 Dispositivos de almacenamiento y procesamiento

COOPELESCA ha contemplado soluciones ofrecidas por proveedores para el monitoreo remoto de variables climatológicas. Sin embargo, estas soluciones son costosas y a criterio de la cooperativa, están sobredimensionadas para la necesidad que se tiene.

Por esta razón, se analizan y comparan las soluciones METEODATA-HYDRODATA-3000c de GEONICA y el sistema CR800 de Campbell Scentific como referencias para el diseño de la solución.

Ambos sistemas se muestran en las figura 4.4 y figura 4.5 respectivamente, sus características técnicas se resumen en la tabla 4.6.

En la misma tabla se muestra una columna donde se indica cuáles de las capacidades de estos sistemas no es requerida por COOPELESCA. Esto se logra luego de una revisión y discusión técnica con los encargados de monitoreo meteorológico y control de centrales hidroeléctricas.



Figura 4.4 Datalogger METEODATA-HYDRODATA-3000C de GEONICA.



Figura 4.5 Datalogger CR800 de Campbell Scientific.

A continuación, en la tabla 4.6 se hace una comparación entre el datalogger que requiere COOPELESCA con base en los requisitos solicitados para el proyecto, los ofrecidos por los proveedores y el datalogger a desarrollar para el proyecto.

Tabla 4.6 Comparación entre las principales características de los datalogger existentes en el mercado y disponibles por los proveedores de la cooperativa, el que se pretende desarrollar y el requerido para la estación meteorológica según especificaciones de COOPELESCA.

Características	Datalogger desarollaro	METEODATA-HYDRODATA 3000C	CR800	Sistema Requerido por COOPELESCA
Fabricante	-	Geonica	Campbell Scientific	-
Entradas Analógicas	16	24	6	-
Entradas Digitales	54	2	4	-
Memoria Interna	256	128MB máx.	4MB	-
Resolución del ADC	Ajustable	20bits	13bits	-
Cantidad de puertos RS232	0	5	2	-
Bluetooth	NO	SI	NO	NO
Ethernet	SI	SI	SI	SI
SDI/I ² C	SI	SI	SI	SI
Wi-Fi	NO	Si	SI	NO
GPS	NO	SI	NO	NO
Conexión punto a punto por RF	SI	SI	SI	SI
Programación de alarmas por SMS	NO	SI	SI	NO
Regleta interna de conexión rápida	SI	SI	SI	SI
Alimentación	5-12VDC	12-30VDC	9.6-16VDC	-
LCD	Opcional	SI	NO	NO
Teclado	Opcional	SI	NO	NO
Protección en las entradas	SI	SI	SI	SI
Reloj interno	SI	SI	SI	SI
Sincronización automática con GPS	NO	SI	NO	NO
Integrabilidad con SCADA	SI	NO	NO	SI
Precio	US\$200	US\$4000	US\$3000	-
Entrega	-	4 meses	1.5 meses	-

Como se puede observar en la tabla anterior, tanto los dataloggers GEONICA y Campbell Scientific, al ser multipropósito, cuenta con varios módulos de comunicación, entradas-salidas, que resultan innecesarios para la cooperativa, lo que eleva significativamente el costo de la estación meteorológica sin darle un valor agregado.

La tabla no incluye el costo adicional que implica adaptar la estación al sistema SCADA de la cooperativa (programación, licencias, interfaces, entre otros).

Por esta razón se determinó que para el módulo de procesamiento y almacenamiento de la estación meteorológica, el datalogger se implementaría utilizando una tarjeta Mega 2560 R3 de Arduino, representada en la figura 4.6, debido a que cuenta con características técnicas similares o superiores de procesamiento a los dataloggers comerciales sugeridos por los proveedores de la cooperativa, adicionalmente tiene un significativo bajo precio, disponibilidad en el país y un sólido respaldo en el modo de programación y operación en diversos foros y páginas de Internet. Por otra parte es importante resaltar que los dispositivos Arduino se caracterizan por utilizar código abierto para su programación, por lo que no representó costos adicionales para el proyecto en la compra de licencias de software propietario.

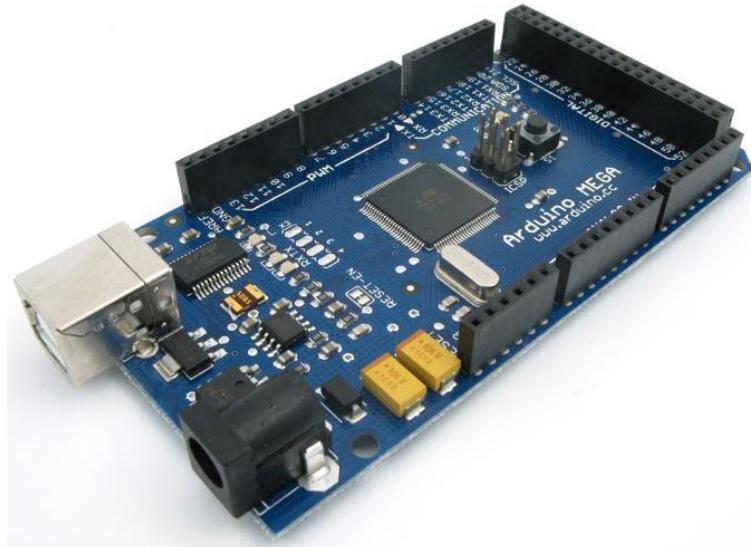


Figura 4.6 Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2350 R3.

A continuación se resumen en la tabla 4.7 las principales características técnicas del sistema Arduino Mega 2560 R3.

Tabla 4.7 Especificaciones técnicas de la tarjeta Arduino Mega 2650 R3.

Fabricante	Arduino
Microcontrolador	ATmega1280
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pines E/S digitales	54 (14 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Intensidad por pin	40 mA
continuación tabla 4.7	
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	128 KB de las cuales 4 KB las usa el gestor de arranque(bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

4.2.3 Almacenamiento de datos

En caso de presentarse algún problema durante la transmisión de datos generados por el datalogger hacia el Centro de Control, se podría dar una pérdida de información, por esta razón se le agregó al datalogger una memoria de estado sólido, donde va grabando los datos registrados a modo de respaldo cada 10 minutos. Para poder acceder a los datos fácilmente y aprovechando que la tarjeta de comunicación Arduino Ethernet (ver figura 4.9) cuenta con un socket para tarjetas microSD, que fueron aceptadas por la cooperativa.



Figura 4.7 Tarjeta microSD.

4.2.4 Reloj de tiempo real

Mantener la fecha y hora en el datalogger es fundamental para llevar un registro ordenado de las variables capturadas, razón por la cual se utilizó el circuito integrado DS1307, incorporado en una tarjeta AT24C32 similar al mostrado en la figura 4.8 que incluye los componentes electrónicos necesarios para su funcionamiento y comunicación con el microcontrolador, este circuito integrado utiliza el protocolo I²C por lo que no representa mayor problema para acoplarlo con la tarjeta Arduino Mega 2560.



Figura 4.8 Reloj de tiempo real DS1307.

4.2.5 Dispositivos para la trasmisión de datos

Después de la investigación realizada se determinó que la mejor opción para comunicar la estación meteorológica con el Centro de Control de COOPELESCA tanto por el aspecto económico como técnico era mediante el protocolo MODBUS TPC, ya

que de esta manera era posible aprovechar los equipos de comunicación inalámbrica y equipos de red que posee la cooperativa.

Para poder utilizar MODBUS TCP en el datalogger utilizando la tarjeta Arduino Mega 2560, fue necesario agregar la placa de la figura 4.9, una tarjeta desarrollada por Arduino para la comunicación de tipo TCP/IP cuyo costo en el país ronda los US\$ 46. Esta tarjeta cuenta con un socket para memorias extraíbles microSD y aprovecha las bibliotecas “Ethernet” y “SD” incluidas en el IDE de Arduino.

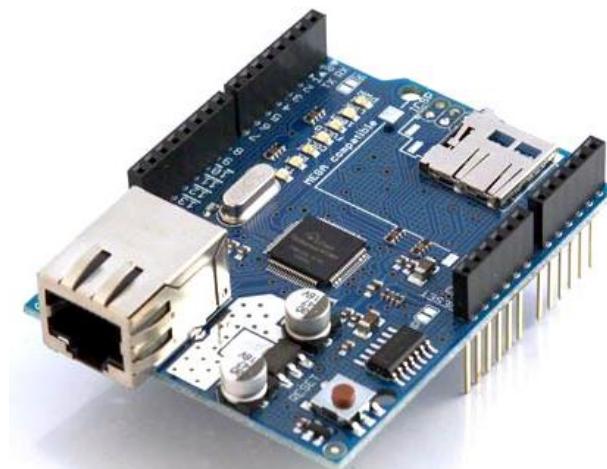


Figura 4.9 Tarjeta Arduino Ethernet con socket microSD.

Para la comunicación de la estación meteorológica con el Centro de Control, la cooperativa facilitó uno de los radio modems de la compañía Proxim modelo Tsunami MP.11 2411 mostrado en la figura 4.10, los cuales se utilizan típicamente para el monitoreo de las plantas hidroeléctricas privadas, comunicación con algunos recontactadores y toma de agua del complejo hidroeléctrico Chocosuelas, entre otras aplicaciones. En la tabla 4.8 se muestran los principales datos técnicos del radio modem.



Figura 4.10 Radio modem Tsunami MP.11

Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del radio-modem Tsunami MP.11.

Fabricante	Proxim Corporation
Modelo	MP.11 2411
Especificaciones físicas	
Dimensiones	3.5 x 17.0 x 21.5 cm
Peso	0.68 kg
Especificaciones eléctricas	
Voltaje de alimentación	12VDC
Consumo de potencia máxima	10 W
Interfaces	
Ethernet	10/100 RJ-45
Puerto Serial	Puerto estándar RS-232
Wireless	Mini PC Card
Conector de antena	Estandar N
Especificaciones de ambiente	
Temperatura de Operación	0º C a 55º C
Humedad de Operación	Máx 95 %
Presión Atmosférica	740hPa a 1050hPa
Radio	
Frecuencia de Operación	2.4 GHz
Modulación	Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS)
Máxima potencia salida	8bBm a 15dBm
Velocidad de transmisión	1 Mb/s a 11 Mb/s

La antena utilizada para el enlace del sistema es una antena de reja con ganancia de 24dBi, como se muestra en la figura 4.11, de igual manera que con el radio modem, es parte de los dispositivos con los cuenta COOPELESCA para comunicaciones inalambricas. En la figura 4.12 se muestra el comportamiento de la antena tanto el el plano horizontal como vertical.



Figura 4.11 Antena de reja para 2.4GHz

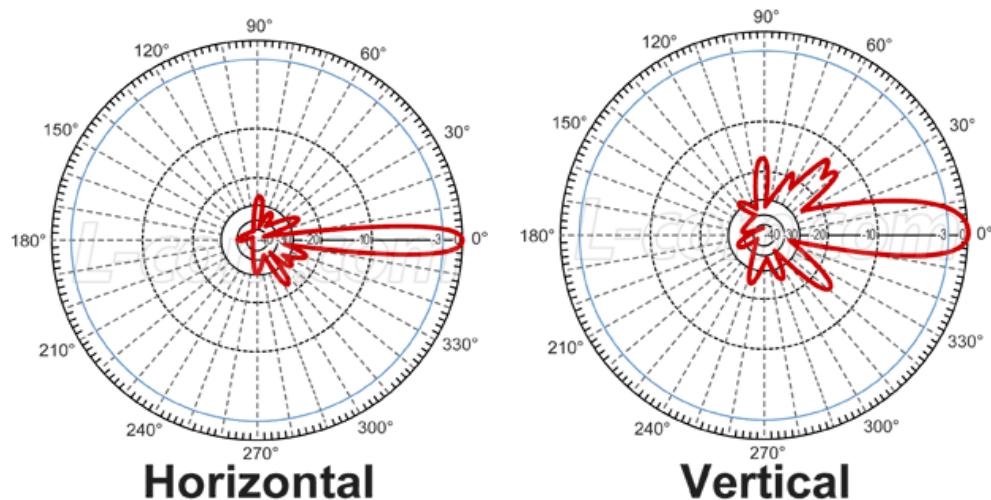


Figura 4.12 Diagrama de antena de reja 2.4 GHz.

4.2.6 Dispositivos para la alimentación eléctrica

Para el desarrollo del prototipo inicialmente se esperaba utilizar un panel solar con regulador de tensión eléctrica y una batería de ácido-plomo, porque existía la posibilidad de que el punto en donde se instalaría la estación estuviera lejos de la red de distribución eléctrica de la cooperativa, sin embargo, después de realizar la visita a campo a los posibles lugares donde se instaría la estación, se escogió un punto que dichosamente cuenta con fácil acceso a la red de distribución, por esta razón se acordó con la cooperativa agregar una acometida para abastecer de energía eléctrica a la estación. A manera de respaldo se agregó una UPS²⁰ para el datalogger y el radio modem en caso de alguna falla temporal en la red eléctrica de la zona. Sin embargo para los otros puntos donde se desean instalar las estaciones no se puede descartar el uso de los paneles solares y el equipo de regulación y almacenamiento eléctrico.

4.3 Descripción de rutinas

Las tarjetas Arduino al momento del arranque requieren establecer las condiciones en la que se va a utilizar el micro controlador, por ello se requiere crear una rutina de inicialización llamada “setup” ilustrada en la figura 4.13, donde se declaran todas las condiciones, tales como el uso que se les va a dar a los pines, si van a ser entradas o salidas, si se va a utilizar los pines de comunicación, si se van a utilizar los pines asignados para interrupciones externas, los valores con los que van a iniciar las variables declaradas en código, los valores asignados para la comunicación TCP/IP, así como la inicialización de algunas bibliotecas para su posterior uso, tales como la biblioteca “RTCLib” para el reloj de tiempo real, “Wire” para el protocolo I²C, “Ethernet” para la placa de comunicación Arduino Ethernet, “SD” para el uso de la memoria microSD y la función “bmp085Calibration” para calibrar el barómetro BMP085.

²⁰ Fuente de alimentación ininterrumpible.

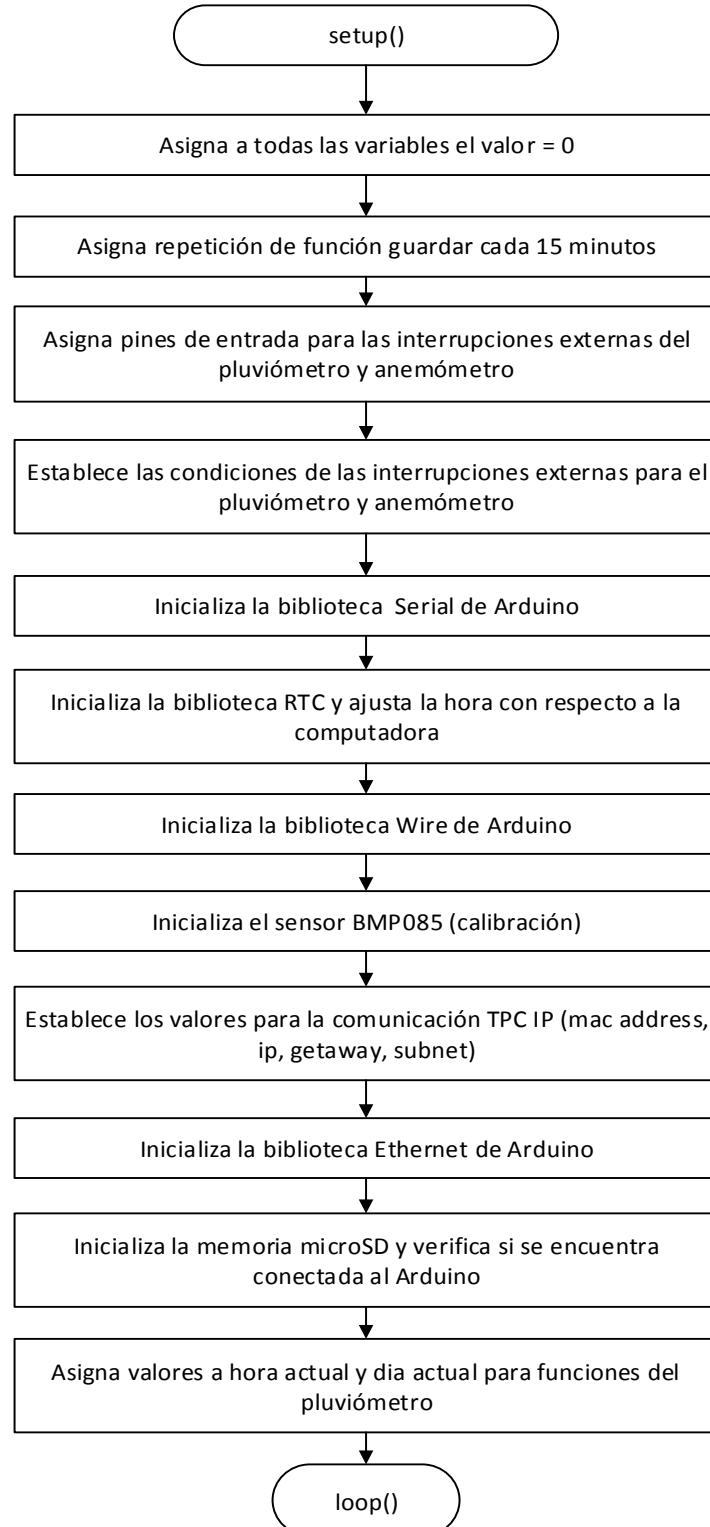


Figura 4.13 Diagrama de flujo del arranque del Arduino Mega.

Al terminar de recorrer la rutina setup, la tarjeta Arduino Mega entra en un ciclo infinito llamado “loop” representado en el diagrama de flujo de la figura 4.14, en donde pasa refrescando los valores de las variables meteorológicas mediante la rutina “valores” y seguidamente actualiza los registros asignados para el protocolo MODBUS TPC con los datos capturados por la rutina mencionada anteriormente. Por otra parte, cuenta con un temporizador configurado para llamar a la rutina “guardar” cada diez minutos, la cual se encarga de almacenar los valores de las variables en un archivo de valores separado por comas llamado “datalogger01.txt”.

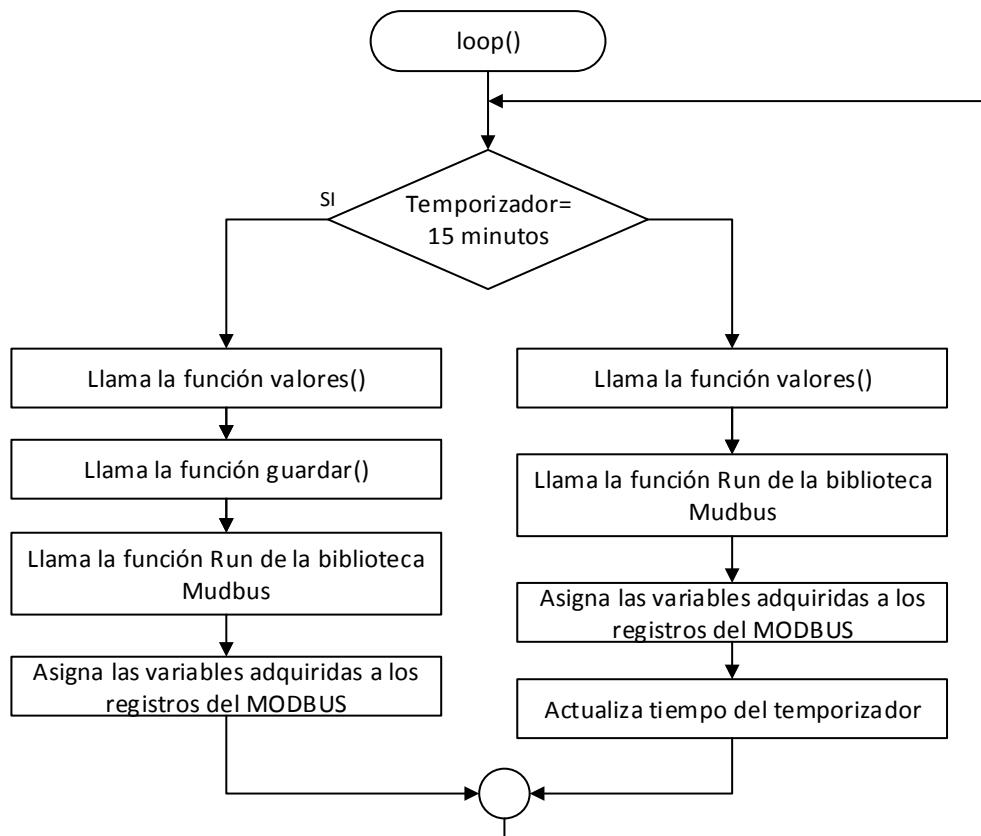


Figura 4.14 Diagrama de flujo del ciclo del Arduino Mega.

Dentro de este ciclo se usa función Run que es parte de la biblioteca de software abierto Mudbus²¹. La cual permite utilizar las placas Arduino como dispositivos esclavos bajo el protocolo MODBUS TCP.

4.3.1 Módulo de almacenamiento

En el momento que el temporizador del ciclo principal indica que transcurrieron los diez minutos establecidos, llama a la rutina guardar ilustrada en la figura 4.15. Esta rutina inicialmente va creando una cadena de caracteres “string” llamada “cadena” con los valores de las variables separados por comas.

Las variables enteras se convierten directamente a “string”. Para las variables de tipo flotante se recurre al uso de un buffer de caracteres.

Al finalizar esa conversión y tener un “string” con todos los valores, crea una variable llamada “archivo” de tipo “File” y le asigna el valor devuelto por la función “open” de la biblioteca SD al abrir el archivo “datalogger01.txt”, después consulta si el archivo existe en la memoria, en otras palabras si la variable “archivo” es igual a 1, de estar presente el archivo utiliza la función “println” sobre la variable “archivo” para escribir el valor de la variable “cadena”, finalmente cierra el archivo utilizando la función “close” sobre la variable “archivo” para salvar los cambios realizados.

En el caso en el que la memoria no esté presente en el dispositivo, la rutina al momento verificar la existencia del archivo reconoce la ausencia de la memoria, por lo que regresa al módulo principal para continuar con el ciclo.

