



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Implementación de un sistema SCADA para supervisión y monitoreo de la celda de hidrógeno, carga y fuente programable en DC de la microrred de Balzay de la Universidad de Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Autores:

Nathaly Graciela Guallas Dominguez

Henry Paul Tigre Avila

Director:

Luis Ismael Minchala Ávila

ORCID: 0000-0003-0822-0705

Co-Director:

Edisson Andrés Villa Ávila

ORCID: 0000-0002-2766-5913

Cuenca, Ecuador

2023-06-12

Resumen

La Industria 4.0 posibilita la automatización, modernización y digitalización de las redes industriales para la optimización de tiempo y recursos en una planta. En este entorno los sistemas de control juegan un papel importante, ya que permiten la gestión y el control eficiente de los dispositivos de campo; facilitando la supervisión de los procesos industriales, además de beneficiar a la escalabilidad e interoperabilidad entre protocolos de comunicación del sistema para adaptarse a las necesidades cambiantes del entorno industrial. En este contexto, se propone un sistema SCADA complementario para el monitoreo y supervisión de la celda de hidrógeno, fuente y carga programable en DC. La red de control se caracteriza por ser escalable y capaz de operar en situaciones de fallas de conexión de uno o más equipos. La gestión de comunicación entre el host de la interfaz y los equipos de campo se realiza mediante un controlador de automatización programable (PAC) bajo los protocolos Modbus y TCP/IP. En la interfaz de usuario (HMI) se monitorea, supervisa y gestiona los diferentes equipos. El trabajo se llevó a cabo mediante el levantamiento, estudio y análisis de la red industrial en la microrred de Balzay, que se ve reflejado en el diagrama de conexiones y protocolos de la red existente y el planteado para el sistema complementario. La implementación propuesta y validada subjetivamente resulta de gran utilidad para la microrred, porque facilita la incorporación de equipos al sistema de gestión en futuras investigaciones y trabajos a desarrollar en el lugar.

Palabras clave: redes industriales, microrred, SCADA, PAC, HMI

Abstract

Industry 4.0 makes possible the automation, modernization and digitization of industrial networks for the optimization of time and resources in a plant. In this environment, control systems play an important role, since they allow efficient management and control of field devices; facilitating the supervision of industrial processes, in addition to benefiting the scalability and interoperability between communication protocols of the system to adapt to the changing needs of the industrial environment. In this context, a complementary SCADA system is proposed for the monitoring and supervision of the hydrogen cell, power supply and programmable load in DC. The control network is characterized by being scalable and capable of operating in situations of connection failures of one or more equipment. The communication management between the interface host and the field devices is done by a programmable automation controller (PAC) under the Modbus and TCP/IP protocols. The user interface (HMI) monitors, supervises and manages the different equipment. The work was carried out through the surveying, studying and analyzing of the industrial network in the Balzay microgrid, which is reflected in the diagram of connections and protocols of the existing network and that proposed for the complementary system. The proposed and subjectively validated implementation is very useful for the microgrid, because it facilitates the incorporation of equipment into the management system in future research and projects to be carried out on site.

Keywords: industrial networks, microgrid, SCADA, PAC, HMI

Índice de contenido

1. Introducción	20
1.1. Antecedentes	20
1.2. Identificación del problema	22
1.3. Objetivos	24
1.3.1. Objetivo general	24
1.3.2. Objetivos específicos	24
1.4. Revisión del estado del arte	24
1.5. Contribución	27
2. Fundamentos teóricos	29
2.1. Cuarta revolución industrial	29
2.1.1. Características	30
2.1.2. Internet Industrial de las cosas	31
2.1.2.1. Arquitectura	31
2.2. Automatización industrial	32
2.2.1. Pirámide de automatización industrial	32
2.2.1.1. Nivel de campo	33
2.2.1.2. Nivel de control	33
2.2.1.3. Nivel de supervisión	34
2.2.1.4. Nivel de operación	34
2.2.1.5. Nivel de gestión	34
2.3. Sistemas de comunicación industrial	35
2.3.1. Clasificación	35
2.3.1.1. Buses de campo	35
2.3.1.2. Redes ethernet industrial	36
2.3.1.3. Redes inalámbricas	37
2.4. Protocolo de comunicación Modbus	37
2.4.1. Capa de aplicación Modbus	39
2.4.2. Capa inferior Modbus	39
2.4.2.1. Modbus Serial	39
2.4.2.2. Modbus TCP	42