²¹ Para más información: <https://code.google.com/p/mudbus/>

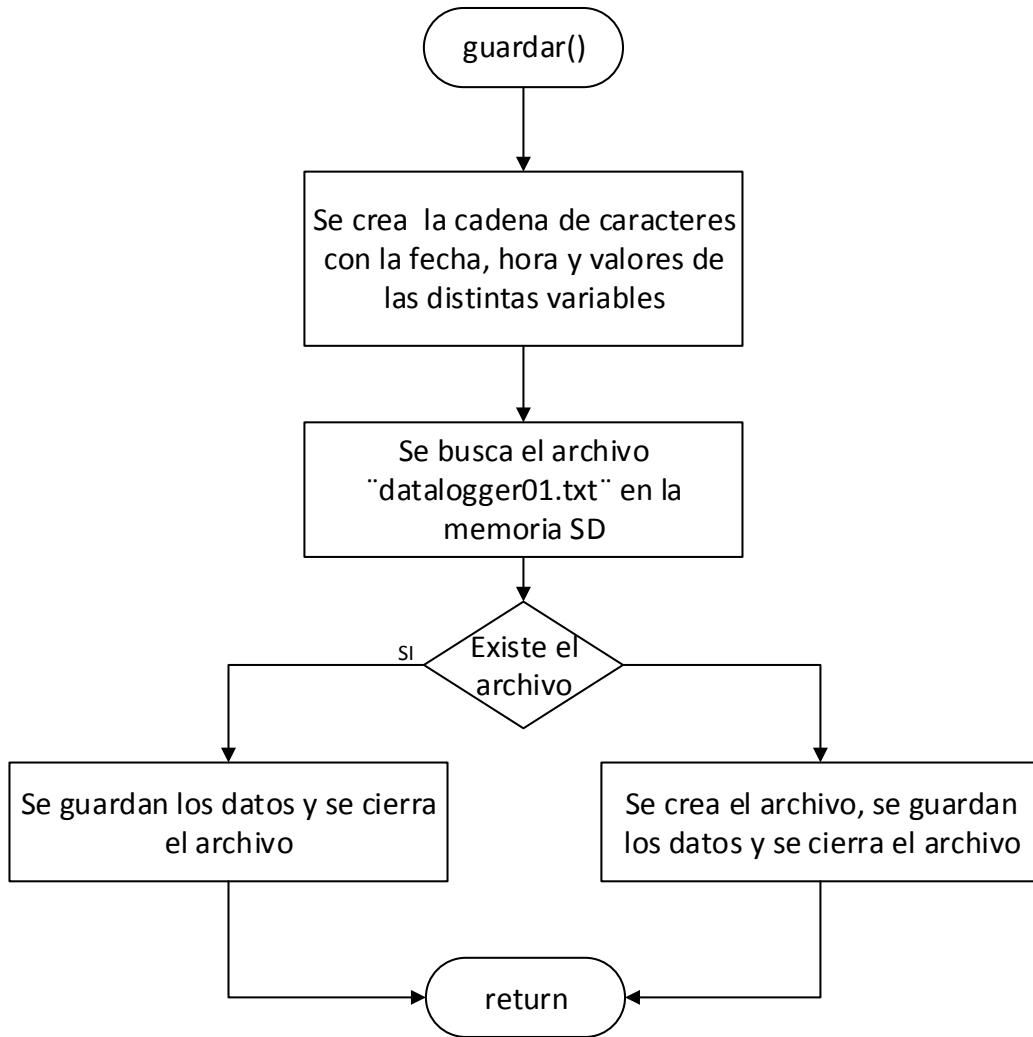


Figura 4.15 Diagrama de flujo del módulo del almacenamiento.

4.3.2 Módulo de adquisición de variables

Este módulo utiliza las bibliotecas RTClib, RHT22, y las funciones para los sensores de presión atmosférica BMP085, anemómetro y pluviómetro de la marca Peet Bros. Necesarias para capturar los valores de las variables meteorológicas que posteriormente se colocan en los registros de MUDBUS y se almacenan en la memoria microSD.

i. RHT03

Esta biblioteca fue desarrollada por Ben Adams en el 2011 bajo los términos de GNU, para utilizar los sensores digitales de temperatura modelo RHT22, RHT11 y RHT03 con tarjetas Arduino [2]. Consta de tres principales funciones:

- `readData`: Le solicita al sensor los valores de temperatura y humedad.
- `getTemperatureC`: El sensor devuelve el valor de temperatura en grados celcius.
- `getHumidity`: El sensor devuelve el valor de humedad relativa.

ii. BMP085

Para el sensor BMP085 se utilizaron las funciones del ejemplo de Jim Lindblom para la tienda virtual SparkFun bajo licencia MIT²² en el 2011. Para utilizar en dispositivo según el diagrama de flujo de la figura 3.4. Consta de siete principales funciones para calcular los valores de temperatura y presión atmosférica [5]:

- `bmp085Calibration`: Actualiza los coeficientes de calibración del dispositivo.
 - `bmp085GetPressure`: Devuelve el valor de presión atmosférica con base en los coeficientes de calibración.
 - `bmp085GetTemperature`: Devuelve el valor de temperatura con base en los coeficientes de calibración.
 - `bmp085Read`:
 - `bmp085ReadInt`: Lee el valor de dirección enviado por el microcontrolador.
 - `bmp085ReadUT`: Lee el valor sin compensar de temperatura.
- `bmp085ReadUP`: Lee el valor sin compensar de presión.

²²Licencias de software abierto que emplea el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Para más información: <http://opensource.org/licenses/MIT>

iii. RTC

La biblioteca RTClib, desarrollada por JeeLabs, bajo licencia GNU, es utilizada para comunicar las tarjetas Arduino con subsistemas que utilicen el circuito integrado DS1307 [11]. A continuación se resumen las principales funciones que utiliza:

- begin: Inicializa el dispositivo.
- adjust: Actualiza la fecha y hora con base en la fecha de la última compilación.
- now: actualiza los valores de fecha y hora a entregar.
- year: devuelve el año en el dispositivo.
- month: devuelve el mes en el dispositivo.
- day: devuelve el día en el dispositivo.
- hour: devuelve la hora en el dispositivo.
- minute: devuelve los minutos en el dispositivo.
- second: devuelve los segundos en el dispositivo.
- dayOfWeek: devuelve el día de la semana en el dispositivo.
- unixtime: devuelve el tiempo en segundos desde que se encendió el equipo.

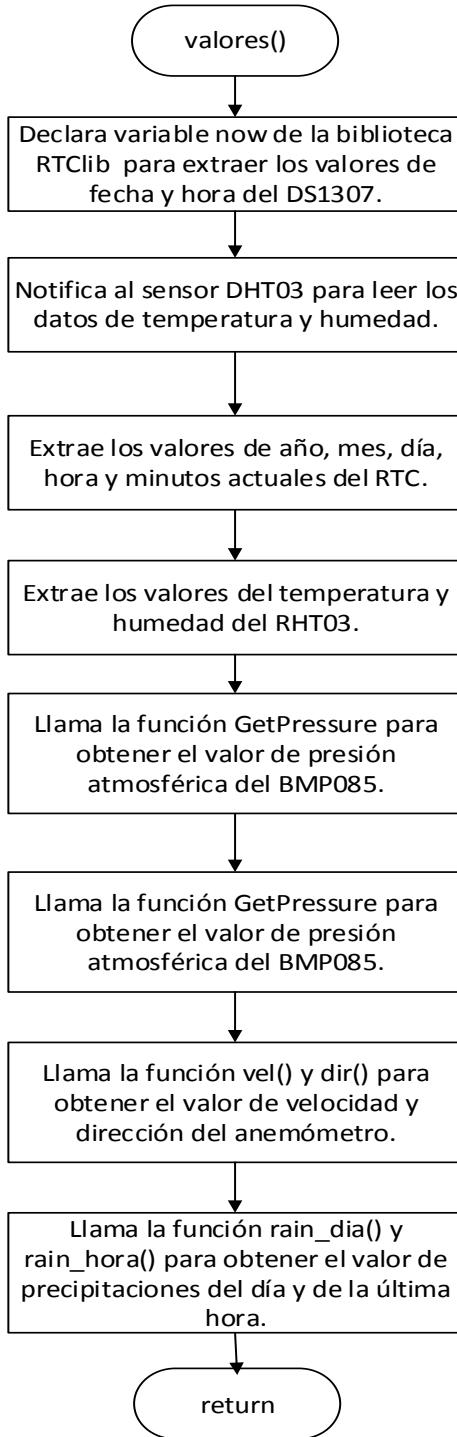


Figura 4.16 Diagrama de flujo del módulo de adquisición de variables.

4.3.3 Módulos de cálculo de velocidad y dirección del viento.

Para esta rutina, fue necesario el uso de las interrupciones externas de la tarjeta Arduino Mega 2560, en donde se declaró la interrupción 0 y 1 ubicadas en los pines 2 y 3 de la tarjeta respectivamente, para actuar cuando las señales procedentes de los reed switch del anemómetro pasan por flanco negativo “falling”.

La rutina “vel” mostrada en la figura 4.17 es utilizada para calcular la velocidad del viento, inicialmente mantiene el valor de velocidad calculado anteriormente, después verifica que el anemómetro esté girando con la interrogación “if conta_vel > 2”, de ser así calcula el periodo de la señal cuadrada “t” que genera el reed switch de velocidad, y calcula la velocidad del viento a partir de la ecuación 3, en donde “r” es el radio del anemómetro (9.27 cm).

$$v = \frac{2\pi r}{t} \quad \text{Ecuación 3}$$

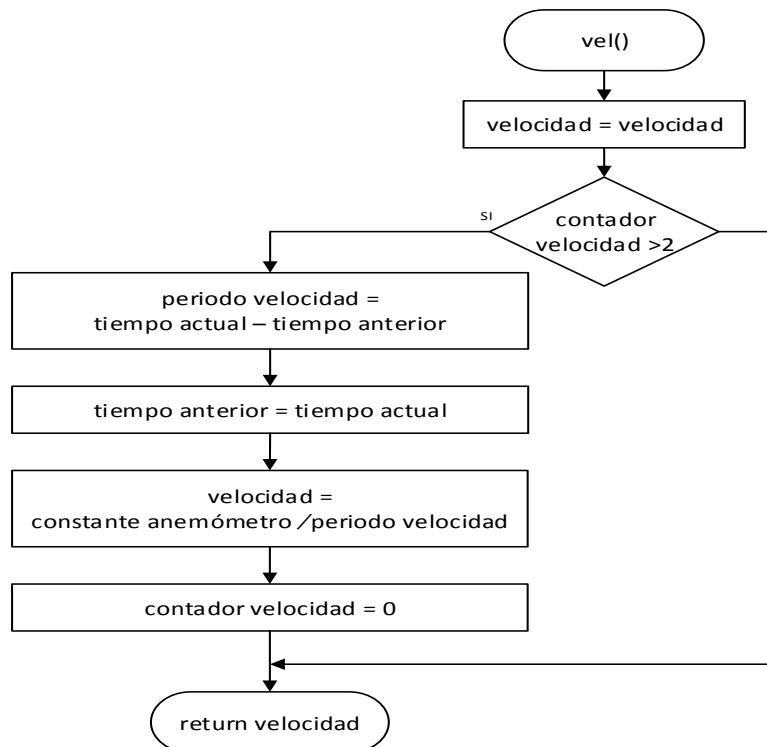


Figura 4.17 Diagrama de flujo del módulo de cálculo de velocidad.

Al momento de presentarse la interrupción, se llama a la función “VEL” de la figura 4.18, la cual suma una unidad a la variable “conta_vel” para asegurarse que el anemómetro ha realizado 2 giros como mínimo y actualiza el valor del tiempo en el que la señal de velocidad pasó por flanco negativo; esta variable es utilizada para calcular la dirección del viento.

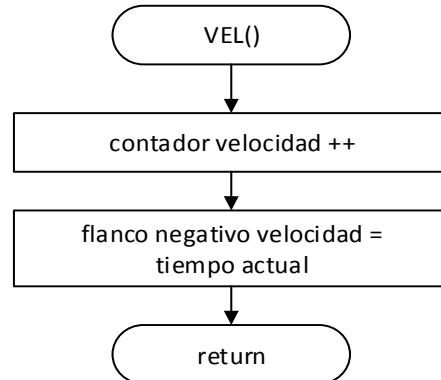


Figura 4.18 Diagrama de flujo del contador de velocidad.

La rutina encargada de calcular la dirección del viento, representada en la figura 4.19, mantiene último valor de dirección calculado al momento de iniciar, posteriormente verifica que el anemómetro se encuentra girando “if conta_dir > 2” para realizar el nuevo cálculo y que el valor de tiempo del flanco negativo de la velocidad sea mayor al tiempo del flanco negativo de la dirección “flanco_negativo_velocidad > flanco_negativo_direccion” con el fin de evitar que se traslapen los tiempos de las señales, ya que no siempre van a tener el mismo periodo .

De cumplirse con las condiciones antes mencionadas, la rutina calcula el desfase que existe entre los valores de tiempo en los que ambas señales pasaban por flanco negativo, para luego ser comparado con el periodo de la señal de velocidad. Al dividir el desfase existente entre ambas señales y el periodo de la señal de velocidad, se obtiene un valor entre 0 y 1, el cual se multiplica por 359° para tener un valor entre 0° y 359° .

Dependiendo del porcentaje obtenido entre el desfase de los flancos negativos de ambas señales y el periodo de la señal de velocidad, se van a tener los siguientes casos:

- a. 0% equivalente a 0° : Viento procedente del Norte.
- b. 25% equivalente a 90° : Viento procedente del Oeste.
- c. 50% equivalente a 180° : Viento procedente del Sur.
- d. 75% equivalente a 270° : Viento procedente del Este.

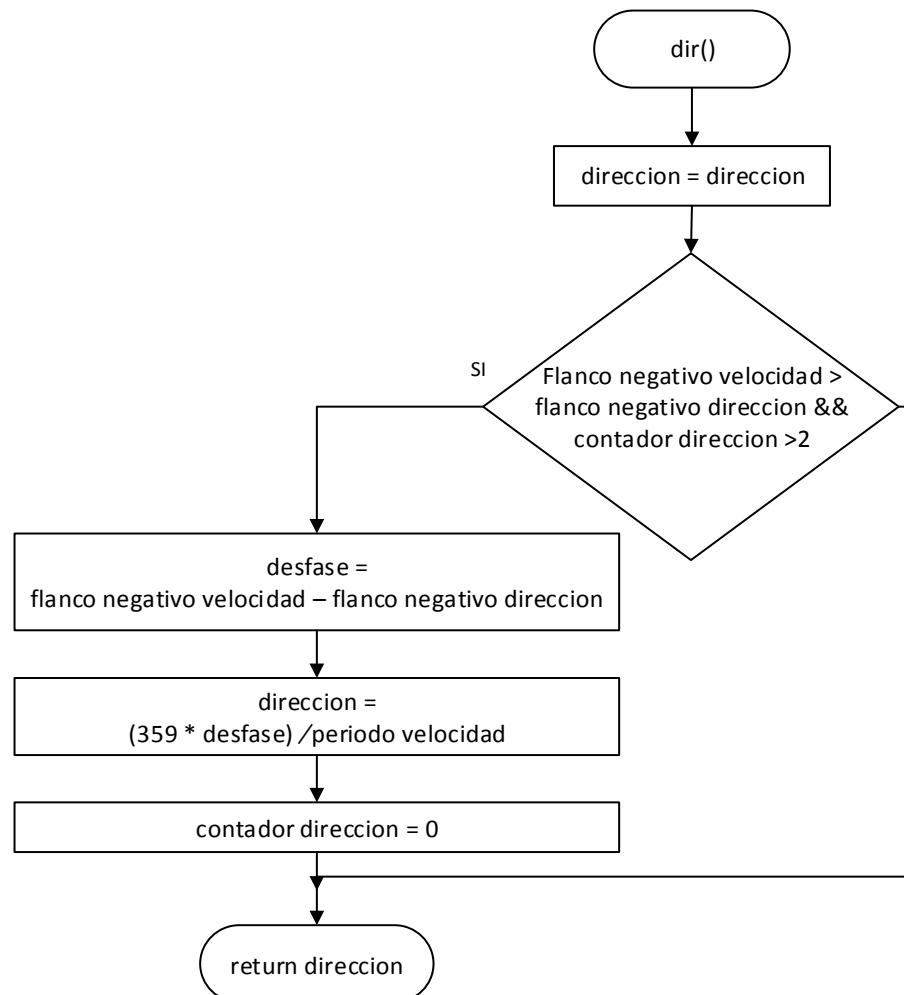


Figura 4.19 Diagrama de flujo del módulo de cálculo de dirección.

La interrupción está configurada para actuar cuando la señal pasa por flanco negativo, en el momento en que ocurre esta situación, se llama a la función “DIR” de la figura 4.20, la cual suma una unidad a la variable “conta_dir” para asegurarse que el anemómetro ha realizado 2 giros como mínimo y actualiza el valor del tiempo en el que la señal de dirección pasó por flanco negativo.

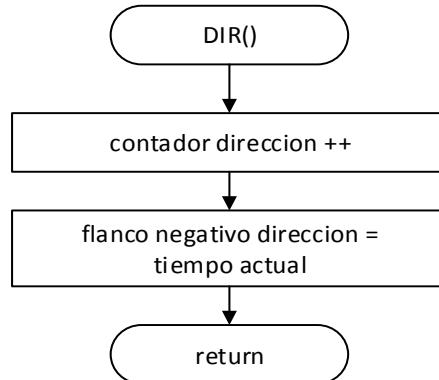


Figura 4.20 Diagrama de flujo del contador de dirección.

4.3.4 Módulo de cálculo de precipitaciones

En esta rutina, al igual que en las anteriores del viento, se requiere utilizar las interrupciones externas de la tarjeta, en este caso se asignó la interrupción 4, ubicada en el pin 19, para llamar a la función “LLUVIA” cuando la señal del pluviómetro pasa por flanco positivo.

Para tener los valores de las precipitaciones por hora y en el día, se diseñaron dos rutinas “rain_hora” y “rain_dia”, mostradas en las figura 4.21 y Figura 4.22 respectivamente.

En la rutina que calcula las precipitaciones de la última hora, inicialmente mantiene el último valor de precipitaciones calculado, después verifica si la hora actual coincide con el valor guardado en la variable “hora_actual”, de ser así, asigna y devuelve el valor de “contador_lluvia_hora” por medio de la variable “valor_lluvia”. En caso contrario, pone en cero las variables “contador_lluvia_hora” y “valor_lluvia”, y finalmente actualiza el valor de “hora_actual”.

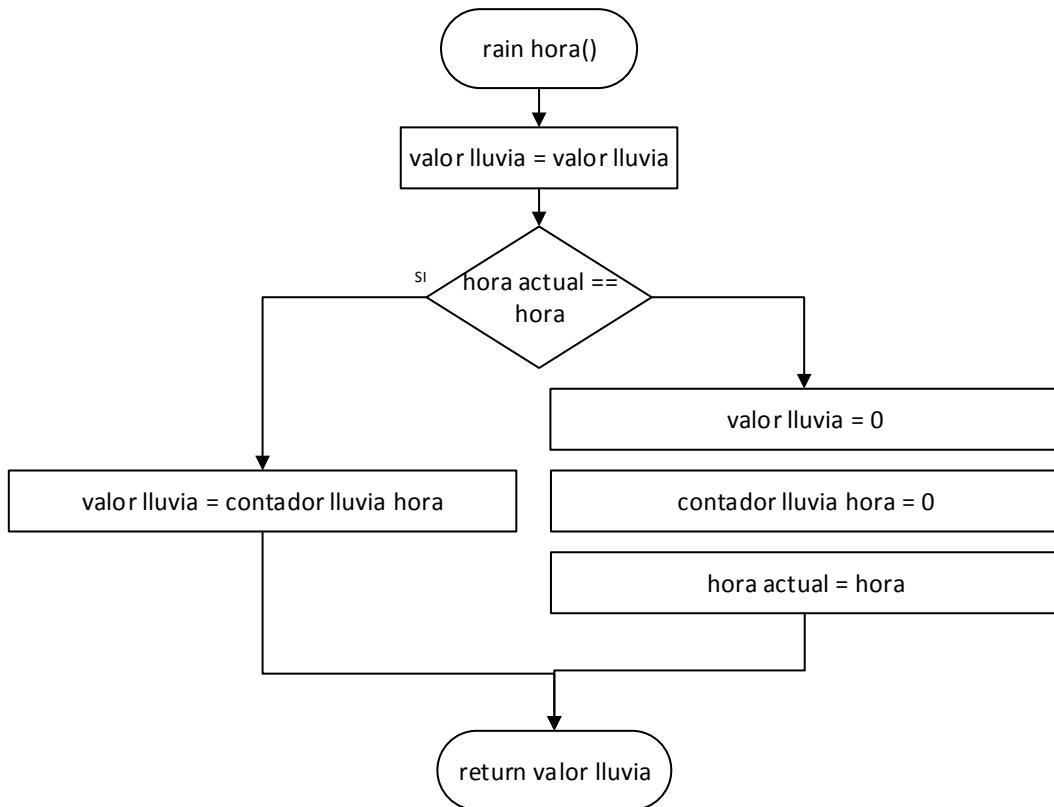


Figura 4.21 Diagrama del módulo de cálculo de precipitaciones por hora.

De forma similar a la rutina anterior, la rutina que calcula las precipitaciones del día, mantiene el último valor de precipitaciones calculado, después verifica si el día actual coincide con el valor guardado en la variable “dia_actual”, de ser así, asigna y devuelve el valor de “contador_lluvia_dia” por medio de la variable “valor_lluvia”. En caso contrario, pone en cero las variables “contador_lluvia_dia” y “valor_lluvia”, y finalmente actualiza el valor de “dia_actual”.

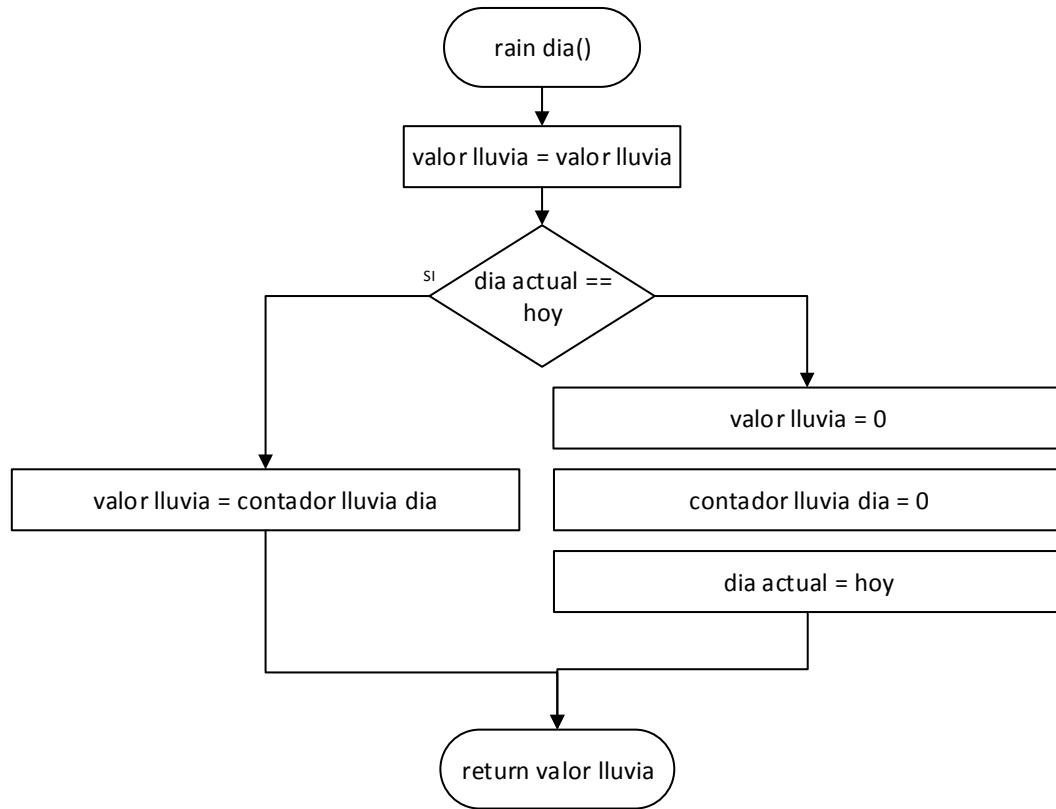


Figura 4.22 Diagrama de flujo del módulo de cálculo de precipitaciones por día.