2.5. Redes inteligentes	43
2.5.1. Microrredes inteligentes	44
2.5.1.1. Funcionamiento	44
2.5.1.2. Elementos	45
2.5.1.3. Generación Distribuida	46
2.5.1.4. Almacenamiento de energía	46
2.6. Sistema SCADA en automatización industrial	47
2.6.1. Componentes	48
2.7. Controladores de automatización programable	49
2.7.1. sbRIO-9642	49
3. Metodología	51
3.1. Descripción del estado actual del Laboratorio Micro-red	51
3.1.1. Distribución de componentes	52
3.1.1.1. Grupo de generación	52
3.1.1.2. Grupo de almacenamiento	53
3.1.1.3. Grupo de consumo	54
3.1.1.4. Red eléctrica pública	55
3.1.2. Conexiones de la Microrred	55
3.2. Descripción de los equipos de estudio	57
3.2.1. Electrolizador ELS500	57
3.2.1.1. Módulos	58
3.2.1.2. Especificaciones	60
3.2.1.3. Principio de funcionamiento	60
3.2.1.4. Comunicación	60
3.2.2. Pila de hidrógeno	61
3.2.2.1. Características y especificaciones	61
3.2.2.2. Principio de funcionamiento	61
3.2.2.3. Comunicación	63
3.2.3. Carga programable DC	63
3.2.3.1. Características y especificaciones	63
3.2.3.2. Modos de operación	64
3.2.3.3. Parámetros de edición	66

3.2.3.4. Comunicación	66
3.2.4. Fuente programable DC	67
3.2.4.1. Características y especificaciones	67
3.2.4.2. Modos de salida	68
3.2.4.3. Programas	71
3.2.4.4. Comunicación	72
3.3. Arquitectura	72
3.3.1. Diagrama de componentes	72
3.3.2. Diagrama de conexiones	73
3.3.3. Diagrama de procesos	75
3.4. Diseño del sistema SCADA	77
3.4.1. Conexión remota con equipos de estudio	77
3.4.1.1. Carga y fuente programable DC	77
3.4.1.2. Electrolizador	79
3.4.1.3. Pila de hidrógeno	81
3.4.2. Configuración del PAC	83
3.4.2.1. Pila de hidrógeno	84
3.4.2.2. Carga programable	87
3.4.2.3. Fuente programable	89
3.4.2.4. Electrolizador	94
3.4.3. Diseño de HMI	96
3.4.3.1. Sinóptico general	99
3.4.3.2. Pila de hidrógeno	100
3.4.3.3. Electrolizador	102
3.4.3.4. Carga programable	104
3.4.3.5. Fuente programable	105
4. Resultados	107
4.1. Pruebas de funcionamiento del sistema SCADA	107
4.1.1. Sinóptico General	107
4.1.2. Pila de hidrógeno	110
4.1.2.1. Estados de operación y comportamiento en el tiempo .	110
4.1.2.2. Dashboard	111

4.1.3. Electrolizador	112
4.1.3.1. Estados de operación y comportamiento en el tiempo	112
4.1.3.2. Dashboard	114
4.1.4. Carga programable DC	115
4.1.4.1. Pruebas de configuración de modos de operación	115
4.1.5. Fuente programable DC	118
4.1.5.1. Pruebas de configuración para modos de operación	119
4.2. Tiempo de procesamiento en los equipos de control	123
4.2.1. PAC	123
4.2.2. HMI	124
4.3. Evaluación subjetiva a la interfaz del sistema SCADA	125
4.3.1. Población de interés en el uso del sistema SCADA	125
4.3.1.1. Muestra	126
4.3.2. Preguntas aplicadas en la encuesta	126
5. Conclusiones y recomendaciones	132
5.1. Conclusiones	132
5.2. Recomendaciones	133
5.3. Trabajos futuros	134
A. Apéndice A	135
A.1. Configuración y actualización del PAC	135
A.2. Creación de un proyecto con el controlador dentro LabVIEW	138
B. Apéndice B	142
B.1. Variables compartidas de visualización de la pila de hidrógeno	142
B.2. Variables compartidas de visualización de la carga programable	142
B.3. Variables compartidas de visualización de la fuente programable	143
B.4. Variables compartidas de visualización del electrolizador	143
C. Apéndice C	145
C.1. Variables compartidas de control de la carga programable	145
C.2. Variables compartidas de control de la fuente programable	145
C.3. Variables compartidas de control del electrolizador	147