La rutina “LLUVIA”, agrega una unidad a los contadores, “contador_lluvia_hora” y “contador_lluvia_dia” utilizados para las rutinas “rain_hora” y “rain_dia” respectivamente al momento de registrar que la señal del pluviómetro está pasando por flanco positivo.

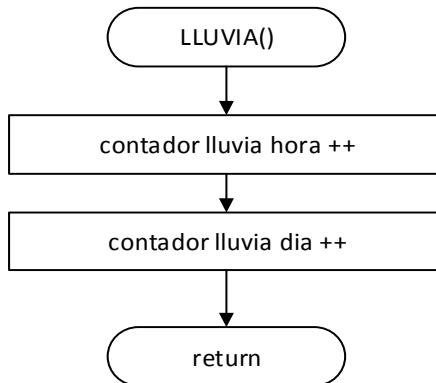


Figura 4.23 Diagrama de flujo del contador de precipitaciones.

4.4 Selección de puntos geográficos

4.4.1 Complejo hidroeléctrico Chocosuelas

Debido a la ubicación geográfica, la microcuenca del río La Vieja tiene influencia del clima procedente de la vertiente caribe como de la vertiente pacífica, por esta razón es que el departamento de gestión técnica, el cual forma parte de la subgerencia de producción y generación eléctrica de COOPELESCA, solicitó monitorear las condiciones meteorológicas de la microcuenta por ambos sectores.

El punto donde se instaló el prototipo va a monitorear la influencia de la vertiente caribe, ubicada en San José de la Montaña en las coordenadas CRTM: 458582 longitud oeste y 113941 latitud norte, en las cercanías del parque nacional Juan Castro Blanco, mientras que para el monitoreo de la vertiente pacífica se colocará otra estación meteorológica en San Juan de Lajas como se observa en figura 4.24, el punto específico está por definirse.

Por otra parte, se está considerando instalar una tercera estación meteorológica cerca de la toma de agua del complejo hidroeléctrico Chocosuelas, para poder relacionar los datos obtenidos aguas arriba y su influencia en la toma de agua.



Figura 4.24 Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en el complejo hidroeléctrico Chocosuelas.

4.4.2 Central Hidroeléctrica Cubujuquí

Para la central hidroeléctrica Cubujuquí se instalará la primera estación en las cercanías de la toma de agua de la planta, entre las coordenadas CRTM: 540430-542228 longitud oeste y 247860-252349 latitud norte.

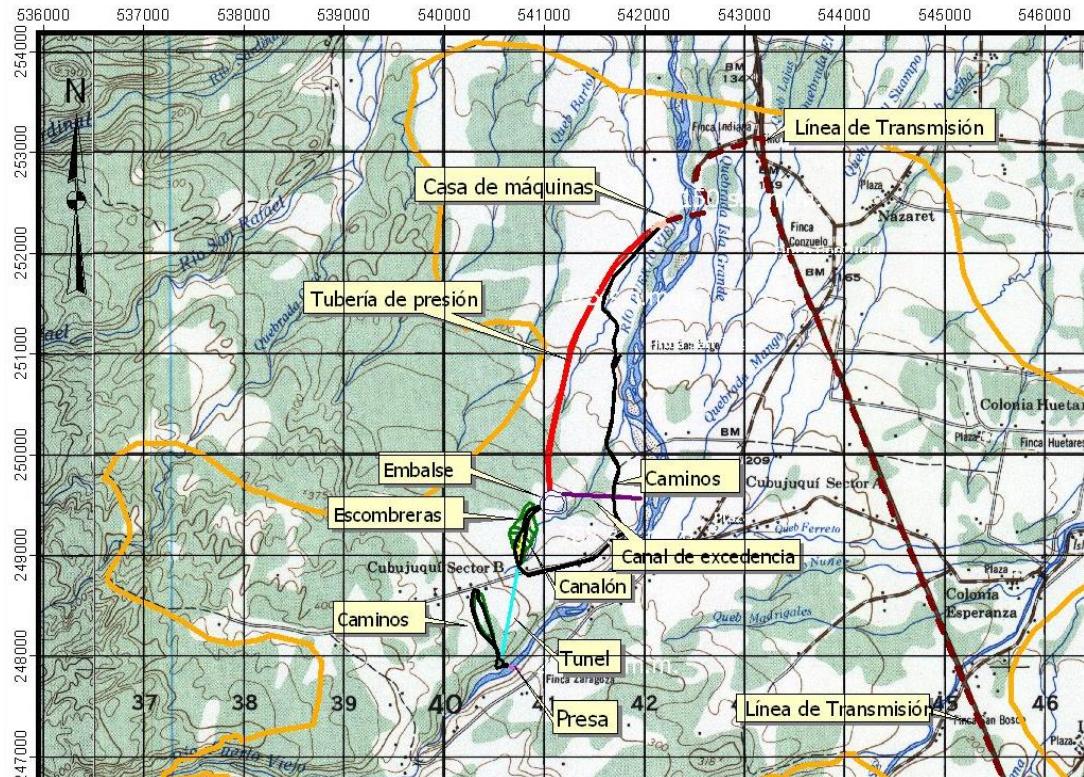


Figura 4.25 Ubicación geográfica de la primera estación meteorológica de Cubujuquí

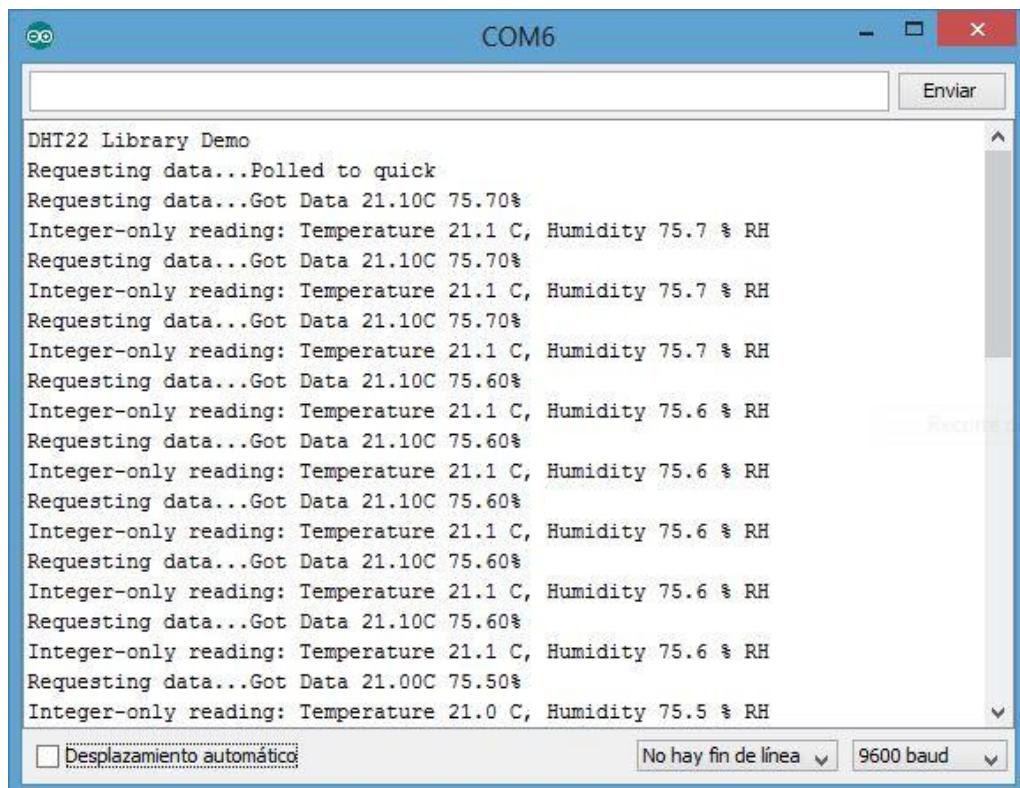
Capítulo 5 Análisis de resultados

5.1 Comunicación con los sensores

Inicialmente se realizaron pruebas de comunicación con los sensores meteorológicos, cada uno por aparte, para verificar su operación con la tarjeta Arduino Mega.

5.1.1 RHT03

La figura 5.1 muestra el resultado de ejecutar el ejemplo “Serial” de la biblioteca RHT03, el cual se encarga de verificar que existe comunicación entre el sensor y el microcontrolador, caso contrario, indica cual es el posible error que impide realizar la comunicación, como: dispositivo no presente, el reconocimiento está tardando mucho, error de sincronización y error de datos recibidos.



```
DHT22 Library Demo
Requesting data...Polled to quick
Requesting data...Got Data 21.10C 75.70%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.7 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.70%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.7 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.70%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.7 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.60%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.6 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.60%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.6 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.60%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.6 % RH
Requesting data...Got Data 21.10C 75.60%
Integer-only reading: Temperature 21.1 C, Humidity 75.6 % RH
Requesting data...Got Data 21.00C 75.50%
Integer-only reading: Temperature 21.0 C, Humidity 75.5 % RH
```

Figura 5.1 Prueba de comunicación con sensor RHT03.

Posteriormente se calculó el tiempo que tardaba la comunicación entre el microcontrolador y el sensor RHT03 al solicitar las variables de temperatura y humedad relativa, como se aprecia en la figura 5.2, el tiempo desde que el microcontrolador solicita las variables y el sensor responde es de 4.26ms, el cual está muy por debajo de los requerimientos establecidos por la cooperativa.

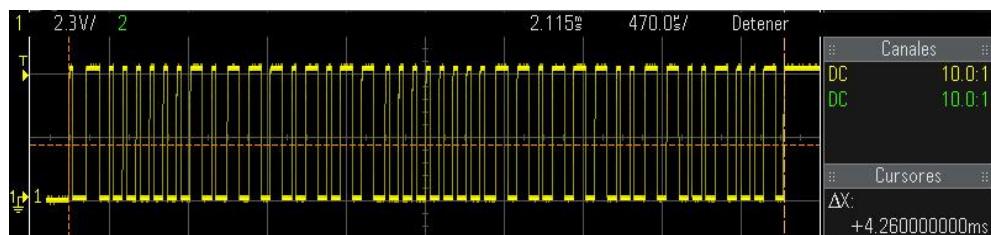


Figura 5.2 Tiempo de comunicación entre microcontrolador y sensor RHT03.

5.1.2 BMP085

Para verificar el funcionamiento del sensor BMP085, se ejecutó una rutina de verificación del sensor creada por el fabricante del mismo.

Dicha rutina muestra la configuración en la que se encuentra trabajando el sensor: bajo consumo de potencia, estándar, alta resolución y altísima resolución, los valores de los coeficientes de calibración seguido de los valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y presión atmosférica (Pa) calculados por el dispositivo.

The screenshot shows a Windows-style application window titled "COM6". The main text area displays sensor data. It starts with "Calibration data" followed by a series of parameters: ac1:7869, ac2:-1092, ac3:-14498, ac4:33612, ac5:24319, ac6:24682, b1:5498, b2:57, mb:-32768, mc:-11075, md:2432. This is followed by "--cal data end--" and a series of temperature-pressure pairs: Temp(C):233 Pressure(Pa):85812, Temp(C):233 Pressure(Pa):85816, Temp(C):233 Pressure(Pa):85813, Temp(C):233 Pressure(Pa):85810, Temp(C):233 Pressure(Pa):85815, Temp(C):233 Pressure(Pa):85813, Temp(C):233 Pressure(Pa):85813, Temp(C):233 Pressure(Pa):85814, Temp(C):233 Pressure(Pa):85814. At the bottom of the window, there are three buttons: "Desplazamiento automático" (unchecked), "No hay fin de línea" (selected), and "9600 baud" (selected).

Figura 5.3 Prueba de comunicación con el sensor BMP085.

Después de verificar que existía comunicación entre el dispositivo y el microcontrolador, se midió el tiempo que tardaba la transmisión de datos utilizando el protocolo I²C desde el momento en que el microcontrolador llamaba al dispositivo, solicitaba el valor de presión atmosférica y el sensor devolvía el valor calculado, como se observa en la figura 5.4, el tiempo total es de 542μs, muy por debajo de los requerimientos de la cooperativa.

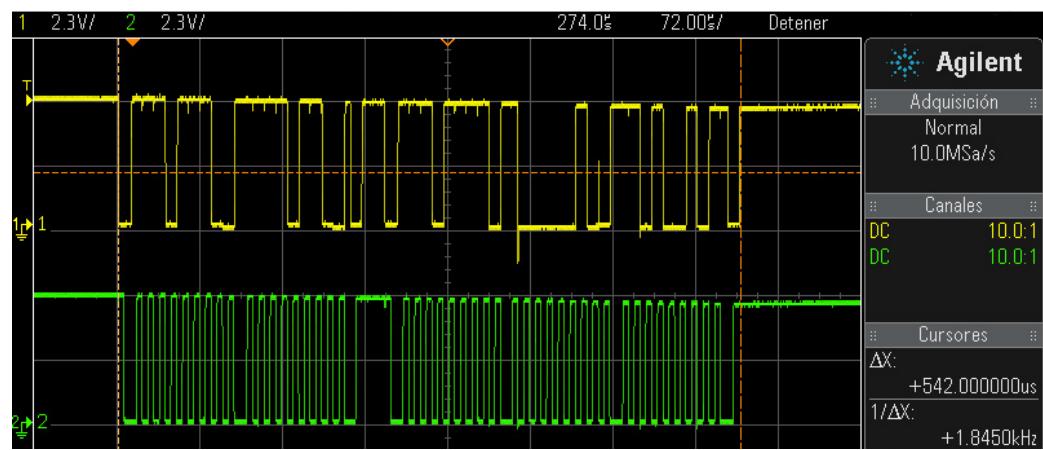


Figura 5.4 Tiempo de comunicación entre microcontrolador y sensor BMP085.

5.1.3 Pluviómetro

Para el pluviómetro de Peet Bros, inicialmente se realizó una pequeña rutina en la tarjeta Arduino Mega que actuara por medio de una interrupción externa en el momento en el que la señal del sensor pasara por flanco positivo, para los resultados mostrados en la figura 5.5, se utilizó un atomizador con agua para simular la presencia de lluvia, aumentando su intensidad gradualmente.

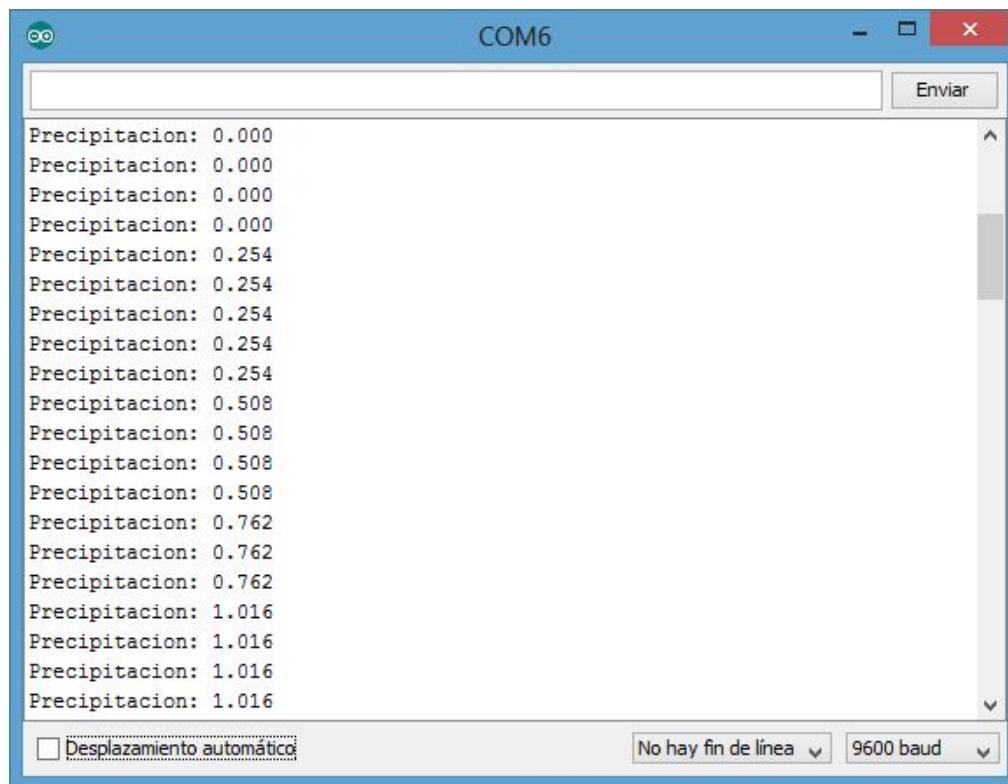


Figura 5.5 Prueba del módulo desarrollado para el pluviómetro Peet Bros.

5.1.4 Anemómetro

Para calibrar la dirección obtenida por la rutina 4.3.3 activada por interrupciones externas procedentes de las señales del anemómetro de Peet Bros fue necesario hacer pruebas en el laboratorio de la Escuela de Electrónica para verificar que funcionara de acuerdo con las especificaciones del sensor [18], a continuación en las siguientes figuras se muestra los resultados obtenidos por la rutina y su relación con las señales del anemómetro.

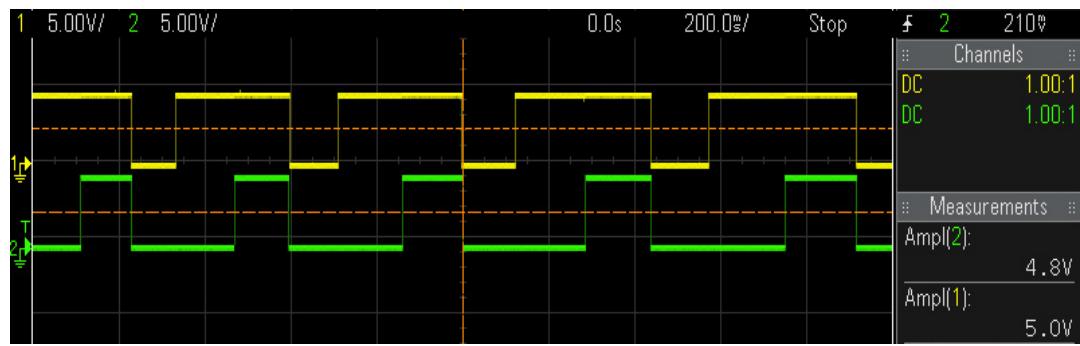


Figura 5.6 Comportamiento de la señal del anemómetro al apuntar al Norte.

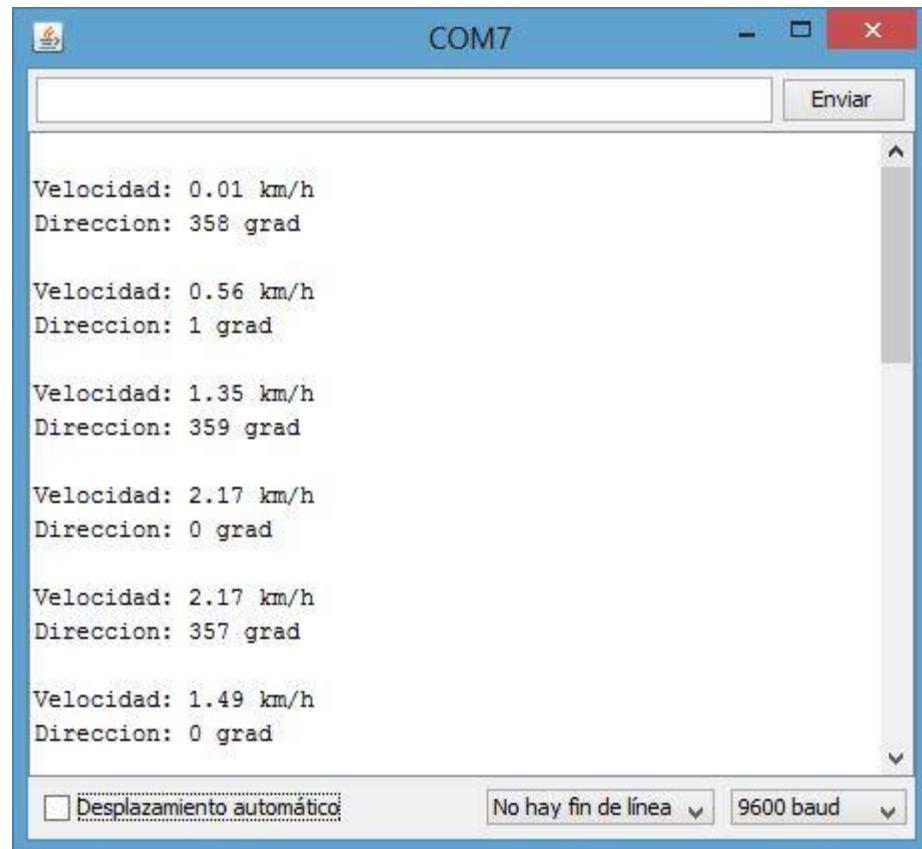


Figura 5.7 Cálculo de la rutina del anemómetro en dirección Norte.



Figura 5.8 Comportamiento de la señal del anemómetro al apuntar al Oeste.

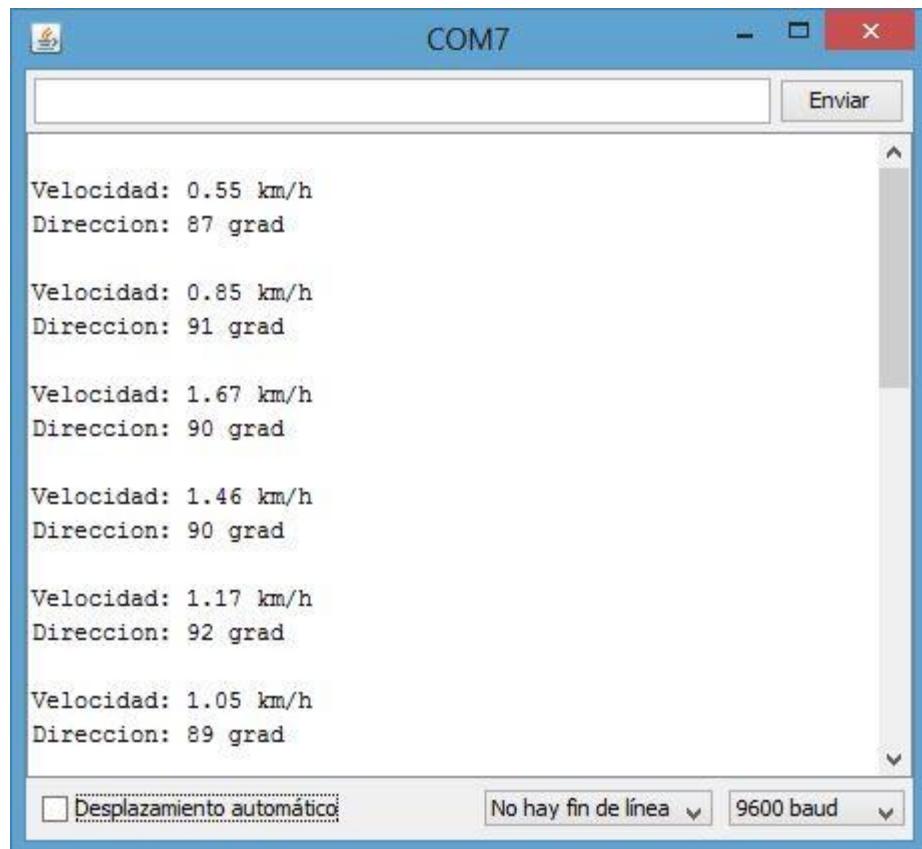


Figura 5.9 Cálculo de la rutina del anemómetro en dirección Oeste.