D. Apéndice D	148
D.1. Tabla de errores para fuente programable en DC	148
D.2. Tabla de errores para carga programable en DC	148
D.3. Tabla de errores para Pila de hidrógeno	149
D.4. Tablas de errores para Electrolizador	149
E. Apéndice E	151
E.1. Esquema de conexiones del Laboratorio Micro-Red	151
E.2. Diagrama de procesos UML	152
F. Apéndice F	153
F.1. Acercamiento al lazo de establecimiento de conexión	153
F.2. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la pila de hidrógeno	153
G. Apéndice G	155
G.1. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la carga programable DC	155
H. Apéndice H	157
H.1. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la fuente programable DC	157
Referencias	159

Índice de figuras

2.1. Cronología de las revoluciones industriales	30
2.2. Arquitectura IIoT	32
2.3. Pirámide de automatización industrial	33
2.4. Familia de protocolos Modbus	38
2.5. Tramas de Modbus Serial	41
2.6. Trama de Modbus TCP	43
2.7. Estructura general de una microrred	45
2.8. Diagrama del controlador CompactRIO Single-Board	50
3.1. Arquitectura de conexión previo de los equipos en la microrred de Balzay.	56
3.2. Electrolizador Heliocentris modelo ELS500	58
3.3. Descripción general de Electrolizador ELS500.	59
3.4. Descripción de la pantalla principal y del monitor del electrolizador EL 500.	59
3.5. Panel frontal y posterior de pila de combustible	62
3.6. Panel frontal de la carga programable DC.	63
3.7. Modos de operación.	65
3.8. Circuito RLC.	66
3.9. Panel frontal de la fuente programable en DC.	68
3.10. Curva I-V de para panel fotovoltaico con parámetros característicos.	69
3.11. Diagrama UML de componentes para el sistema SCADA.	72
3.12. Arquitectura de conexión propuesto para el control y monitoreo de los equipos.	74
3.13. Diagrama UML de procesos para sistema SCADA implementado.	75
3.14. Visualización de los equipos disponibles dentro de NI-VISA.	78
3.15. Datos principales de la conexión TCP/IP realizada mediante NI-VISA.	79
3.16. Interacción de la carga con NI-VISA.	80
3.17. Creación del servidor Modbus en Labview.	80
3.18. Propiedades de la conexión e items del servidor Modbus del electrolí- zador.	81
3.19. Propiedades de la conexión con la pila de hidrógeno.	82

3.20.Formato de datos entregados por la pila de hidrógeno.	82
3.21.Estructuras relevantes en LabVIEW.	84
3.22.Proceso de conexión con la pila de hidrógeno.	85
3.23.Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno.	86
3.24.Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC. . . .	87
3.25.Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC. . . .	91
3.26.Lectura de una variable compartida con la función Read Variable del módulo Data Communications.	97
3.27.Escritura de una variable compartida con la función Write Variable del módulo Data Communications.	98
3.28.Interfaz del SCADA de control principal.	99
3.29.Panel de la pila de hidrógeno en el sistema SCADA 1/2.	101
3.30.Panel de la pila de hidrógeno en el sistema SCADA 2/2.	102
3.31.Panel del electrolizador en el sistema SCADA 1/2.	103
3.32.Panel del electrolizador en el sistema SCADA 2/2.	103
3.33.Panel de la carga programable en el sistema SCADA.	104
3.34.[Panel de la fuente programable en el sistema SCADA.	106
4.1. Panel general en el sistema SCADA, con todo conectado.	108
4.2. Panel general en el sistema SCADA, con electrolizador en error.	109
4.3. Panel general en el sistema SCADA, solo con el electrolizador conectado.	109
4.4. Panel de la pila de hidrógeno con comportamiento normal.	110
4.5. Panel de la pila de hidrógeno con error en su operación	111
4.6. Panel de dashboard de la pila de hidrógeno.	111
4.7. Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de voltaje respecto al tiempo.	112
4.8. Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de corriente respecto al tiempo.	113
4.9. Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de potencia respecto al tiempo.	113
4.10.Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de las variables del hidrógeno respecto al tiempo.	114
4.11.Panel del electrolizador con error en su funcionamiento.	114

4.12. Dashboard del electrolizador.	115
4.13. Panel de la carga programable de supervisión del modo SWD.	116
4.14. Panel de la carga programable en supervisión del modo CR.	116
4.15. Panel de la carga programable en configuración del modo CC.	117
4.16. Panel de la carga programable en configuración del modo CCD.	117
4.17. Panel de la carga programable en configuración del modo CRD.	118
4.18. Panel de la carga programable en configuración del modo SWD.	118
4.19. Modo de programa: Modo List.	120
4.20. Modo de programa: Modo STEP.	121
4.21. Modo de salida: SANDIA.	122
4.22. Modo de salida: Modo Table	123
4.23. Intervalos de confianza de los tiempos de procesamiento de cada pro- ceso de supervisión en el PAC.	124
4.24. Intervalos de confianza de los tiempos de procesamiento de cada pro- ceso de supervisión en el HMI.	125
4.25. Diagrama sectorial de la pregunta 1.	126
4.26. Diagrama sectorial de la pregunta 2.	127
4.27. Diagrama sectorial de la pregunta 3.	127
4.28. Diagrama sectorial de la pregunta 4.	128
4.29. Diagrama sectorial de la pregunta 5.	128
4.30. Diagrama sectorial de la pregunta 6.	129
4.31. Diagrama sectorial de la pregunta 7.	129
4.32. Diagrama sectorial de la pregunta 8.	130
4.33. Diagrama sectorial de la pregunta 9.	130
A.1. Visualización de las características y software iniciales del PAC.	135
A.2. Selección del software a instalar y/o actualizar dentro del PAC.	136
A.3. Ventanas del progreso de instalación del nuevo software.	137
A.4. Software Actualizado en el PAC.	137
A.5. Página de inicio de LabVIEW: elección de crear de nuevo proyecto.	138
A.6. Selección de la opción LAbVIEW FPGA project.	139
A.7. Selección del tipo de placa a usar, en este caso sbRIO.	139
A.8. Búsqueda automática del tipo de dispositivos conectados.	140

A.9. Descripción de equipos desconectados, pero se tiene dispositivos previos con los que se trabajo.	140
A.10.Previsualización de las características el equipo dentro del proyecto cuando está conectado el controlador.	141
A.11.Proyecto creado con el FPGA en LAbVIEW.	141
E.1. Esquema Laboratorio Micro-Red.	151
E.2. Diagrama UML de procesos para sistema SCADA implementado. . . .	152
F.1. Lazo de establecimiento de conexión.	153
F.2. Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno 1/2. . . .	153
F.3. Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno 2/2. . . .	154
G.1. Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 1/5. .	155
G.2. Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 2/5. .	155
G.3. Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 3/5. .	156
G.4. Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 4/5. .	156
H.1. Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 1/5. .	157
H.2. Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 2/5. .	157
H.3. Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 3/5. .	158
H.4. Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 4/5. .	158
H.5. Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 5/5. .	158

Índice de tablas

2.1. Áreas de memoria del modelo de datos Modbus.	38
2.2. Componentes principales sbRIO-9642.	49
3.1. Especificaciones del Electrolizador.	60
3.2. Especificaciones de la pila combustible.	62
3.3. Especificaciones de la carga programable DC.	64
3.4. Especificaciones de la fuente programable DC.	67
3.5. Valores típicos de FF para el modelo del generador fotovoltaico.	70
3.6. Valores de FF y β para diferentes tipos de arreglos fotovoltaicos.	71
3.7. Datos entregados por la pila de hidrógeno mediante RS-232.	83
3.8. Secuencia de procesos para el monitoreo y supervisión de los equipos.	84
3.9. Parámetros de la carga programable DC.	90
3.10. Parámetros para modos de salida del primer modo de operación.	92
3.11. Parámetros para programas del segundo modo de operación.	93
3.12. Registros de ingreso Modbus del Electrolizador.	95
3.13. Coils de control del Electrolizador.	96
4.1. Escenarios de prueba para estados de funcionamiento y conexión.	108
4.2. Parámetros ingresados en Modo List.	119
4.3. Voltajes y Marcas de tiempo en Modo List.	120
4.4. Marcas de tiempo para voltajes de salida en Modo STEP.	122
B.1. Variables compartidas de visualización de la pila de hidrógeno.	142
B.2. Variables compartidas de visualización para la carga programable DC.	142
B.3. Variables compartidas de visualización de la fuente programable DC.	143
B.4. Variables compartidas de visualización del Electrolizador.	144
C.1. Variables compartidas de control para la carga programable DC.	145
C.2. Variables compartidas de control de la fuente programable DC.	146
C.3. Variables compartidas de control del Electrolizador.	147
D.1. Tabla de errores para fuente programable en DC.	148
D.2. Tabla de errores para carga programable en DC.	148