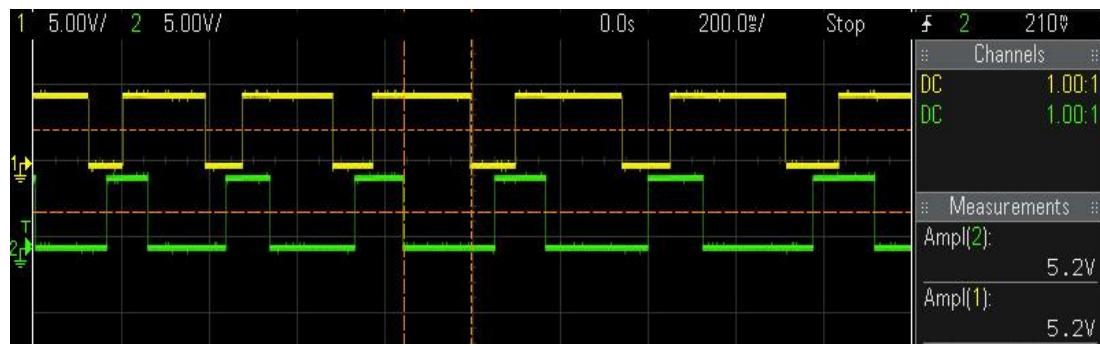


Figura 5.10 Comportamiento de la señal del anemómetro al apuntar al Sur.

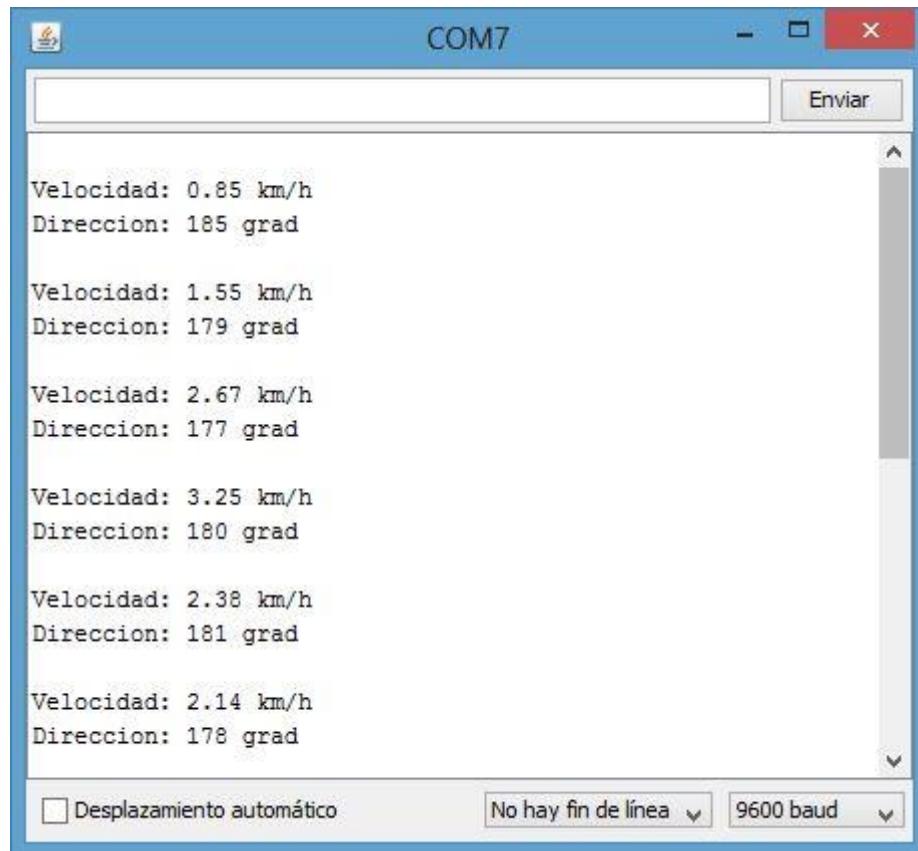


Figura 5.11 Cálculo de la rutina del anemómetro en dirección Sur.



Figura 5.12 Comportamiento de la señal del anemómetro al apuntar al Este.

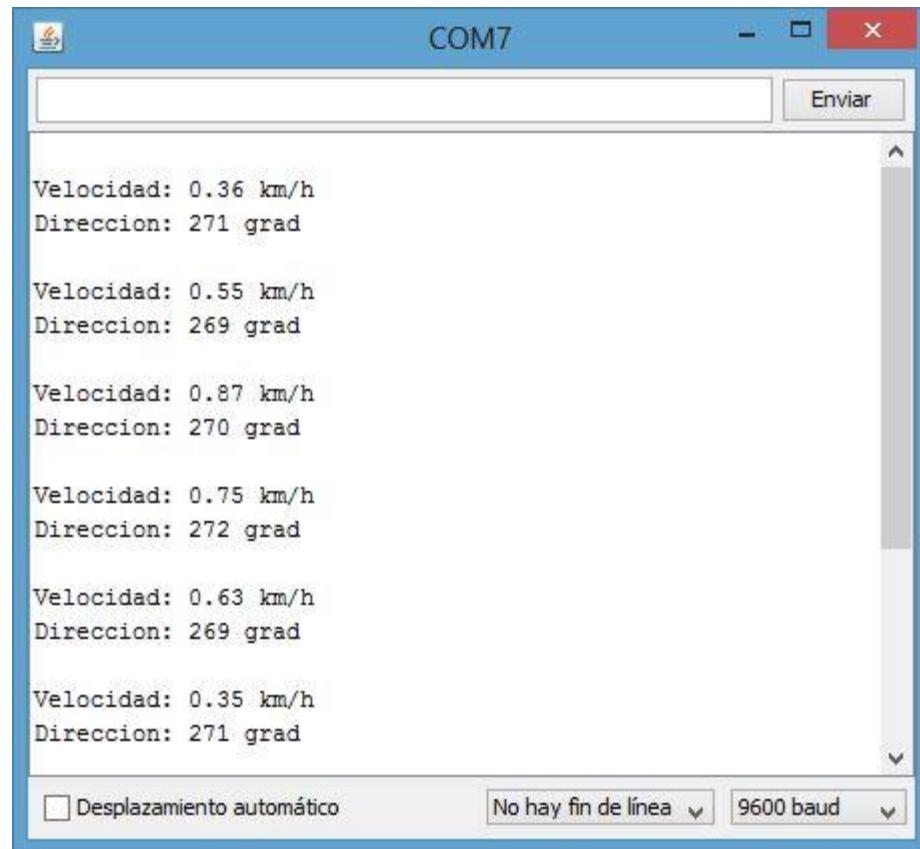


Figura 5.13 Cálculo de la rutina del anemómetro en dirección Este.

5.2 Operación del módulo de adquisición y procesamiento de las variables meteorológicas

5.2.1 Pruebas del reloj de tiempo real

Para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo y comunicación con la tarjeta Arduino Mega, se ejecutó la rutina ejemplo “ds_1307”, que forma parte de la biblioteca RTClib, la cual asigna al dispositivo la fecha y hora de la última vez en que se compiló el programa, seguidamente el dispositivo devuelve la fecha y hora actual, los segundos y días que han transcurrido desde el inicio de 1970 y la fecha dentro de siete días, como se puede observar en la figura 5.14.

```
2013/6/1 18:20:51
since midnight 1/1/1970 = 1370110851s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:21

2013/6/1 18:20:54
since midnight 1/1/1970 = 1370110854s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:24

2013/6/1 18:20:57
since midnight 1/1/1970 = 1370110857s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:27

2013/6/1 18:21:0
since midnight 1/1/1970 = 1370110860s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:30

2013/6/1 18:21:3
since midnight 1/1/1970 = 1370110863s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:33

2013/6/1 18:21:6
since midnight 1/1/1970 = 1370110866s = 15857d
now + 7d + 30s: 2013/6/8 18:21:36
```

Desplazamiento automático No hay fin de línea 57600 baud

Figura 5.14 Resultados de la rutina ds_1307.

Seguidamente se calculó el tiempo que tarda la comunicación entre el microcontrolador y el reloj de tiempo real al solicitar los valores: año, mes, día, hora, y minutos, necesarios para el registro ordenado de las variables meteorológicas capturadas. En la figura 5.15 se puede ver que el tiempo desde la solicitud de las variables por parte de la tarjeta Arduino Mega y la respuesta del dispositivo utilizando protocolo I2C es de 2.0ms aproximadamente.



Figura 5.15 Tiempo comunicación entre microcontrolador y RTC.

5.2.2 Pruebas de almacenamiento

Inicialmente se ejecutó el ejemplo “CardInfo” de la biblioteca SD de Arduino, para verificar que la tarjeta Arduino Mega pudiera leer la memoria externa microSD utilizada, así como tener acceso a los archivos presentes en la tarjeta. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.16, donde se puede ver el formato y tamaño de la memoria, los archivos que posee, dirección y tamaño de los mismos.

```
Initializing SD card...Wiring is correct and a card is present.

Card type: SDHC

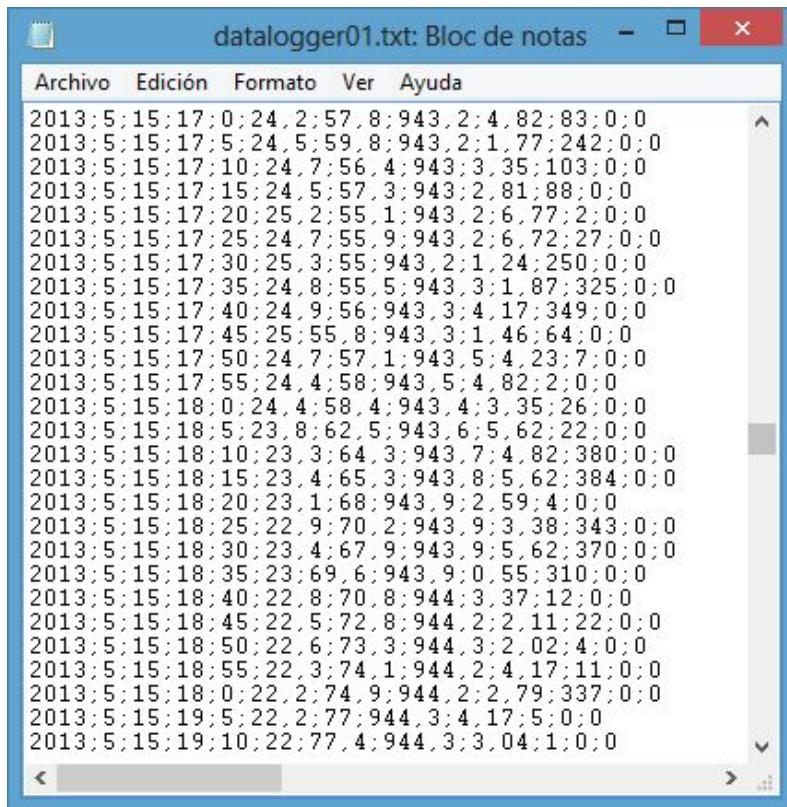
Volume type is FAT32

Volume size (bytes): 3650224128
Volume size (Kbytes): 3564672
Volume size (Mbytes): 3481

Files found on the card (name, date and size in bytes):
MULTIB-1/ 2013-05-02 18:45:54
    MENU/ 2013-05-02 18:45:54
        OTHER.CFG 2013-05-02 19:10:36 838
    ISOS/ 2013-05-02 18:45:54
    LDLINUX.SYS 2013-05-02 18:45:54 37376
    SYSLINUX.CFG 2013-05-02 18:45:58 880
    YUMI.PNG 2011-02-23 19:57:52 17227
    YUMI-C~1.TXT 2012-10-06 12:46:48 49212
    YUMI-R~1.TXT 2012-10-29 09:35:38 11444
    LICENSE.TXT 2012-04-04 13:42:38 18092
    VESAMENU.C32 2012-10-23 04:27:02 155792
    CHAIN.C32 2012-10-23 04:27:18 38696
    MEMDISK 2012-10-23 04:27:26 26140
```

Figura 5.16 Resultados del ejemplo CardInfo.

En la figura 5.17, se muestra los resultados de la rutina 4.3.1, encargada del almacenamiento ordenado cronológicamente de las variables meteorológicas en el archivo datalogger01.txt. Las mediciones son del día 15 de mayo, entre las 5:00pm y las 7:00pm, el archivo contiene por fila los valores: año, mes, día, hora, minutos, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, precipitaciones de la última hora y del día.



The screenshot shows a Windows Notepad window with the title bar 'datalogger01.txt: Bloc de notas'. The menu bar includes 'Archivo', 'Edición', 'Formato', 'Ver', and 'Ayuda'. The main content area displays a series of data entries, each consisting of a timestamp followed by several numerical values separated by commas. The data is scrollable, with visible scroll bars on the right and bottom.

Timestamp	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5	Value 6	Value 7	Value 8	Value 9	Value 10
2013:5:15:17:0:24,2;57,8;943,2;4,82;83;0;0										
2013:5:15:17:5:24,5;59,8;943,2;1,77;242;0;0										
2013:5:15:17:10:24,7;56,4;943,3;35;103;0;0										
2013:5:15:17:15:24,5;57,3;943,2;81;88;0;0										
2013:5:15:17:20:25,2;55,1;943,2;6,77;2;0;0										
2013:5:15:17:25:24,7;55,9;943,2;6,72;27;0;0										
2013:5:15:17:30:25,3;55;943,2;1,24;250;0;0										
2013:5:15:17:35:24,8;55,5;943,3;1,87;325;0;0										
2013:5:15:17:40:24,9;56;943,3;4,17;349;0;0										
2013:5:15:17:45:25,55,8;943,3;1,46;64;0;0										
2013:5:15:17:50:24,7;57,1;943,5;4,23;7;0;0										
2013:5:15:17:55:24,4;58;943,5;4,82;2;0;0										
2013:5:15:18:0:24,4;58,4;943,4;3,35;26;0;0										
2013:5:15:18:5:23,8;62,5;943,6;5,62;22;0;0										
2013:5:15:18:10:23,3;64,3;943,7;4,82;380;0;0										
2013:5:15:18:15:23,4;65,3;943,8;5,62;384;0;0										
2013:5:15:18:20:23,1;68;943,9;2,59;4;0;0										
2013:5:15:18:25:22,9;70,2;943,9;3,38;343;0;0										
2013:5:15:18:30:23,4;67,9;943,9;5,62;370;0;0										
2013:5:15:18:35:23,69,6;943,9;0,55;310;0;0										
2013:5:15:18:40:22,8;70,8;944,3;37;12;0;0										
2013:5:15:18:45:22,5;72,8;944,2;2,11;22;0;0										
2013:5:15:18:50:22,6;73,3;944,3;2,02;4;0;0										
2013:5:15:18:55:22,3;74,1;944,2;4,17;11;0;0										
2013:5:15:18:0:22,2;74,9;944,2;2,79;337;0;0										
2013:5:15:19:5:22,2;77;944,3;4,17;5;0;0										
2013:5:15:19:10:22,77,4;944,3;3,04;1;0;0										

Figura 5.17 Extracto del archivo datalogger01.txt

5.2.3 Operación del módulo

Como se observa en la figura 5.18, el datalogger desarrollado cuenta con la capacidad de capturar las variables de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica de los sensores RHT03 y BMP085 respectivamente, así como de calcular mediante las rutinas implementadas, los valores de velocidad y dirección del viento con base en las señales del anemómetro digital Peet Bros y calcular las precipitaciones de la última hora y del día con base en la señal enviada por el pluviómetro digital Peet Bros.

Por otra parte, el módulo permite almacenar de manera ordenada cronológicamente los valores de las variables meteorológicas, según la frecuencia requerida, en un archivo almacenado en una memoria extraíble para tener respaldo de

la información generada en caso de fallas en la comunicación de la estación con el Centro de Control. Como se puede ver en la figura, los valores de temperatura, humedad y presión se encuentran escalados por una magnitud de 10, para ajustarse a los registros enteros de la rutina MODBUS, en el sistema SCADA los valores al ser recibidos vuelven a ser escalados por 0.10.

Mismo caso ocurre con los valores de precipitaciones, el datalogger muestra la cantidad de veces que ha recibido un “1” del pluviómetro, posteriormente en el Centro de Control se escalan los valores por 0.254 para tener valores en mm/m².

The screenshot shows a terminal window titled "COM6". The text output is as follows:

```
microSD inicializada
Fecha: 1/6/2013
Hora: 19:2
Temperatura: 2250 C
Humedad: 645 %
Presion atm: 864 hPa
Velocidad: 0 km/h
Direccion: 0 grados
Precipitacion dia: 0 mm
Precipitacion hora: 0 mm

2013,6,1,19,2, 22.50, 6.45, 864.6, 0.0,      0,      0,      0

ARCHIVO datalogger01.txt guardado

Fecha: 1/6/2013
Hora: 19:2
Temperatura: 2250 C
```

At the bottom of the window, there are two buttons: "Desplazamiento automático" and "No hay fin de linea". To the right of these buttons are dropdown menus for "9600 baud" and "▼".

Figura 5.18 Funcionamiento del módulo de captura, cálculo y almacenamiento de las variables meteorológicas.

La figura 5.19 muestra el prototipo construido para la captura, cálculo y almacenamiento de la estación meteorológica. Como se puede observar, se colocó dentro de un gabinete pequeño especial para sistemas electrónicos que tenía la

cooperativa en bodega, para brindarle una mayor protección al equipo, los cables de alimentación, Ethernet y de los sensores entran por la parte inferior del gabinete.

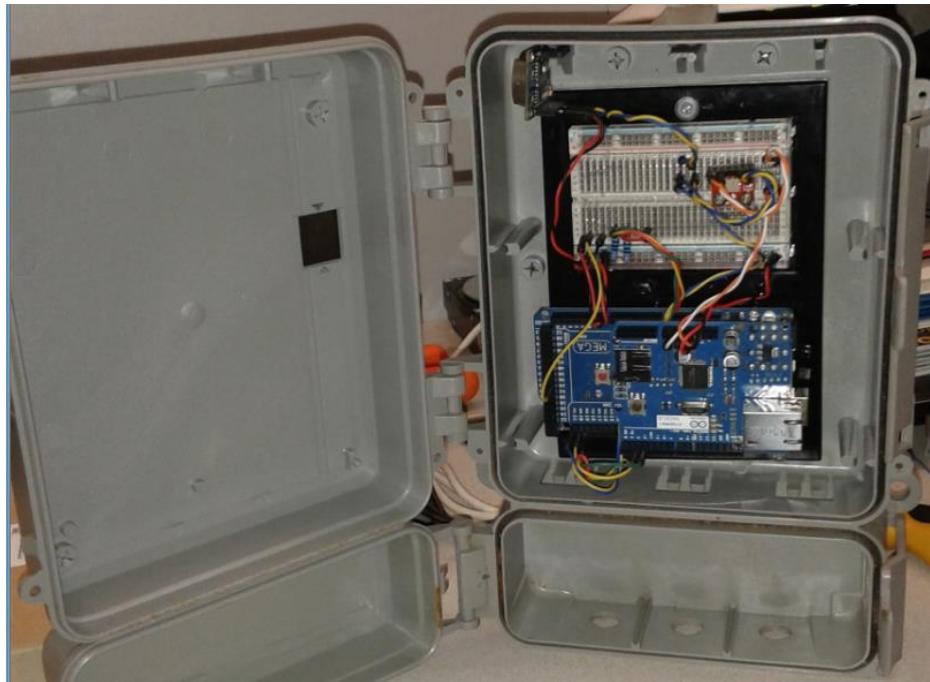


Figura 5.19 Moduló de captura y almacenamiento de la estación meteorológica.

5.3 Operación del módulo de transmisión

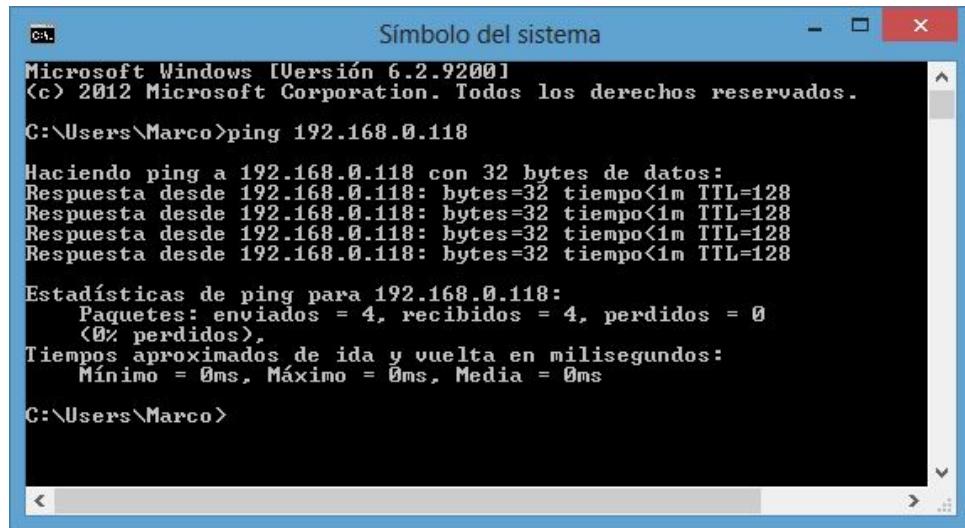
5.3.1 Comunicación de la tarjeta Ethernet

Para verificar el funcionamiento de la tarjeta de comunicación Arduino Ethernet, se realizaron unas pruebas de comunicación utilizando un router D-Link modelo DL-524. La tarjeta se configuró con los valores de la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores de configuración para prueba de tarjeta Arduino Ethernet.

Dirección IP	192.168.0.118
máscara de subred	255.255.255.0
puerta de enlace predeterminada	192.168.0.1

Como se observa en la figura 5.20, desde la computadora portátil es posible comunicarse con la tarjeta Arduino Mega a través de la placa Arduino Ethernet.



The screenshot shows a Windows Command Prompt window titled "Símbolo del sistema". The title bar includes the text "Microsoft Windows [Versión 6.2.9200]" and "(c) 2012 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.". The command entered is "C:\Users\Marco>ping 192.168.0.118". The output shows four successful responses from the IP address 192.168.0.118, each with 32 bytes and a TTL of 128. Below this, it provides statistics: 4 packets sent, 4 received, 0 lost (0% loss). It also shows approximate round-trip times with a minimum of 0ms, maximum of 0ms, and a mean of 0ms. The command prompt then returns to "C:\Users\Marco>".