D.3. Tabla de errores para pila de hidrógeno.	149
D.4. States and Substate Map of the EL register 128 (LSB = substate, MSB = state).	149
D.5. States and Substate Map of the Dryer Status register 219 (LSB = subs- tate, MSB = state).	150
D.6. Dryer Error Word (register 220).	150
D.7. Error word (register 133).	150
D.8. Alarm word (register 134).	150

Dedicatoria y agradecimientos

Dedico y agradezco en primer lugar a Dios por haberme ayudado y estado siempre conmigo a lo largo de mi formación académica, a mis padres José y Digna y mis hermanos Erick y Danny por brindarme su apoyo en todo momento y amor incondicional, sin ellos nada de esto sería posible. A mis amigos Ximena, Jaime, Jarni, Henry, Sebastian y Joel por estar conmigo en las buenas y en las malas y haberme apoyado durante mi formación académica.

Un agradecimiento especial a mi compañero de tesis y futuro colega Henry por su paciencia y dedicación en este trabajo, de igual manera a mis tutores Dr. Luis Minchala y MSc. Edison Villa por su constante ayuda y dedicación para culminar con éxito el presente trabajo de titulación, del mismo modo al personal del Laboratorio Micro-Red por la asistencia constante durante el proceso de desarrollo.

Nathaly Graciela Guallas Dominguez

Dedicatoria y agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Dios por la salud y sabiduría para culminar este largo trayecto universitario. A mis amigos, que siempre han estado para arrimar el hombro, colaborando y respaldando en todo momento.

A mis padres Carmen y Luis, y a mis hermanas Elsa y Erika, por estar siempre en todos momentos; pues con su soporte han sabido guiarme con consejos y mucho cariño para ayudarme en el crecimiento personal y académico, ya que sin ellos esto no hubiese sido posible.

Agradecer a mi amiga, compañera y futura colega Nathaly Guallas por su esfuerzo, paciencia y dedicación en todo momento de la vida universitaria, y aún más en el desarrollo de la tesis. También quiero agradecer a los ingenieros Ismael Minchala y Edison Villa, quienes han depositado la confianza en nosotros para el desarrollo de tan importante trabajo y han destinado gran parte de su tiempo y dedicación en cada una de las etapas afrontadas.

Agradecer a todo el personal del Laboratorio Micro-Red de Balzay, quienes nos han apoyado en el desarrollo de este trabajo de titulación con herramientas, consejos y grandes experiencias vividas que ayudan en el crecimiento profesional.

Henry Paul Tigre Avila

Abreviaciones y acrónimos

I_{mp} Maximum Power Current. 68, 70, 92

I_{sc} Short Circuit Current. 68–70, 92

P_{MP} Maximum Power. 68, 70, 92

V_{mp} Maximum Power Voltage. 68, 70, 92

V_{oc} Open Circuit Voltage. 68–70, 92

4IR Industry 4.0. 20

AC Alternating Current. 21, 23, 52, 53, 55

AEM Anion exchange membrane. 60

APDU Application layer Protocol Data Unit. 39, 40, 43

BMS Battery Management System. 23

CAN Controller area network. 36

CPS Cyber-Physical System. 29, 30

CRC Cyclic Redundancy Check. 40

DC Direct Current. 2, 3, 13, 21, 23, 24, 27, 52–55, 61–64, 67, 72, 74, 77, 84, 87, 89, 99, 100, 104, 107, 108, 115, 116, 118, 119, 133, 142, 143, 145, 146

DER Distributed Energy Resources. 20

DMS Sistema de gestión de distribución. 46

DNP3 Distributed Network Protocol 3. 21

DSC Sistemas de control distribuido. 33

EMS Energy Management System. 46

EPL Ethernet Powerlink. 37

ERP Enterprise Resource Planning. 34

ESS Energy Storage System. 45, 46

EtherCAT Ethernet for Control Automation Technology. 36

FF Fill Factor. 68, 71, 92

FV Energía Fotovoltaica. 46, 68

GD Generación Distribuida. 45, 46

GLP Gas Licuado de Petroleo. 23, 53

HMI Human-Machine Interface. 2, 3, 22, 28, 34, 48, 57, 73, 75–77, 83, 86, 94, 96, 97, 100, 107, 117, 123, 124, 133