Figura 5.20 Resultado de la comunicación con tarjeta Arduino Ethernet.

5.3.2 Pruebas iniciales del protocolo MODBUS

Posterior a verificar la comunicación entre el datalogger y el computador, se realizaron las pruebas de comunicación con protocolo MODBUS entre la tarjeta Arduino Mega y el computador utilizando un programa simulador de unidad master.

El programa utilizado es el Modbus Master Simulator²³ de Radzio, como lo dice su nombre, simula una unidad master para protocolo MODBUS RTU o MODBUS TPC/IP. Para efectos del proyecto se utilizó solo para MODBUS TPC/IP.

Se define la dirección IP del dispositivo esclavo con el que se desea establecer la comunicación, el tiempo entre los muestreos en milisegundos y el tiempo en

²³ Para más información: <http://en.radzio.dxp.pl/modbus-master-simulator/>

milisegundos de espera para reintentar comunicarse con el dispositivo en caso de no lograr conectarse en alguno de los muestreos (time out).

En la figura 5.21 se puede comprobar la comunicación entre el datalogger y la unidad master utilizando protocolo MODBUS. En los registros (holding registers) se puede observar que la tarjeta Arduino Mega envía exitosamente la fecha, hora y los valores capturados de las variables meteorológicas. En la tabla 5.2 se describe la variable que representa cada registro de MODBUS.

Tabla 5.2 Relación entre los números de registros de MODBUS y las variables que representan.

Número de Registro	Variable que representa
0	Año
1	Mes
2	Día
3	Hora
4	Minutos
5	Temperatura °C (x10)
6	Humedad Relativa % (x10)
7	Presión atmosférica hPa (x10)
8	Velocidad del viento km/h (x10)
9	Dirección del viento °
10	Precipitaciones última hora
11	Precipitaciones del día

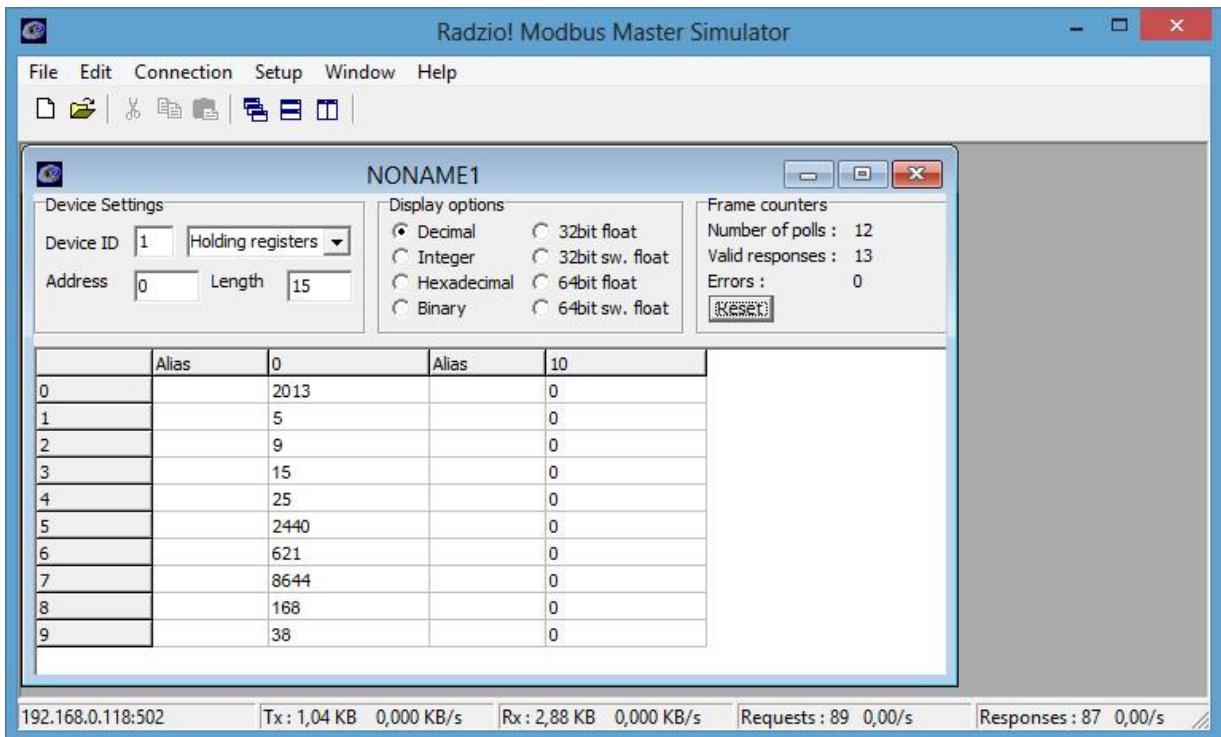


Figura 5.21 Prueba de comunicación del datalogger mediante protocolo MOBUS.

5.4 Comunicación con Survalent Technology

5.4.1 Creación del perfil del datalogger

A partir de este apartado se trabajó con apoyo de los ingenieros a cargo del sistema SCADA de COOPELESCA.

Es importante mencionar que las primeras pruebas de comunicación entre el prototipo y el sistema SCADA, se realizaron con el datalogger conectado a la red del Centro de Control mediante un cable típico RJ-45.

Inicialmente se creó un nuevo perfil de hardware para el datalogger desarrollado, ya que Survalent no cuenta con información de dispositivos Arduino. Utilizando la aplicación IED Wizard de Survalent representada en la figura 5.22, se le asigna un nombre al nuevo IED, una breve descripción del equipo, el tipo de protocolo de comunicación que utilizará. Para el prototipo, el nombre del IED es: "ESTACION_01".

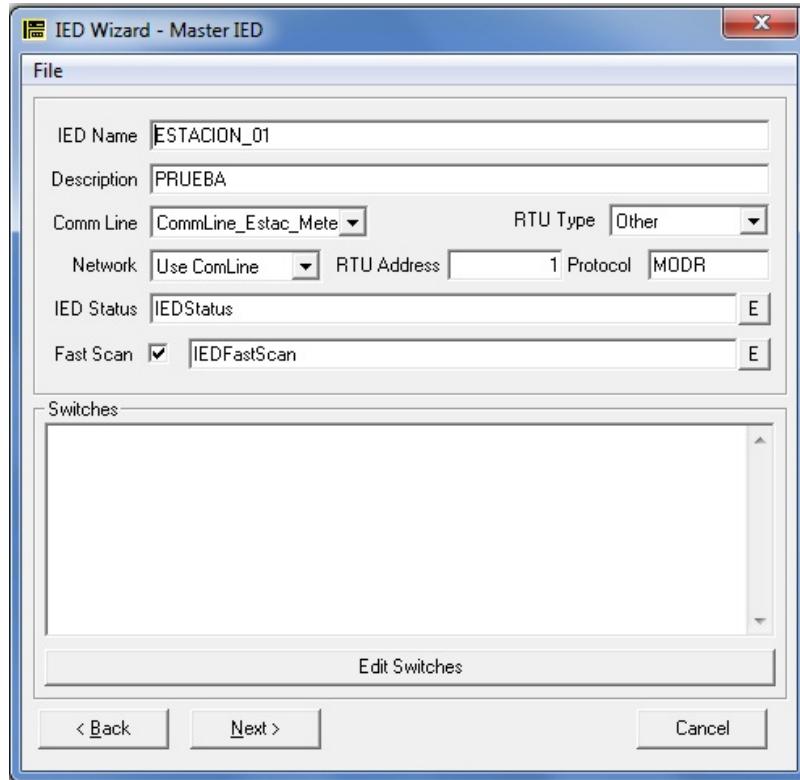


Figura 5.22 Ventana 1 del IED Wizard.

En la siguiente ventana del IED Wizard, mostrada en la figura 5.23, se agrega el nombre del fabricante, modelo y versión del dispositivo, además del nombre que con el que se identificará el dispositivo en el sistema SCADA. Al prototipo se le asignó el nombre: “ESTACION_01”.

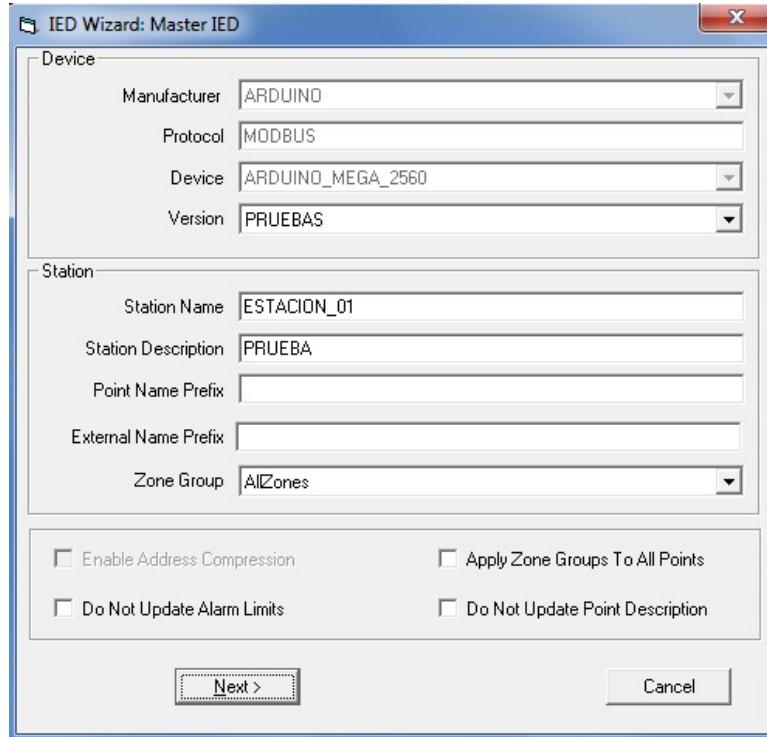


Figura 5.23 Ventana 2 del IED Wizard.

En la ventana siguiente del IED Wizard, mostrada en la figura 5.24, se le asigna la dirección IP del dispositivo y el puerto por el cual se accederá. Al prototipo se le asignó la dirección IP 172.16.3.207 para operar dentro de la red del Centro de Control de COOPELESCA, el puerto 502 es el preestablecido por la biblioteca MUDBUS.

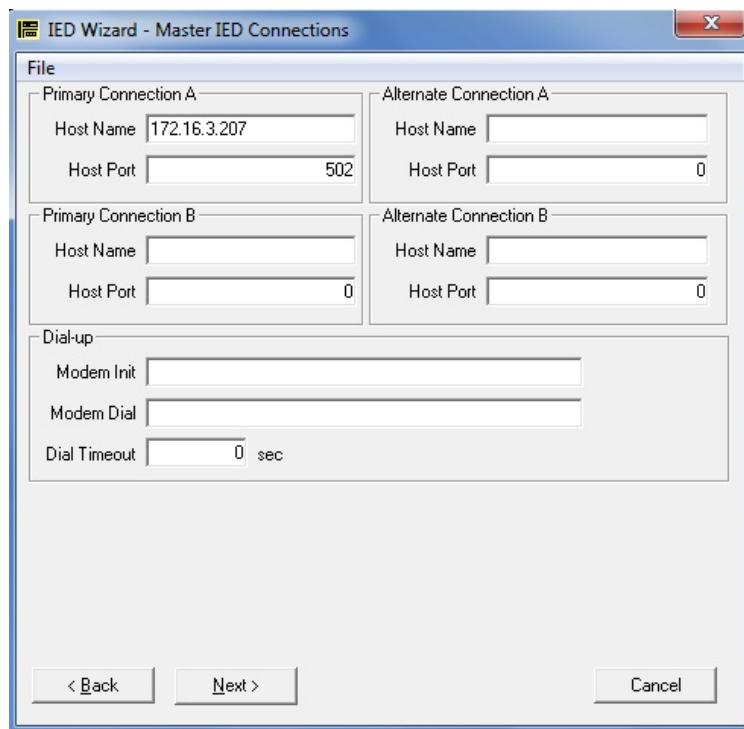


Figura 5.24 Ventana 3 del IED Wizard.

Después de crear el nuevo dispositivo en el SCADA, se puede ver en el SCADA Explorer de Survalent Technology mostrado en la figura 5.25, que la ESTACION_01 ya aparece en las líneas de comunicación del sistema.

ID	Name	Description	Protocol	Active
73	CommLine_Estat_Meteorolog_01	Línea de Comunicación Prueba Estación Meteorologica	MODR	+
72	CommLine_TCP_Rec_Hidro_Cerro	Línea de Comunicación Rec hidroceras Cerro Cortez en TCP	DNP	+
71	CommLine_TCP_Hidro_Ticofut	Línea de Comunicación Hidro Ticofut en TCP	DNP	+
69	CommLine_TCP_Palm_Marach	Línea de Com Rec Pal Mar en TCP	DNP	+
63	CommLine_TCP_Palm_Marina	Línea de Com Rec Pal Mar en TCP	DNP	+
68	CommLine_KIODO	Línea de Comunicación Kiodo	DNP	+
67	CommLine_ION_SubProv_Cubagua	Línea de Comunicación Sub Prov ION Puerto Vzla Cubagua	MODR	+
66	CommLine_ION_SubProv_SubPilar	Línea de Comunicación Sub Prov ION Puerto Vzla Pilar	MODR	+
65	CommLine_ION_SubProv_SudPilar	Línea de Comunicación Sub Prov ION Sud Pilar	MODR	+
64	CommLine_ION_SubProv_SubMuelle	Línea de Comunicación Sub Prov ION Sub Muelle	MODR	+
63	SICAM_PAS_Proveijo	Línea de Comunicación SicanSubestacion Proveijo	DNP	+
62	Sub_Proveijo_Circuito_Proveijo	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Proveijo	MODR	+
61	Sub_Proveijo_Circuito_Chilamate	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Chilamate	MODR	+
60	Sub_Proveijo_Circuito_Venezuelanas	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Venezuelanas	MODR	+
59	Sub_Proveijo_Circuito_Valle	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Valle	MODR	+
58	Sub_Proveijo_Circuito_Venezias	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Venezias	MODR	+
57	Sub_Proveijo_Circuito_Delicias	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Delicias	MODR	+
56	Sub_Proveijo_Circuito_Pital	Línea de Comunicación Sub Proveijo Circuito Pital	MODR	+
55	SICAM_PAS_Pital	Línea de Comunicación SicanSubestacion Pital	DNP	+
54	Domotic_Regulador01	Línea de Comunicación Regulador01	DNP	+
53	CommLine_Pivonat_Srviclient	Línea de Comunicación rededor monofásico	DNP	+
52	SICAM_PAS_Muelle	Línea de Comunicación SicanSubestacion Muelle	DNP	+
51	ICCP_CL_B	Prueba ICCP B	ICCP	
50	Comm_Shelter_CD	Prueba Comm_Shelter_CD	MODR	
49	ICCP_Conline_A	Prueba ICCP A	ICCP	+
48	Sub_PB_Venezia	LíneaCom Sub Caribe blanco medidor 2	MODR	+
47	Sub_PB_Virgen	Línea de Comunicación sub Caribe blanco medidor 1	MODR	+
46	SNMP_Muelle	SNMP	SNMP	
45	Sub_Muelle_Sub_PB	Línea de Comunicación Sub Muelle - Sub PB	MODR	+
44	Sub_Muelle_Circuito_Ranchon	Línea de Comunicación Sub Muelle Circuito Ranchon	MODR	+
43	Sub_Muelle_Circuito_Mifrey	Línea de Comunicación Sub Muelle Circuito Mifrey	MODR	+
42	Sub_Muelle_Circuito_Gober	Línea de Comunicación Sub Muelle Circuito Gober	MODR	+
41	Sub_Muelle_Circuito_SantaRosa	Línea de Comunicación Sub Muelle Circuito Santa Rosa	MODR	+
40	CommLine_Choclo_Probea	Línea de Comunicación prueba del Triángulo	DNP	+
39	CommLine_Proveijo	Línea de Comunicación Proveijo RD9	MODR	+

Figura 5.25 Communication Lines, SCADA Explorer de Survalent Technology.

Posteriormente se establecieron las características de la comunicación entre el datalogger y el SCADA.

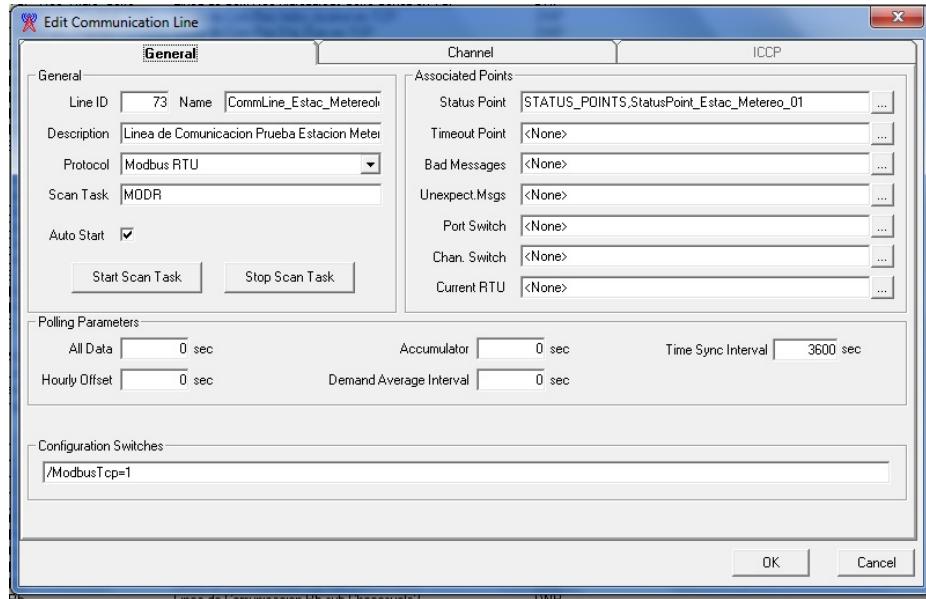


Figura 5.26 Ventana 1 de configuración de la comunicación con el prototipo.

Como se observa en la figura 5.26, primero se establece el nombre de la línea de comunicación, el tipo de protocolo que utiliza el dispositivo y el estado de la comunicación con el dispositivo. Para el prototipo, a la línea de comunicación se le asignó el nombre: “CommLine_Estac_Meteorologica” con protocolo MODBUS TPC/IP.

En la siguiente pestaña de configuración de la comunicación, representada en la figura 5.27, se especifican los tiempos de muestreo, los tiempos de respuesta altos y bajos del dispositivo, el tiempo máximo que puede pasar el dispositivo si comunicarse con el SCADA y la cantidad de veces que el sistema reintentará comunicarse con el dispositivo antes de indicar como desconectado al dispositivo.

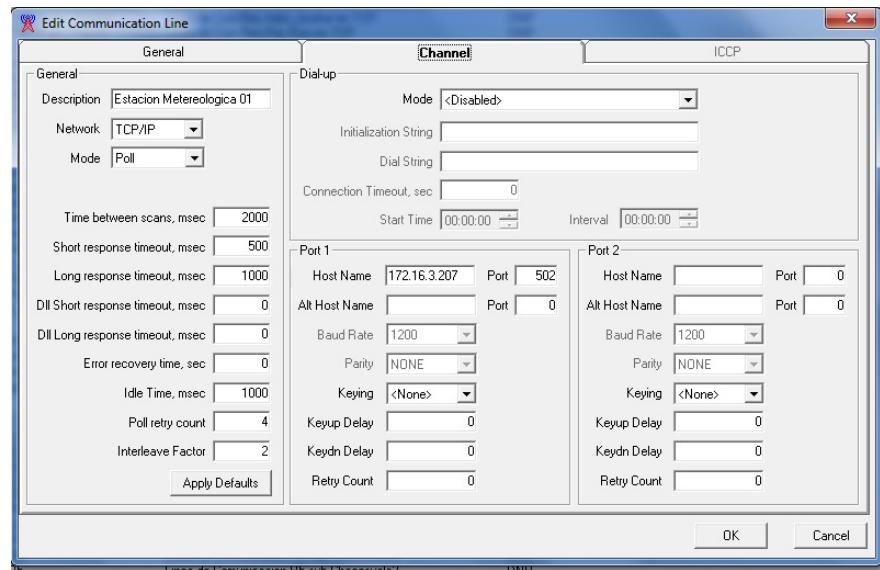


Figura 5.27 Ventana 2 de configuración de la comunicación con el prototipo.

Para la comunicación con el prototipo, se configuró la línea de comunicación para muestrear el dispositivo cada 2 segundos, 1 segundo máximo de no recibir respuesta por parte del dispositivo y 4 intentos para re establecer la comunicación.

5.4.2 Almacenamiento histórico de las variables meteorológicas.

Para el almacenamiento histórico de los datos en servidor del SCADA, se ligó un archivo llamado Estacion_01 al prototipo, como se muestra en la figura 5.28.

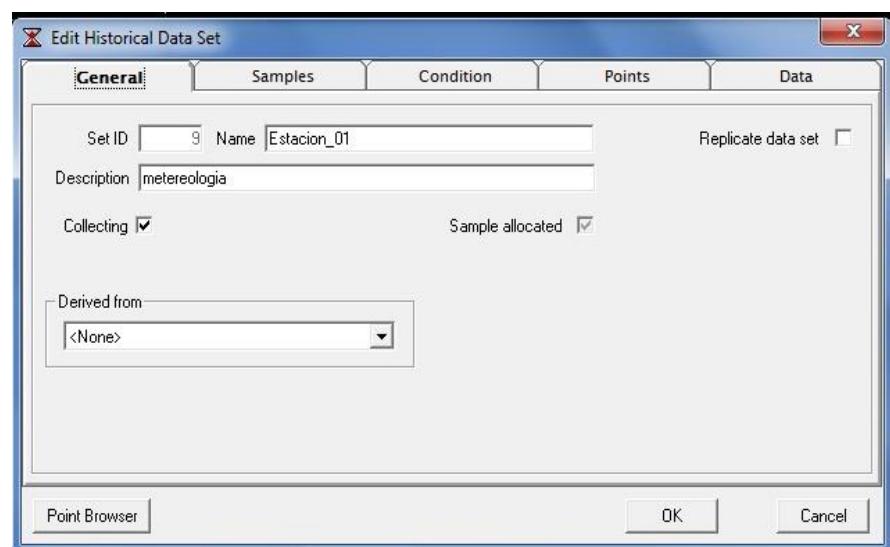


Figura 5.28 Ventana 1 de configuración de los datos históricos del prototipo.

El archivo histórico se configuró para guardar los valores de las variables meteorológicas en intervalos de 5 minutos como se aprecia en la figura 5.29.

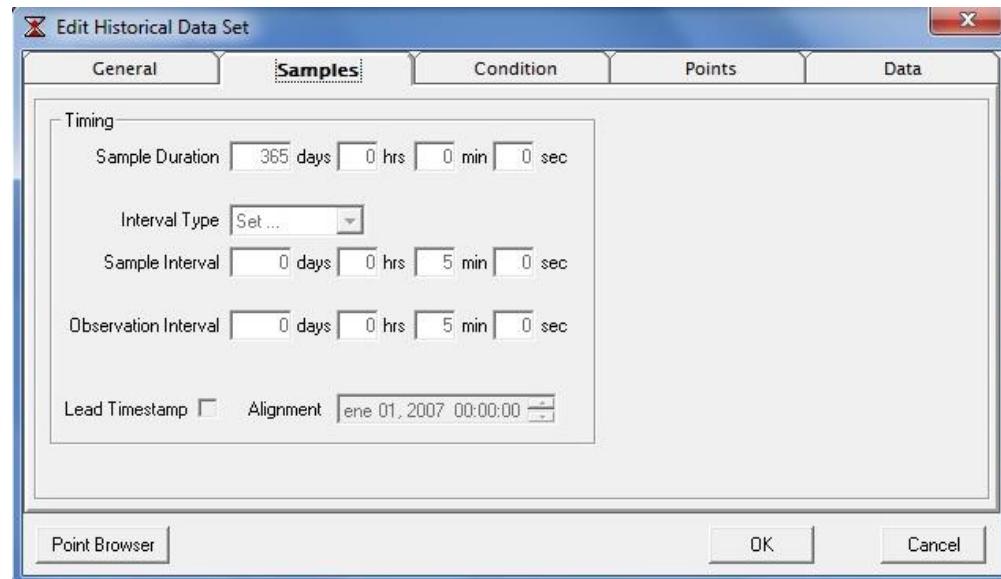


Figura 5.29 Ventana 2 de configuración de los datos históricos del prototipo.

En la figura 5.30 se muestra un ejemplo de los valores de las variables meteorológicas registradas el día 21 de mayo de 2013 a las 11:45 am.

may 21, 2013 11:45:00					
Point	Qualifier	Value	Condition	Date	Time
ESTACION_01.TEMP	<None>	27.10		may 21, 2013	11:45:00
ESTACION_01.HUMEDAD	<None>	71.40			
ESTACION_01.PRESION	<None>	942.40			
ESTACION_01.VEL	<None>	3.07			
ESTACION_01.DIREC	<None>	322.00			
ESTACION_01.LLUVIA_HORA	<None>	0.00			
ESTACION_01.LLUVIA_DIA	<None>	0.00			

Figura 5.30 Ventana 3 de configuración de los datos históricos del prototipo.

5.5 Interfaz gráfica

Para acceder a la pantalla del prototipo de la estación meteorológica, se agregó un botón al menú principal del sistema SCADA con el nombre: “METEOROLOG_01” como se muestra en la figura 5.31.

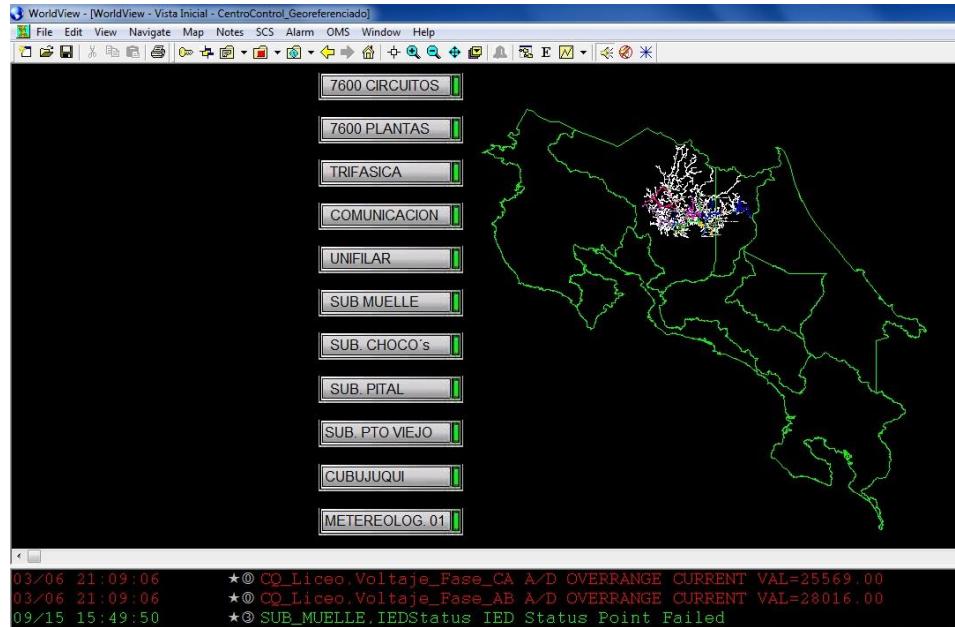


Figura 5.31 Menú principal del SCADA de COOPELESCA con acceso al prototipo.

La pantalla de la estación meteorológica, mostrada en la figura 5.32 basada en los acuerdos del SRS (ver apéndice 1), cuenta con un título que establece el lugar donde se encuentra instalada, en este caso para las pruebas de comunicación se le denominó: “PRUEBA ESTACION METEOROLOGICA”. Por otra parte cuenta con una línea de texto que indica el estado de la comunicación con la estación meteorológica, al mantenerse el enlace con la estación, se mantiene un texto color verde y la frase: “BUENA COMUNICACION”.

Seguidamente, los valores de las variables meteorológicas enviados por el datalogger, debidamente escalados y con sus respectivas unidades.

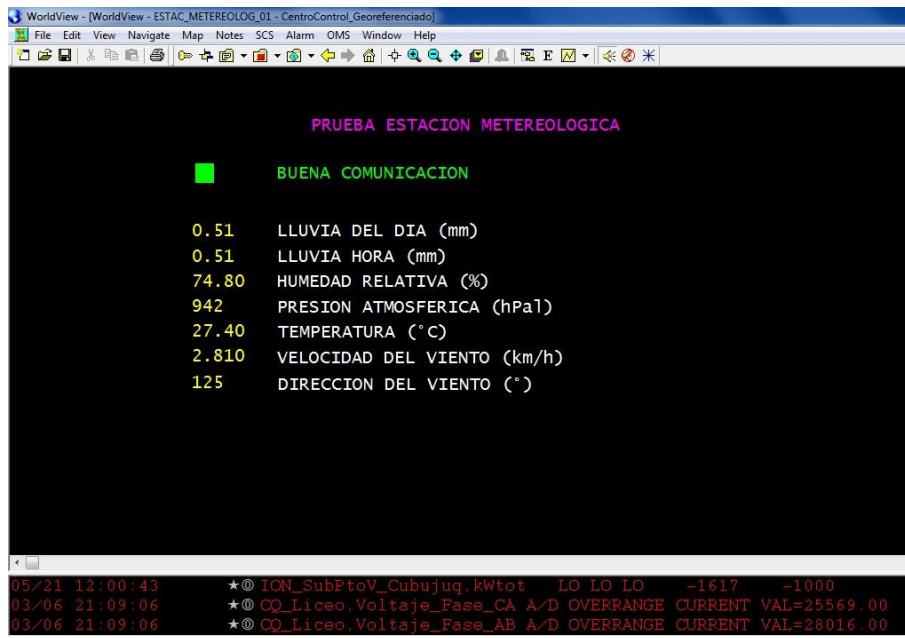


Figura 5.32 Pantalla principal del prototipo

La figura 5.33 representa un fallo en la comunicación con la estación meteorológica, se puede observar como la linea de texto que informa del estado del enlace, cambia a un color rojo con la frase: “MALA COMUNICACION”. Para simular la falla se desconectó el cable RJ-45 de la tarjeta Arduino Ethernet.

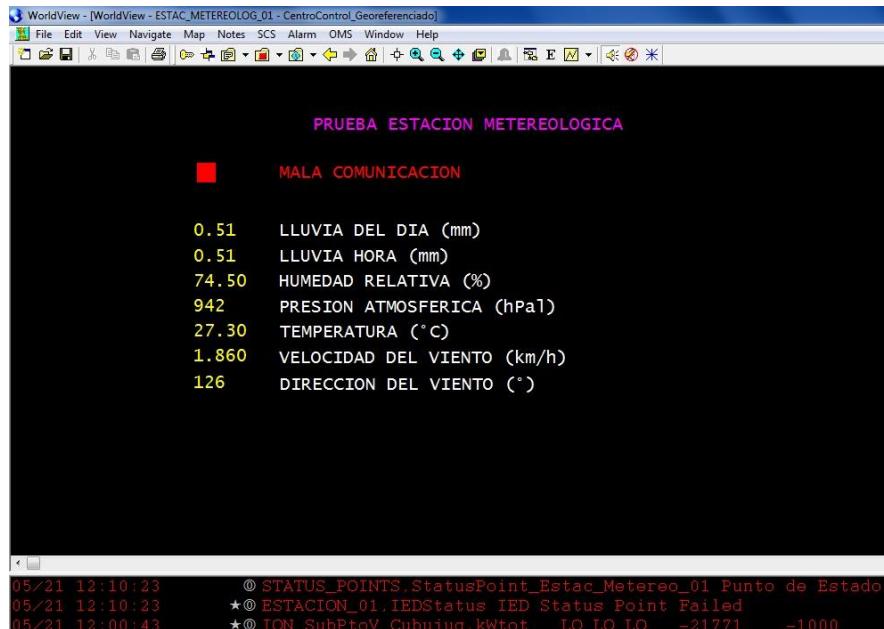


Figura 5.33 Simulación de falla en la comunicación con el prototipo.

Por otra parte, se puede ver en la figura 5.34, la lista de eventos del sistema SCADA, al momento de desconectar el prototipo de la red de control de la cooperativa y despues de reintentar 4 veces re establecer la comunicación con el dispositivo, el sistema Survalent reporta que perdió el enlace con la estación meteorológica, en la línea “ESTACION_01 IEDStatus Point Failed”.

DATE	TIME	FLAGS	ALARM [UNKNOWN_ZONE]
05/21	12:10:23	① STATUS_POINTS.StatusPoint_Estac_Meteorologico_01	Punto de Estado Equipos D
05/21	12:10:23	★① ESTACION_01.IEDStatus	IED Status Point Failed
05/21	12:00:43	★① ION_SubPtoV_Cubujuq.kWtot	LO LO LO -21771 -1000
03/06	21:09:06	★① CQ_Liceo.Voltaje_Fase_CA A/D OVERRANGE CURRENT	VAL=25569.00
03/06	21:09:06	★① CQ_Liceo.Voltaje_Fase_AB A/D OVERRANGE CURRENT	VAL=28016.00
09/15	15:49:50	★① SUB_MUELLE.IEDStatus	IED Status Point Failed
03/29	15:35:05	★① Muelle.AI145 A/D OVERRANGE CURRENT	VAL= 0.00
02/28	16:57:16	★① Pital_Sahino.FDOCPe A/D OVERRANGE CURRENT	VAL= 0.00
02/28	16:57:16	★① Terron_Colorado.FDOCPe A/D OVERRANGE CURRENT	VAL= 0.00
06/27	14:38:45	★① prueba_digi.Presion_GAS_PSI A/D OVERRANGE CURRENT	VAL= 0.00

Figura 5.34 Lista de eventos del SCADA.

5.6 Enlace inalámbrico

Para comunicar el prototipo de la estación meteorológica ubicada en San José de la Montaña con el Centro de Control de COOPELESCA fue necesario establecer un enlace inalámbrico de la estación con una torre de comunicaciones ubicada en Los Angeles de Ciudad Quesada, en donde la información es transmitida por medio de la red de fibra óptica de la cooperativa hasta el Centro de Control como se observa en la figura 5.35.



Figura 5.35 Enlace de comunicación de la estación prototipo con el Centro de Control.

Para el enlace inalámbrico se utilizaron los radio-modem Tsunami MP.11, a continuación se muestran las pestañas de configuración del radio-modem colocado en el prototipo.

En la pestaña configuración de sistema, mostrada en la figura 5.36 al radio-modem se le asignó el nombre: Meteorologica01, la ubicación y los datos informativos del Centro de Control de COOPELESCA en caso de extravío del equipo.

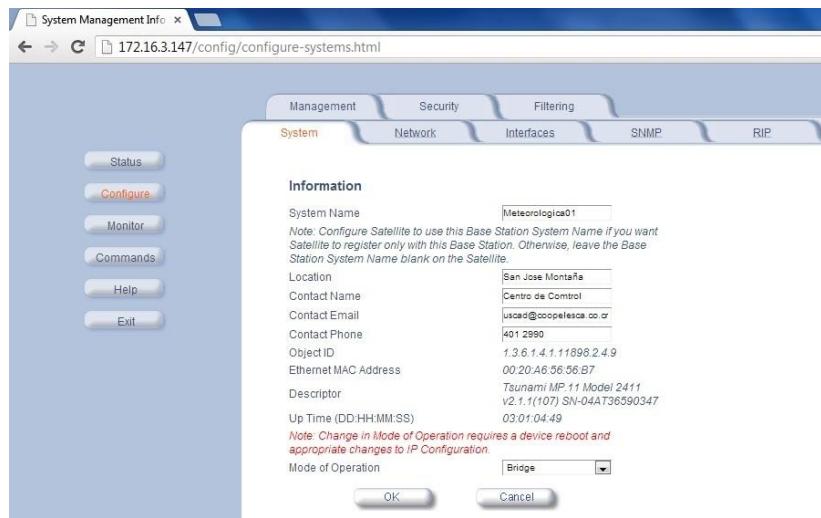


Figura 5.36 Ventana 1 de configuración del radio-modem del prototipo.

La figura 5.37 representa la pestaña de configuración de la red, para el prototipo se le asignó una IP estática: 172.16.3.147, con máscara de red: 255.255.255.0 y acceso predeterminado 172.16.3.1.

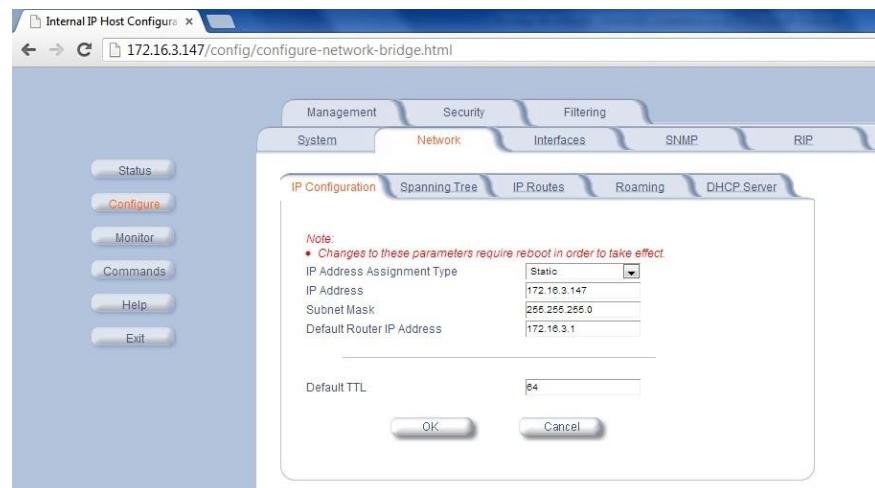


Figura 5.37 Ventana 2 de configuración del radio-modem del prototipo.

Finalmente, al guardar los cambios realizados, se comprueba la pantalla principal del radio-modem, mostrada en la figura 5.38 cuenta con las características esperadas.

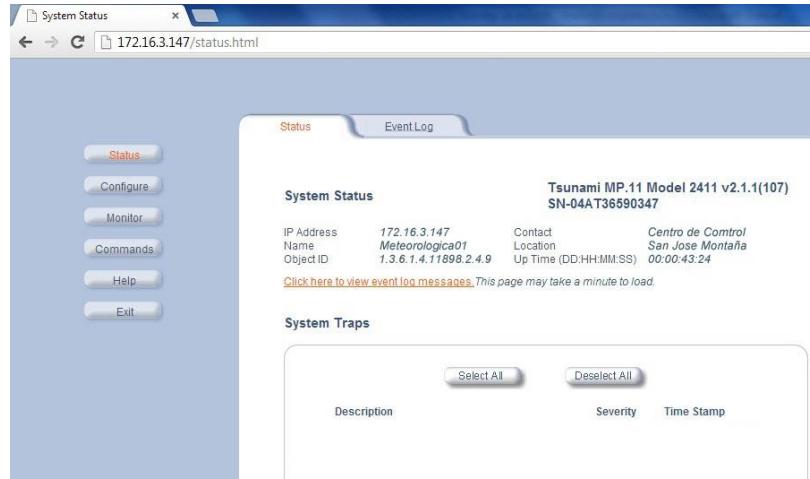


Figura 5.38 Ventana principal de configuración del radio-modem del prototipo.

5.7 Instalación de la estación

El día 14 de mayo de 2013 un equipo de mantenimiento e instalaciones de redes eléctricas de COOPELESCA instaló la acometida al punto donde se colocó la estación meteorológica.

Finalmente el día 15 de mayo de 2013, con ayuda de los técnicos de infocomunicaciones de COOPELESCA se instaló el prototipo de la estación meteorológica, en la figura 5.39 se observa a los técnicos realizando la instalación de los sensores meteorológicos, además del ajuste de la antena para establecer el enlace inalámbrico punto a punto con la otra antena ubicada en Los Ángeles de Ciudad Quesada.



Figura 5.39 Técnicos de COOPELESCA en la instalación del prototipo.

Como se observa en la figura 5.40, el gabinete instalado en el lugar cuenta con un tomacorriente, el radio-modem, una UPS, y el gabinete pequeño que contiene el datalogger desarrollado, lo cual ofrece mayor protección al equipo electrónico.



Figura 5.40 Gabinete del prototipo instalado.

En conclusión, la figura 5.41 muestra el prototipo instalado y enganchado al sistema SCADA de COOPELESCA.



Figura 5.41 Prototipo de la estación meteorológica instalada.

Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. Se logró con éxito construir un sistema de información meteorológica a partir de la integración de dispositivos de diferentes fabricantes.
2. Se logró establecer comunicación efectiva entre el sistema de información meteorológica construido y el sistema centralizado de control y monitoreo de COOPELESCA mediante un enlace inalámbrico y la red de fibra óptica de la cooperativa.
3. Se logró demostrar que no es necesario recurrir a sistemas propietarios costosos y complejos para dar este tipo de solución.
4. Existe una significativa diferencia de precios entre las estaciones meteorológicas comerciales de tecnología propietaria²⁴ y la desarrollada.
5. Se logró aprovechar equipos e infraestructura subutilizada de la cooperativa, lo cual optimizó costos al proyecto.
6. Se logró integrar exitosamente el prototipo de la estación meteorológica con el sistema SCADA de COOPELESCA, esta integración no la garantiza ningún fabricante de estaciones meteorológicas comerciales.
7. El sistema ofrece la posibilidad de agregar nuevos sensores de ser necesario.
8. La plataforma permite agregar más estaciones meteorológicas que trabajan en conjunto con el prototipo.
9. Se logra garantizar la integridad de datos al utilizar un medio de almacenamiento en una memoria extraíble como respaldo de los datos enviados.
10. El uso de componentes de software de licenciamiento abierto reduce los costos de producción.

²⁴ Tecnologías patentadas que requieren un pago de licencia para su uso, soporte y actualización.

6.2 Recomendaciones

1. Proceder con la instalación de la segunda estación meteorológica de la central de Chocosuela y la de Cubujuquí.
2. Generar historiales por día y por mes de las condiciones meteorológicas de las microcuenca monitoreadas con la finalidad de establecer patrones que ayuden a prever las cantidades reales de agua disponibles en los cauces utilizados para la generación eléctrica.
3. Agregar gráficas históricas de las variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa y precipitaciones del día, en la interfaz de la estación en la plataforma Survalent Technology, con ello se facilitaría un rápido análisis de las condiciones climáticas por parte de los operadores del Centro de Control.
4. Considerar el uso de los dispositivos de bajo costo y el software abierto como una opción viable para el monitoreo remoto de otras variables, como la lectura de medidores, control de temperatura en las líneas distribución y niveles de agua en los embalses.
5. Hacer un estudio de longevidad de la tarjeta de desarrollo Arduino Mega y sus componentes en la estación prototipo, para determinar el desgaste que podría sufrir el sistema debido a polvo, humedad o insectos.
6. Para evitar un rápido deterioro de los componentes electrónicos de la estación meteorológica, mantener una limpieza periódica de los componentes con aerosoles que desplazan la humedad y el polvo.
7. Se recomienda a COOPELESCA adquirir una tarjeta de circuitos impresos con terminales que simplifiquen la conexión del datalogger con los sensores, para facilitar la instalación de las próximas estaciones meteorológicas.
8. Con el fin de no saturar el menú principal del sistema SCADA, se recomienda utilizar un solo botón para acceder a una ventana, a partir de la cual se pueda seleccionar las estaciones meteorológicas que se deseen monitorear.

Bibliografía

- [1] Arduino Playground. “*Arduino and Java*”. [En línea]. Consultado el 27 marzo de 2013. Disponible en: <http://playground.arduino.cc/Interfacing/Java>
- [2] Arduino Playground. “*One class for both DHT11 and DHT22*”. [En línea]. Consultado el 02 de mayo de 2013. Disponible en: <http://playground.arduino.cc/Main/DHTLib>
- [3] Arduino Playground. “*Referencia del Lenguaje*”. [En línea]. Consultado el 27 marzo de 2013. Disponible en: <http://arduino.cc/es/Reference/HomePage>
- [4] Arduino Playground. “*Timer Library for Arduino*”. [En línea]. Consultado el 2 de mayo de 2013. Disponible en: <http://playground.arduino.cc/code/timer>
- [5] Bildr. 2011. “*Sensing Barometric Pressure BMP085 + Arduino*”. [En línea]. Consultado el 27 de abril de 2013. Disponible en: <http://bildr.org/2011/06/bmp085-arduino>
- [6] BOSCH. 2011. “*Digital pressure sensor*”. [En línea]. Consultado el 20 de marzo de 2013. Disponible en: <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Pressure/BST-BMP085-DS000-06.pdf>
- [7] Casas M. C y Alarcón M. “*Meteorología y Clima*”. Universitat Politècnica de Catalunya. 1999. [En línea]. Consultado el 08 abril de 2013. Disponible en: <http://books.google.co.cr/books?id=SO00ZfAAyKYC&hl=es>
- [8] Cursomicros. 2009. “*Protocolo del Bus I2C*”. [En línea]. Consultado el 2 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.cursomicros.com/avr/bus-i2c/protocolo-bus-i2c.html>
- [9] Invensys Systems, Inc. 2009. “*Soluciones de Software HMI/SCADA de Wonderware*” [En línea]. Consultado el 18 abril de 2013. Disponible en: <http://www.wonderware.es/contents/WonderwareHMISCADA.asp>
- [10] Jayapandian J. “*Measure laser power with a modified MEMS pressure sensor*”. [En línea]. Consultado el 21 marzo 2013. Disponible en: <http://electronicdesign.com/energy/measure-laser-power-modified-mems-pressure-sensor>
- [11] JEELABS. 2010. “*RTC library*”. [En línea]. Consultado el 2 de mayo de 2013. Disponible en: <https://github.com/adafruit/RTClib>

- [12] Jimeno M. L. “*Principios de Meteorología y Climatología*”. Madrid, España. Paraninfo S.A, 2011. [En línea]. Consultado el 8 de abril de 2013. Disponible en: <http://books.google.co.cr/books?id=QgtMz54pUWQC&hl=es>
- [13] Kushner D. 2011. “*The making of Arduino*”. [En línea]. Consultado el 09 abril de 2013. Disponible en: <http://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino>
- L-Com Global Connectivity. 2008. “*2.4GHz Die Cast Mini-Reflector Grid Antenna*”. Consultado el 10 de mayo de 2013. Disponible en: <http://www.l-com.com/wireless-antenna-24-ghz-24-dbi-die-cast-mini-reflector-grid-antenna-n-female-connector>
- [14] MaxDetect Technology Co. “*Digital relative humidity & temperatura sensor RHT03*”. [En línea]. Consultado el 20 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.humiditycn.com/pic/20135318405067570.pdf>
- [15] Nimbus Wheather Services. 2005. “Conceptos teóricos fundamentales sobre meteorología. (SENAMHI)”. [En línea]. Consultado el 09 de abril de 2013. Disponible en: <http://200.58.146.28/nimbus/weather/pdf/>
- [16] Organización Panamericana de la salud. 2005. “*Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire*”. [En línea]. Consultado el 09 de marzo de 2013. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/frame_m.html
- [17] Peet Bros Company, Inc. “*Anemometer/Wind Vane Ultimeter Pro*”. [En línea]. Consultado el 20 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.peetbros.com/shop/item.aspx?itemid=137>
- [18] Peet Bros Company, Inc. “*Determining Wind Speed and Direction in the Ultimeter Pro Anemometer*”. [En línea]. Consultado el 20 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.agrolan.co.il/UploadProductFiles/AWVPRO.pdf>
- [19] Peet Bros Company, Inc. “*Rain Gauge Theory of Operation and Hints for Testing*”. [En línea]. Consultado el 20 de marzo de 2013. Disponible en: www.peetbros.com/PROrgtest.doc
- [20] Peet Bros Company, Inc. “*Rain Gauge Ultimeter Pro*”. [En línea]. Consultado el 19 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.peetbros.com/shop/item.aspx?itemid=14>
- [21] Petterssen S. y Schneider O. “*Introducción a la meteorología*”, Baja California. UABC, 2002. [En línea]. Consultado el 08 abril de 2013. Disponible en: <http://books.google.co.cr/books?id=E1-YgOPIS-UC&hl=es>
- [22] Rodríguez A. “*Sistemas SCADA*”. Marcombo. 2007. [En línea]. Consultado el 17 de abril de 2013. Disponible en: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10212464>

- [23] Sada A. 2013. “*El puente Wheatstone. Historia y funcionamiento*”. [En línea]. Consultado el 21 de marzo de 2013. Disponible en:
<http://conalep.gatica.mx/El%20puente%20Wheatstone%20y%20Anderson.pdf>
- [24] Saravia Esteban. 2004. “*Sistema autónomo de adquisición de datos portátil Datalogger*”. [En línea]. Consultado el 19 de marzo de 2013. Disponible en:
www3.fimdp.edu.ar/electronica/articulos/DataLogger.doc
- [25] Sendiña I. y Pérez V. “*Fundamentos de Meteorología*”. Santiago de Compostela, Universidad Santiago de Compostela, 2006. [En línea]. Consultado el 09 abril de 2013. Disponible en:
<http://books.google.co.cr/books?id=HE3xtRmNg4kC&hl=es>
- [26] Sendo N. 2012. “*Piezoresistive Pressure and Temperature Sensor Cluster*”. [En línea]. Consultado el 21 de marzo de 2013.
Disponible en: <http://www.pressuresensorsuppliers.com/Piezoresistive-Pressure-Sensor.html>.
- [27] Serope S. R. “*Manufactura, ingeniería y tecnología*”. Pearson Educación, 2002. [En línea]. Consultado el 18 de abril de 2013.
Disponible en: books.google.co.cr/books?isbn=9702601371
- [28] Simply Modbus. 2008. “*Modbus TCP/I*”. [En línea]. Consultado el 7 de mayo de 2013.
Disponible en: <http://www.simplymodbus.ca/TCP.htm>
- [29] Survalent Technology. 2013. “*Soluciones SCADA*”. [En línea]. Consultado el 18 de abril de 2013. Disponible en: <http://www.survalent.com/en/solutions>
- [30] Zúñiga I. “*Meteorología y Climatología*”. Madrid, España: UNED, 2010”. [En línea]. Consultado el 9 de abril de 2013. Disponible en:
<http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10609046>
- [31] Proxim. 2005. “*Installation and Management Tsunami MP.11*”. [En línea]. Consultado el 10 de mayo de 2013. Disponible en:
[http://www.intelek.cz/db/repository.nsf/v/E36F04C79B8AB1EDC125769400474266/\\$file/Manual_Proxim_Tsunami_subscriber_unit_2411-RSU-EU-P_v2.2_installation_management.pdf](http://www.intelek.cz/db/repository.nsf/v/E36F04C79B8AB1EDC125769400474266/$file/Manual_Proxim_Tsunami_subscriber_unit_2411-RSU-EU-P_v2.2_installation_management.pdf)

Apéndices

Apéndice 1. SRS de Interfaz gráfica del prototipo de la estación meteorológica.

Acuerdos con COOPELESCA:

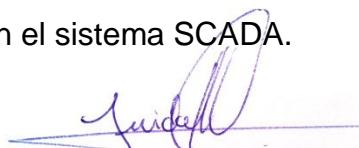
1. Crear un botón lanzador en el menú principal del sistema SCADA con el nombre “METEOROLG. 01” para acceder a la pantalla con los datos recibidos del prototipo de la estación meteorológica.
2. Asignar el nombre: PRUEBA ESTACION METEOROLÓGICA.
3. Colocar estado del enlace con el prototipo de la estación meteorológica, utilizando color verde para indicar que el enlace está activo y rojo cuando se perdió el enlace.
4. Representar numéricamente las variables meteorológicas con 2 decimales y utilizando color amarillo.
5. Utilizar las unidades según la tabla a.1.

Tabla A.1 Unidades utilizadas para las variables meteorológicas.

Variables meteorológicas	Unidades
Precipitaciones de la última hora	mm
Precipitaciones del día	mm
Humedad relativa	%
Presión atmosférica	hPa
Temperatura ambiente	°C
Velocidad del viento	km/h
Dirección del viento	º

6. Colocar el nombre de la variable meteorológica después de los valores, utilizando color blanco.
7. Construir la página del prototipo de la estación meteorológica, de acuerdo con el formato utilizado por COOPELESCA en el sistema SCADA.

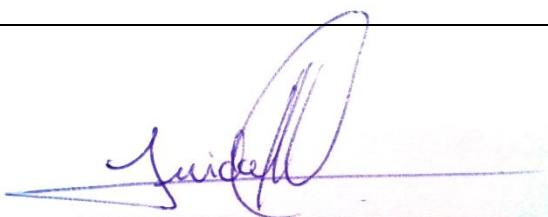

Marco A. Leiton Morera
Desarrollador


Guido Rodríguez Murillo
Supervisor del Proyecto
Usuario Final

Apéndice 2. Evaluación de la interfaz gráfica.

Tabla A.2 Evaluación de la interfaz gráfica.

Descripción	SI	NO
Se puede acceder fácilmente a la pantalla de la estación meteorológica.	X	
La pantalla de la estación meteorológica mantiene el formato utilizado por COOPELESCA en las demás ventanas del SCADA.	X	
Los tamaños y colores de letra utilizados en la página facilitan la lectura rápida de los valores y nombres de las variables meteorológicas.	X	
La pantalla cuenta con un indicador de estado del enlace con la estación meteorológica.	X	
Los valores son fácilmente asociados a la respectiva variable meteorológica.	X	
Las variables meteorológicas cuentan con las unidades de medición establecidas.	X	
Los valores se refrescan en el periodo establecido (2 segundos).	X	
Es posible acceder a los registros históricos de cada variable	X	
Observaciones: <i>Integración con sistema SCADA perfecta.</i>		



Guido Rodríguez Murillo
Supervisor del Proyecto
Usuario Final

Anexos

Anexo 1. Tabla de datos capturados por el prototipo de estación meteorológica, extraído de la base de datos del sistema SCADA.

Se escogió el día 19 de mayo de 2013, porque muestra el funcionamiento de todos los sensores, ya que de las pruebas realizadas, es el día que mayor cantidad de precipitaciones tuvo, como se observa en la tabla A.3, cerca de las 2:50pm se registraron hasta 5mm en menos de una hora.

Tabla A.3 Valores capturados por el prototipo el día 19 de mayo de 2013.

Fecha	T	H	P	V	D	PH	PD
19/05/2013	21,8	92,6	944,2	0,38	114	0	0
19/05/2013 0:05:00	21,8	92,8	944,3	0,38	114	0	0
19/05/2013 0:10:00	21,8	92,4	944,1	0,38	114	0	0
19/05/2013 0:15:00	21,9	91,6	944,1	1,21	109	0	0
19/05/2013 0:20:00	21,9	91,1	944,1	0,49	144	0	0
19/05/2013 0:25:00	21,9	91,3	944,2	0,7	4	0	0
19/05/2013 0:30:00	21,9	92,2	944,1	0,02	319	0	0
19/05/2013 0:35:00	21,9	92	944,1	0,02	319	0	0
19/05/2013 0:40:00	22	91,4	944,2	1,61	7	0	0
19/05/2013 0:45:00	22,1	91,8	944,2	0,04	2	0	0
19/05/2013 0:50:00	22	92,5	944	1,12	343	0	0
19/05/2013 0:55:00	22,1	92,6	943,9	0,4	329	0	0
19/05/2013 1:00:00	22,1	92,9	943,9	0,47	346	0	0
19/05/2013 1:05:00	22	93,1	943,8	0,47	346	0	0
19/05/2013 1:10:00	21,9	93,5	943,8	0,47	346	0	0
19/05/2013 1:15:00	21,8	93,5	943,7	0	1	0	0
19/05/2013 1:20:00	21,8	92,9	943,6	0	1	0	0
19/05/2013 1:25:00	21,8	92,6	943,6	0	1	0	0
19/05/2013 1:30:00	21,8	91,9	943,5	0	1	0	0
19/05/2013 1:35:00	21,8	92	943,4	0	1	0	0
19/05/2013 1:40:00	21,8	92,3	943,3	0	1	0	0
19/05/2013 1:45:00	21,7	92,6	943,5	0	1	0	0
19/05/2013 1:50:00	21,6	93,3	943,3	0	1	0	0
19/05/2013 1:55:00	21,7	93,6	943,3	0	1	0	0
19/05/2013 2:00:00	21,7	94,3	943,3	0,45	125	0	0
19/05/2013 2:05:00	21,6	94,7	943,3	0,45	125	0	0

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 2:10:00	21,6	94	943,3	0,45	125	0	0
19/05/2013 2:15:00	21,6	94	943,2	0,45	125	0	0
19/05/2013 2:20:00	21,6	94,2	943,2	0,45	125	0	0
19/05/2013 2:25:00	21,7	94	943,2	0,45	125	0	0
19/05/2013 2:30:00	21,6	93,6	943,1	0,17	43	0	0
19/05/2013 2:35:00	21,7	93,3	942,9	0,17	43	0	0
19/05/2013 2:40:00	21,7	93,4	942,8	0,17	43	0	0
19/05/2013 2:45:00	21,7	93,3	942,8	0,17	43	0	0
19/05/2013 2:50:00	21,6	93,2	942,8	0,46	196	0	0
19/05/2013 2:55:00	21,4	91,8	942,8	0,58	146	0	0
19/05/2013 3:00:00	21,4	92	942,9	0,58	146	0	0
19/05/2013 3:05:00	21,4	91,1	942,9	0,58	146	0	0
19/05/2013 3:10:00	21,3	90,6	943	0,58	146	0	0
19/05/2013 3:15:00	21,2	90,6	943,1	0,58	146	0	0
19/05/2013 3:20:00	21,1	91,1	943,1	0,64	196	0	0
19/05/2013 3:25:00	21,3	91,3	943,2	0,06	79	0	0
19/05/2013 3:30:00	21,3	90,4	943,1	0,06	79	0	0
19/05/2013 3:35:00	21,6	89,7	943,1	1,67	102	0	0
19/05/2013 3:40:00	21,7	87,4	943,3	1,52	197	0	0
19/05/2013 3:45:00	21,5	89	943,3	0,09	339	0	0
19/05/2013 3:50:00	21,4	89,2	943,2	0,49	120	0	0
19/05/2013 3:55:00	21,2	90,1	943,1	0,47	112	0	0
19/05/2013 4:00:00	21,2	89,8	943,2	0,47	112	0	0
19/05/2013 4:05:00	21	90,5	943,1	0	356	0	0
19/05/2013 4:10:00	20,9	90,6	943,3	0	356	0	0
19/05/2013 4:15:00	20,9	90,6	943,3	0	356	0	0
19/05/2013 4:20:00	20,9	90,2	943,2	0	356	0	0
19/05/2013 4:25:00	20,8	90,1	943,3	0	356	0	0
19/05/2013 4:30:00	20,7	90,1	943,4	1,08	112	0	0
19/05/2013 4:35:00	20,6	90,2	943,5	0,41	122	0	0
19/05/2013 4:40:00	20,6	90,9	943,4	2,4	128	0	0
19/05/2013 4:45:00	20,6	91,1	943,4	0,09	165	0	0
19/05/2013 4:50:00	20,6	90,7	943,4	0,03	346	0	0
19/05/2013 4:55:00	20,5	89,9	943,4	0	8	0	0
19/05/2013 5:00:00	20,5	89,4	943,4	0,86	130	0	0
19/05/2013 5:05:00	20,29	89,8	943,6	1,4	149	0	0
19/05/2013 5:10:00	20,29	89,5	943,7	0,58	148	0	0
19/05/2013 5:15:00	20,29	88,9	943,8	0,37	213	0	0
19/05/2013 5:20:00	20,4	90,3	943,8	0,93	260	0	0

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 5:25:00	20,5	88,9	944	0,67	274	0	0
19/05/2013 5:30:00	20,4	89,6	944,1	1	145	0	0
19/05/2013 5:35:00	20,29	90,2	944,1	0,25	105	0	0
19/05/2013 5:40:00	20,29	90,8	944,1	0,11	315	0	0
19/05/2013 5:45:00	20,5	91,4	944,1	0,11	315	0	0
19/05/2013 5:50:00	20,6	91,2	944,2	0,31	240	0	0
19/05/2013 5:55:00	20,7	90,8	944,3	0,31	240	0	0
19/05/2013 6:00:00	20,8	91	944,5	0,76	163	0	0
19/05/2013 6:05:00	20,8	91,4	944,5	0,59	189	0	0
19/05/2013 6:10:00	20,9	92,5	944,7	0,62	190	0	0
19/05/2013 6:15:00	21,1	92,6	944,6	0,48	129	0	0
19/05/2013 6:20:00	21,1	92,7	944,6	0,17	265	0	0
19/05/2013 6:25:00	21,2	92,6	944,7	0,49	254	0	0
19/05/2013 6:30:00	21,4	91,8	944,8	0,04	67	0	0
19/05/2013 6:35:00	21,5	91	944,7	0,04	67	0	0
19/05/2013 6:40:00	21,7	90,5	944,7	0,04	67	0	0
19/05/2013 6:45:00	21,9	89,4	944,8	0,94	10	0	0
19/05/2013 6:50:00	22,1	89,1	944,7	0,64	37	0	0
19/05/2013 6:55:00	22,3	87,6	944,8	0,03	16	0	0
19/05/2013 7:00:00	22,4	87,1	944,9	0,03	16	0	0
19/05/2013 7:05:00	22,4	87	944,9	0,16	264	0	0
19/05/2013 7:10:00	22,5	87,4	944,9	3,35	313	0	0
19/05/2013 7:15:00	22,7	86,6	945	2,58	13	0	0
19/05/2013 7:20:00	22,8	87,2	945	1,98	359	0	0
19/05/2013 7:25:00	22,9	87,8	945,1	1,25	351	0	0
19/05/2013 7:30:00	23,1	86,9	945	1,77	3	0	0
19/05/2013 7:35:00	23,6	84,2	945,1	3,71	3	0	0
19/05/2013 7:40:00	23,6	83	945,1	1,68	354	0	0
19/05/2013 7:45:00	23,5	83,8	945	0,23	50	0	0
19/05/2013 7:50:00	23,2	83,6	945,2	1,97	345	0	0
19/05/2013 7:55:00	23,4	83,4	945,2	0,04	231	0	0
19/05/2013 8:00:00	23,1	85	945,2	0,49	125	0	0
19/05/2013 8:05:00	23,2	85,3	945,1	1,59	122	0	0
19/05/2013 8:10:00	23,3	86,9	945,1	1,2	1	0	0
19/05/2013 8:15:00	23,4	85,3	945,2	1,53	174	0	0
19/05/2013 8:20:00	23,6	85,6	945	1,05	288	0	0
19/05/2013 8:25:00	23,9	85,1	944,9	3,07	18	0	0
19/05/2013 8:30:00	24,3	82,1	945	3,71	27	0	0
19/05/2013 8:35:00	24,9	80,5	945	3,75	354	0	0

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 8:40:00	25,5	77,5	945	5,63	23	0	0
19/05/2013 8:45:00	25,1	77,6	944,8	3,35	5	0	0
19/05/2013 8:50:00	25,1	78,9	944,9	4,82	15	0	0
19/05/2013 8:55:00	26	77,5	944,8	5,63	323	0	0
19/05/2013 9:00:00	26,2	76,8	944,9	8,44	16	0	0
19/05/2013 9:05:00	27,4	71,4	945,1	5,62	0	0	0
19/05/2013 9:10:00	27,2	71	945	5,63	386	0	0
19/05/2013 9:15:00	28,4	68,1	945	4,81	7	0	0
19/05/2013 9:20:00	27,5	69,5	944,9	6,66	1	0	0
19/05/2013 9:25:00	28	69,5	944,9	8,47	2	0	0
19/05/2013 9:30:00	27,2	69,7	944,9	8,44	376	0	0
19/05/2013 9:35:00	26,8	72,1	944,7	8,47	272	0	0
19/05/2013 9:40:00	28,2	67,6	944,7	4,82	299	0	0
19/05/2013 9:45:00	27,2	70,7	944,7	6,75	18	0	0
19/05/2013 9:50:00	28	69,2	944,7	8,27	359	0	0
19/05/2013 9:55:00	27,8	67,9	944,8	11,27	437	0	0
19/05/2013 10:00:00	27,3	70,6	944,7	4,82	303	0	0
19/05/2013 10:05:00	27,8	67,3	944,6	6,77	353	0	0
19/05/2013 10:10:00	26,6	72,6	944,4	3,07	4	0	0
19/05/2013 10:15:00	27,1	73,9	944,2	3,75	29	0	0
19/05/2013 10:20:00	27,1	72,2	944,2	4,82	17	0	0
19/05/2013 10:25:00	28,2	70,5	944,3	8,44	296	0	0
19/05/2013 10:30:00	28,5	67,5	944,3	8,44	29	0	0
19/05/2013 10:35:00	28,4	68,9	944,2	3,05	307	0	0
19/05/2013 10:40:00	29,3	64,9	944,3	8,44	8	0	0
19/05/2013 10:45:00	28,7	67,7	944,4	6,77	431	0	0
19/05/2013 10:50:00	29,5	64,7	944,5	4,21	347	0	0
19/05/2013 10:55:00	28,3	67,5	944,5	6,77	30	0	0
19/05/2013 11:00:00	27,5	71,2	944,5	6,75	384	0	0
19/05/2013 11:05:00	27,2	72,6	944,5	5,07	33	0	0
19/05/2013 11:10:00	27,1	73,9	944,4	4,77	13	0	0
19/05/2013 11:15:00	26,7	75,8	944,4	3,35	296	0	0
19/05/2013 11:20:00	26,6	76,2	944,2	3,06	347	0	0
19/05/2013 11:25:00	27,1	73,7	944,2	5,93	353	0	0
19/05/2013 11:30:00	26,6	73,9	944,2	3,07	359	0	0
19/05/2013 11:35:00	26,8	72,5	944,1	6,72	4	0	0
19/05/2013 11:40:00	27,2	73,2	944	6,75	2	0	0
19/05/2013 11:45:00	26,4	74,3	943,9	7,2	21	0	0
19/05/2013 11:50:00	26,8	72,3	943,8	8,44	1	0	0

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 11:55:00	27,5	70,3	943,6	2,25	302	0	0
19/05/2013 12:00:00	26,4	74,1	943,6	4,21	70	0	2.54
19/05/2013 12:05:00	26,8	72,7	943,5	5,54	8	0	2.54
19/05/2013 12:10:00	26,3	76,1	943,4	6,61	8	0	2.54
19/05/2013 12:15:00	26,5	75,1	943,4	1,68	20	0	2.54
19/05/2013 12:20:00	26,1	78,7	943,3	6,72	4	0	2.54
19/05/2013 12:25:00	26,1	79,6	943,3	4,82	51	0	2.54
19/05/2013 12:30:00	26,7	76,7	943,2	3,75	80	0	2.54
19/05/2013 12:35:00	27,7	74,1	943	3,71	6	0	2.54
19/05/2013 12:40:00	27,1	77,3	943	8,44	345	0	2.54
19/05/2013 12:45:00	29	68,5	942,9	11,27	411	0	2.54
19/05/2013 12:50:00	28,1	72,2	942,8	5,62	0	0	2.54
19/05/2013 12:55:00	27,8	72,6	942,9	6,75	1	0	2.54
19/05/2013 13:00:00	27,9	69	942,8	4,22	376	0	2.54
19/05/2013 13:05:00	27	77,8	942,5	3,5	1	0	2.54
19/05/2013 13:10:00	27,5	75	942,5	6,75	10	0	2.54
19/05/2013 13:15:00	28,5	70	942,4	5,63	24	0	2.54
19/05/2013 13:20:00	28,7	68,5	942,3	5,63	95	0	2.54
19/05/2013 13:25:00	28,4	69,3	942,2	5,62	17	0	2.54
19/05/2013 13:30:00	30	63,9	942,2	11,21	25	0	2.54
19/05/2013 13:35:00	29,2	64,4	942,1	5,62	373	0	2.54
19/05/2013 13:40:00	30,3	63,9	942,1	5,63	14	0	2.54
19/05/2013 13:45:00	29,8	64,5	942,1	5,63	19	0	2.54
19/05/2013 13:50:00	30,4	61,7	942,2	10,97	11	0	2.54
19/05/2013 13:55:00	28,3	67	942,1	3,71	37	0	2.54
19/05/2013 14:00:00	27,9	67,8	941,9	3,34	347	0	2.54
19/05/2013 14:05:00	29,4	65,3	942	6,66	328	0	2.54
19/05/2013 14:10:00	28,9	67,8	941,9	5,62	23	0	2.54
19/05/2013 14:15:00	29,3	64,1	941,8	4,21	350	0	2.54
19/05/2013 14:20:00	28,2	70,5	941,9	5,62	23	0	2.54
19/05/2013 14:25:00	27,4	71,4	941,9	3,37	3	0	2.54
19/05/2013 14:30:00	27,2	75,1	941,8	2,41	7	0.508	3.048
19/05/2013 14:35:00	25,9	76,8	941,9	4,82	24	0.762	3.302
19/05/2013 14:40:00	26	78,1	941,8	0,43	116	1.016	3.556
19/05/2013 14:45:00	24,8	81,4	941,9	1,46	18	3.302	5.842
19/05/2013 14:50:00	24,7	81,5	941,9	0,86	162	5.588	8.128
19/05/2013 14:55:00	24,3	84	941,7	3,72	308	5.842	8.382
19/05/2013 15:00:00	25	81,4	941,7	3,71	353	0	8.382
19/05/2013 15:05:00	24,6	84	941,7	2,58	346	0	8.382

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 15:10:00	25,1	80,7	941,7	3,75	292	0	8.382
19/05/2013 15:15:00	25,2	81,4	941,9	1,97	332	0	8.382
19/05/2013 15:20:00	24,3	82	941,9	4,82	34	0	8.382
19/05/2013 15:25:00	24,7	79	941,7	3,75	5	0.254	8.636
19/05/2013 15:30:00	23,7	82,9	941,7	4,23	268	0.254	8.636
19/05/2013 15:35:00	23,4	83,3	941,9	2,41	305	0.254	8.636
19/05/2013 15:40:00	24	81	941,8	3,75	31	0.254	8.636
19/05/2013 15:45:00	23,7	81,9	941,9	1,77	107	0.254	8.636
19/05/2013 15:50:00	23,7	81,2	941,8	0,98	297	0.254	8.636
19/05/2013 15:55:00	24,1	79,5	942	2,81	162	0.254	8.636
19/05/2013 16:00:00	23,9	79,5	942	4,23	7	0	8.636
19/05/2013 16:05:00	23,7	81,6	942,1	0,05	63	0	8.636
19/05/2013 16:10:00	23,9	82,1	942,2	0,66	51	0	8.636
19/05/2013 16:15:00	23,8	81,3	942,2	2,39	13	0	8.636
19/05/2013 16:20:00	24,5	78,7	942,3	1,46	28	0	8.636
19/05/2013 16:25:00	24,1	80	942,3	0,55	19	0	8.636
19/05/2013 16:30:00	23,7	80,6	942,5	3,35	5	0	8.636
19/05/2013 16:35:00	24,4	76,8	942,5	1,46	346	0	8.636
19/05/2013 16:40:00	23,9	78,9	942,5	1,2	124	0	8.636
19/05/2013 16:45:00	23,8	79,7	942,6	0,13	9	0	8.636
19/05/2013 16:50:00	24	79,6	942,5	2,25	12	0	8.636
19/05/2013 16:55:00	23,9	79,5	942,5	2,81	16	0	8.636
19/05/2013 17:00:00	23,8	80,3	942,5	4,23	2	0	8.636
19/05/2013 17:05:00	24,5	77	942,4	2,11	326	0	8.636
19/05/2013 17:10:00	24	79,2	942,5	4,77	13	0	8.636
19/05/2013 17:15:00	23,7	80,4	942,5	4,18	2	0	8.636
19/05/2013 17:20:00	24,3	77,5	942,7	1,12	75	0	8.636
19/05/2013 17:25:00	23,9	77,8	942,8	1,76	180	0	8.636
19/05/2013 17:30:00	23,9	77,6	942,6	1,01	159	0	8.636
19/05/2013 17:35:00	24,2	76,1	942,8	0,03	24	0	8.636
19/05/2013 17:40:00	23,9	77,3	942,6	0,28	67	0	8.636
19/05/2013 17:45:00	23,6	77,8	942,8	1,4	209	0	8.636
19/05/2013 17:50:00	23,5	82	942,7	1,34	339	0	8.636
19/05/2013 17:55:00	23,4	82,3	942,7	0,8	91	0	8.636
19/05/2013 18:00:00	23,1	83,3	942,7	1,2	273	0	8.636
19/05/2013 18:05:00	23	83,2	942,6	0,45	246	0	8.636
19/05/2013 18:10:00	22,9	84,7	942,8	0,34	298	0	8.636
19/05/2013 18:15:00	22,9	84,8	942,8	0,4	290	0	8.636
19/05/2013 18:20:00	22,8	85,2	942,9	0,41	186	0	8.636

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 18:25:00	22,6	86,5	942,8	1,77	161	0	8.636
19/05/2013 18:30:00	22,5	88,2	942,9	0,45	184	0	8.636
19/05/2013 18:35:00	22,5	88,8	943	0,32	2	0	8.636
19/05/2013 18:40:00	22,4	88,7	943,2	0,11	334	0	8.636
19/05/2013 18:45:00	22,4	88,5	943,2	1,01	266	0	8.636
19/05/2013 18:50:00	22,3	88,2	943,2	0,48	182	0	8.636
19/05/2013 18:55:00	22,3	88,5	943,5	1,15	95	0	8.636
19/05/2013 19:00:00	22,3	87,9	943,5	0,02	343	0	8.636
19/05/2013 19:05:00	22,4	87,3	943,5	0,43	163	0	8.636
19/05/2013 19:10:00	22,3	88,2	943,7	0	9	0	8.636
19/05/2013 19:15:00	22,2	87,9	943,7	0,01	13	0	8.636
19/05/2013 19:20:00	22,2	88,6	943,6	0,49	222	0	8.636
19/05/2013 19:25:00	22,1	88,7	943,8	2,81	242	0	8.636
19/05/2013 19:30:00	22	88,9	943,9	0,49	277	0	8.636
19/05/2013 19:35:00	21,9	89,1	944	0,06	15	0	8.636
19/05/2013 19:40:00	21,9	88,8	944	2,1	109	0	8.636
19/05/2013 19:45:00	21,9	89,4	944,2	1,6	252	0	8.636
19/05/2013 19:50:00	21,9	88,9	944,2	0,68	301	0	8.636
19/05/2013 19:55:00	22	89	944,4	0,46	209	0	8.636
19/05/2013 20:00:00	21,9	89,4	944,4	0,46	209	0	8.636
19/05/2013 20:05:00	22	89,4	944,4	0,46	209	0	8.636
19/05/2013 20:10:00	22	89,2	944,5	0,48	103	0	8.636
19/05/2013 20:15:00	21,9	91,1	944,5	0,48	103	0	8.636
19/05/2013 20:20:00	21,9	91,5	944,5	1,05	303	0	8.636
19/05/2013 20:25:00	21,8	91,2	944,6	0,41	286	0	8.636
19/05/2013 20:30:00	21,8	91,6	944,7	0,09	318	0	8.636
19/05/2013 20:35:00	21,9	91,4	944,7	0,37	234	0	8.636
19/05/2013 20:40:00	22	91,1	944,7	0,08	220	0	8.636
19/05/2013 20:45:00	22	90,8	945	0,01	12	0	8.636
19/05/2013 20:50:00	21,9	90,8	945	1,52	197	0	8.636
19/05/2013 20:55:00	21,9	90,4	945,1	0,57	183	0	8.636
19/05/2013 21:00:00	22,1	89,9	945,1	0,57	183	0	8.636
19/05/2013 21:05:00	22	90	945,1	0,57	183	0	8.636
19/05/2013 21:10:00	22	89,3	945,1	1,12	147	0	8.636
19/05/2013 21:15:00	22,1	88,4	945,1	1,6	213	0	8.636
19/05/2013 21:20:00	21,8	88,2	945,1	3,07	146	0	8.636
19/05/2013 21:25:00	21,9	88,7	945,1	0,88	212	0	8.636
19/05/2013 21:30:00	21,9	88,6	945,1	0,55	168	0	8.636
19/05/2013 21:35:00	22	89	945,1	1,46	282	0	8.636

continuación tabla 6.2							
19/05/2013 21:40:00	22,1	87,6	945	0,14	359	0	8.636
19/05/2013 21:45:00	22	87,9	945	1,6	161	0	8.636
19/05/2013 21:50:00	22	89	945	0,06	15	0.508	9.144
19/05/2013 21:55:00	22,1	89,3	945,1	0,06	15	0.508	9.144
19/05/2013 22:00:00	22	89,3	945,1	0,06	15	0	9.144
19/05/2013 22:05:00	21,9	89	945,1	1,46	120	0	9.144
19/05/2013 22:10:00	21,8	89,7	945,1	1,77	169	0	9.144
19/05/2013 22:15:00	21,8	89,4	945,2	0,86	207	0	9.144
19/05/2013 22:20:00	22,1	85,8	945,2	3,75	155	0	9.144
19/05/2013 22:25:00	22,3	86,3	945,1	0,54	132	0	9.144
19/05/2013 22:30:00	22,3	85,9	945,1	0,49	334	0	9.144
19/05/2013 22:35:00	22,2	86,4	945,2	0,49	334	0	9.144
19/05/2013 22:40:00	21,8	88,5	945,1	0,3	239	0	9.144
19/05/2013 22:45:00	21,6	89,6	945	0,01	340	0	9.144
19/05/2013 22:50:00	21,7	89,4	945,1	0,01	340	0	9.144
19/05/2013 22:55:00	21,8	89,8	945,2	0,32	177	0	9.144
19/05/2013 23:00:00	21,9	89,3	945	0,31	231	0	9.144
19/05/2013 23:05:00	21,8	89,7	945,1	0,88	189	0	9.144
19/05/2013 23:10:00	21,8	89,5	944,8	0,46	215	0	9.144
19/05/2013 23:15:00	21,8	89,6	944,8	0,5	57	0	9.144
19/05/2013 23:20:00	21,8	89,8	944,7	0,39	172	0	9.144
19/05/2013 23:25:00	21,9	89,4	944,8	0,39	172	0	9.144
19/05/2013 23:30:00	21,9	89,5	944,5	0	315	0	9.144
19/05/2013 23:35:00	21,9	89,5	944,6	0	315	0	9.144
19/05/2013 23:40:00	21,9	90,1	944,5	0	315	0	9.144
19/05/2013 23:45:00	21,8	89,7	944,4	0	182	0	9.144
19/05/2013 23:50:00	21,7	90,6	944,2	0,57	170	0	9.144
19/05/2013 23:55:00	21,6	91,5	944,2	0,52	139	0	9.144

Anexo 2. Gráficos históricos de 5 días generados a partir de los datos aportados por el prototipo de la estación meteorológica.

Las pruebas se realizaron en las afueras del edificio de COOPELESCA en Santa Fe, Ciudad Quesada, San Carlos, Alajuela, los días 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21 de mayo.

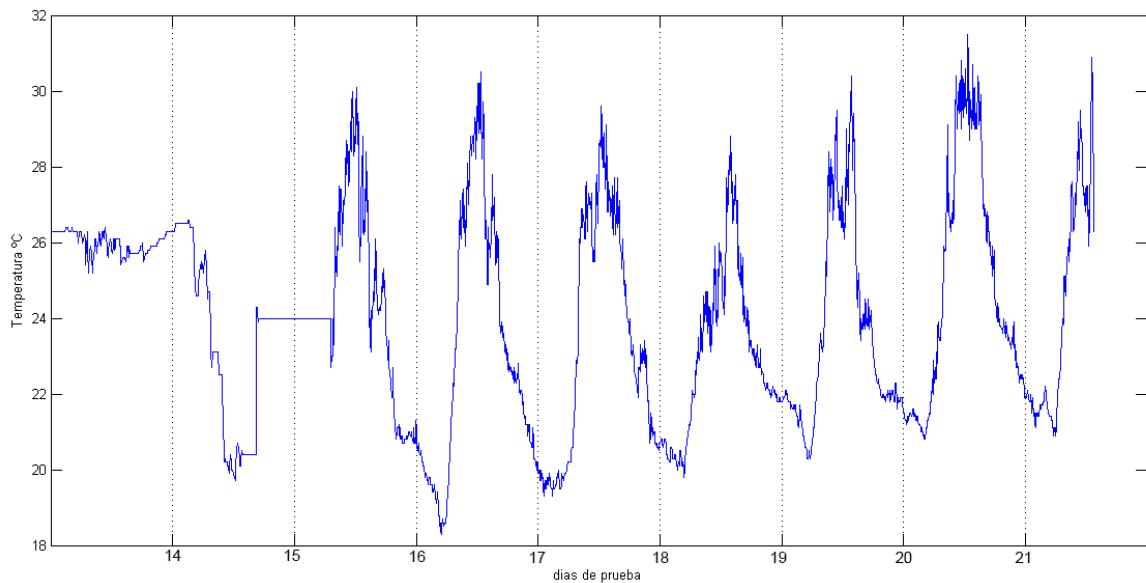


Figura A.1 Gráfica prueba de temperatura.

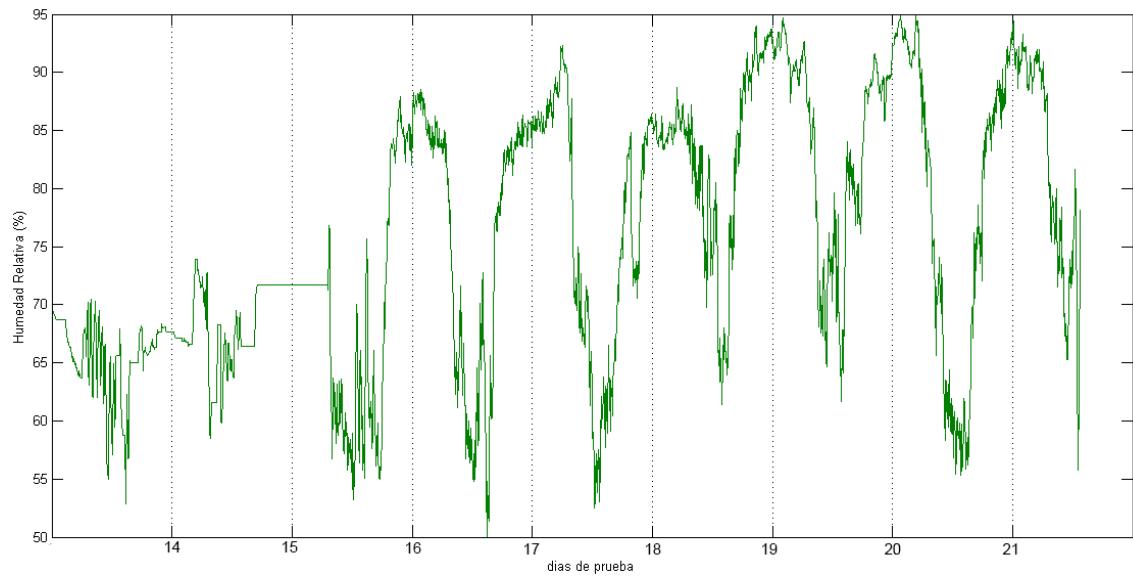


Figura A.2 Gráfica prueba de humedad.

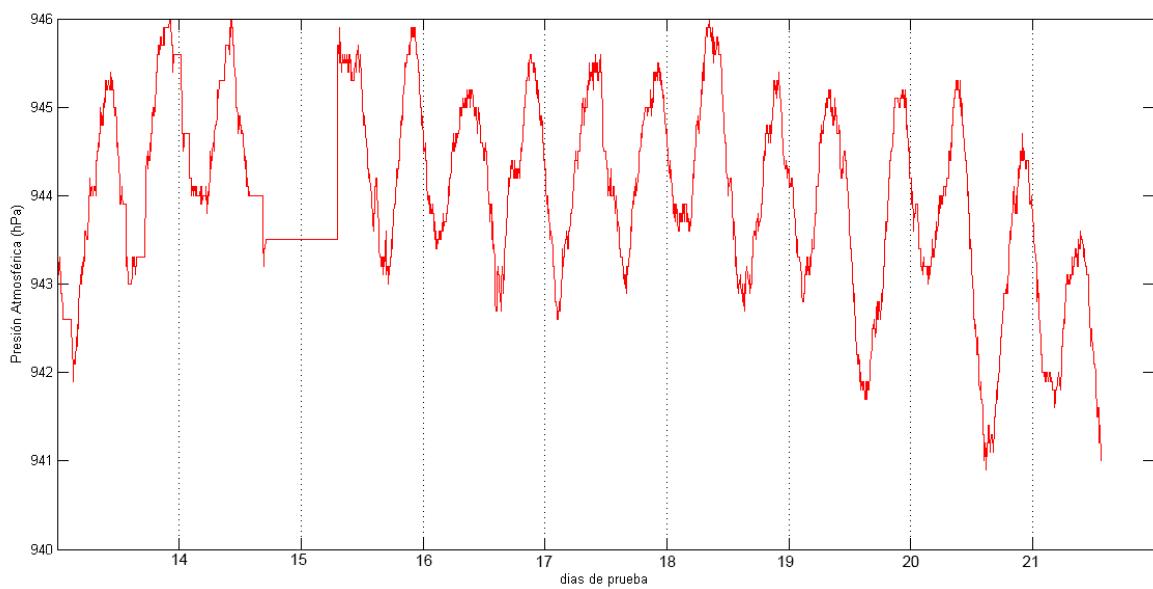


Figura A.3 Gráfica prueba de presión atmosférica.

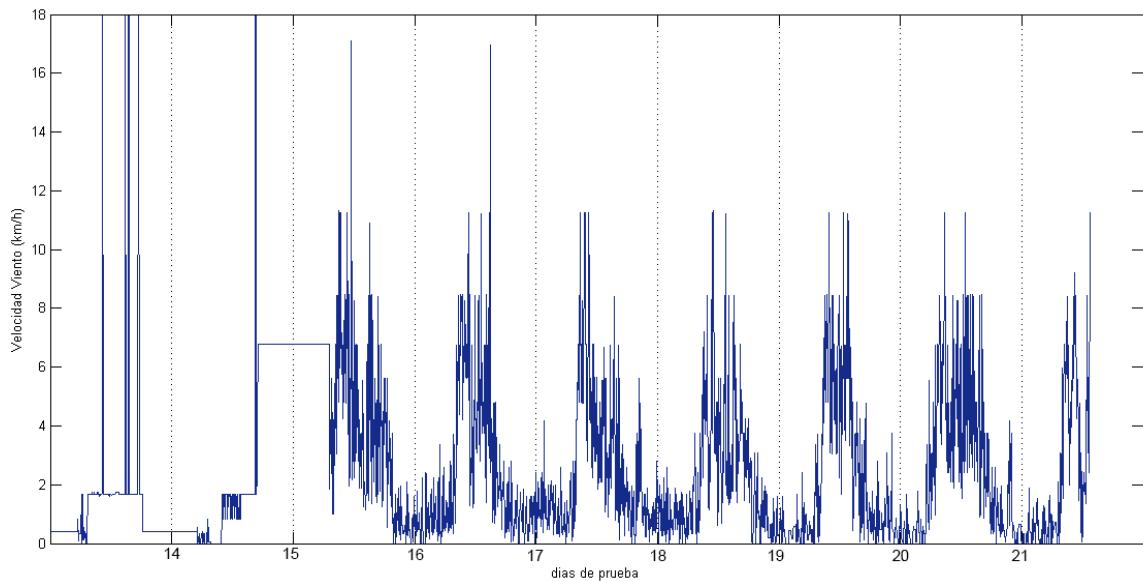


Figura A.4 Gráfica prueba de velocidad viento.

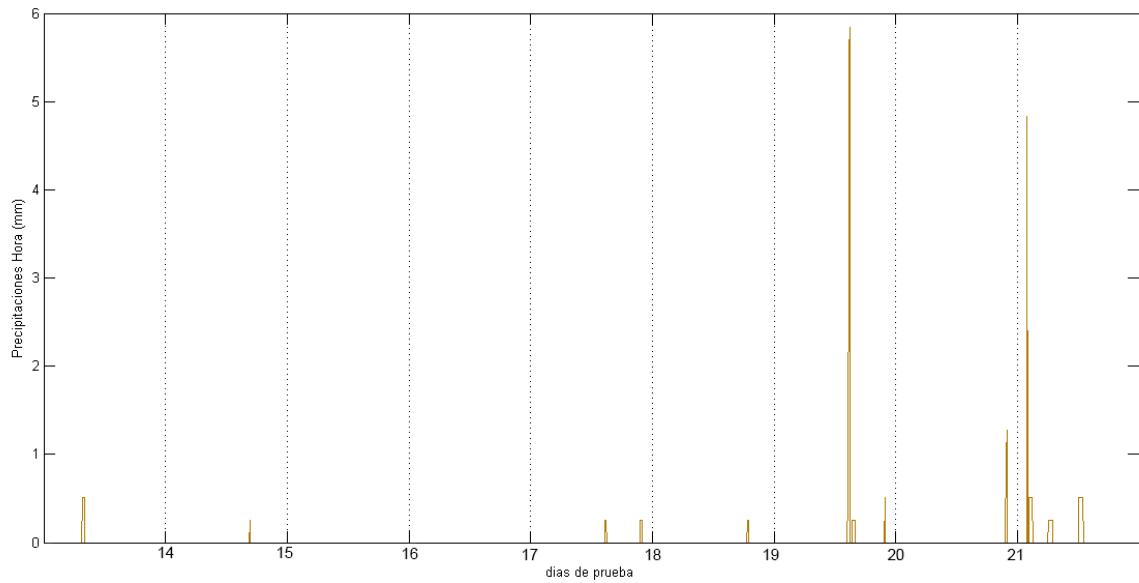


Figura A.5 Gráfica prueba precipitaciones por hora.

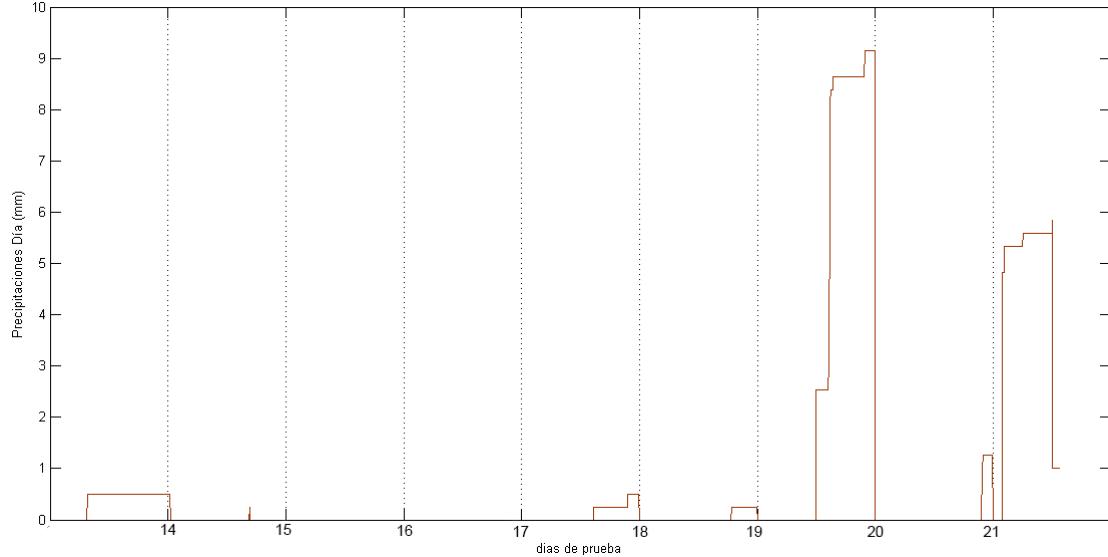


Figura A.6 Gráfica prueba precipitaciones del día.

Nota: El día 14 de mayo cerca de las 4:30pm accidentalmente uno de los operadores del Centro de Control desconectó la alimentación eléctrica del prototipo de la estación meteorológica, por lo que se puede observar en las gráficas anteriores una línea recta hasta el día 15 de mayo en la mañana, cuando el prototipo se volvió a conectar.