ID Identificador de transacción. 43

IED Intelligent Electronic Devices. 48

IIoT Industrial Internet of Things. 31, 32, 132

IoT Internet of Things. 29–32, 43

LMR Laboratorio Micro-Red. 51–55

LRC Longitudinal Redundancy Check. 40

M2M Machine to Machine. 29

MBAP Modbus Application Protocol. 43

MES Manufacturing Execution System. 34

MG Microgrid. 44

MMS Sistema de Gestión del Mercado. 46

NI National Instruments. 28, 49, 74, 75, 77, 83, 136, 138

OPC Open Platform Communications. 24, 25

PAC Programmable Automation Controller. 2, 3, 26, 27, 49, 56, 73–77, 83, 85, 94, 96, 97, 100, 107, 123, 124, 132, 135

PCC Punto de acoplamiento común. 44

PCDEE Programa de Conversión de Deuda de Ecuador frente a España. 51

PDU Protocol Data Unit. 40

PEM Proton exchange membrane electrolyzers. 52, 61, 62

PLC Programmable Logic Controller. 22, 23, 25, 26, 33, 48, 49, 56, 132

PROFIBUS Process Field Bus. 21, 35

PROFINET Process Field Network. 36

RTE Ethernet industrial en tiempo real. 35, 36

RTS Real-Time Systems. 22

RTU Remote Terminal Unit. 33, 36, 39–42, 48

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition. 2, 3, 10, 22–28, 34, 47, 48, 51, 55–57, 72, 75–77, 83, 96, 99, 101–104, 106–109, 125–134

SG Smart Grid. 43

STC Standar Test Condition. 70

TIC Tecnologías de la Información y Comunicación. 29, 34, 43

WLAN Wireless Local Area Network. 37

WORLDVIP World Field Instrumentation Protocol. 35, 36

WPAN Wireless Personal Area Network. 37

Introducción

La digitalización, automatización y modernización de técnicas de producción han acelerado el crecimiento industrial y con ello la necesidad de mejorar el monitoreo y supervisión de los procesos de una planta. Para el intercambio de datos se emplean sistemas de lectura y escritura con características especiales como un tiempo de retardo mínimo para la detección y solución de errores y resistencia al ruido que se produce en la industria por el funcionamiento normal. En cuanto a la automatización de una planta, se emplean múltiples componentes que van desde actuadores, microprocesadores, hasta sistemas de control remoto, con el objetivo de minimizar la intervención humana en los procesos industriales.

El presente capítulo presenta en la sección 1.1 los antecedentes que llevaron al desarrollo del trabajo de titulación. La sección 1.2 presenta la identificación del problema. La sección 1.3 presenta el objetivo general y los objetivos específicos planteados. La sección 1.4 muestra el estado del arte e investigaciones recientes que se generan en torno al tema desarrollado. Finalmente, la sección 1.5 presenta las contribuciones del presente trabajo de titulación.

1.1. Antecedentes

Las tecnologías emergentes en la Industria 4.0 (4IR, por sus siglas en inglés) han jugado un rol importante en la digitalización del sistema de energía eléctrica, especialmente en la implementación de redes inteligentes. En este marco de referencia, las microrredes eléctricas han revolucionado las redes de energía tradicionales a través del desarrollo sostenible de energías renovables [1]. Según el Departamento de Energía de EEUU, una microrred inteligente o smart grid es una red de cargas interconectadas, recursos de energía distribuida (DER, por sus siglas en inglés) y almacenamiento de energía que puede funcionar como una entidad controlada de forma independiente; además puede conectarse, desconectarse y actuar como fuente con respecto a la red principal [2].

Una microrred eléctrica ofrece autosostenibilidad y conectividad independiente a través de recursos energéticos interconectados; tales como recursos renovables y/o no

renovables, fuentes de cargas, sistemas de gestión de energía, sistemas de control, sistemas de automatización y sistemas de monitoreo. Para desplegar un centro de estudio de tal magnitud se tiene grandes desafíos, entre los que destacan interoperabilidad, control y monitoreo [1, 3]. Generalmente las microrredes emplean tres arquitecturas principales: Corriente Alterna (AC), Corriente Directa (DC) o Híbrida AC/DC. Las microrredes DC proporcionan confiabilidad y reducción de las etapas de conversión de energía, del mismo modo pueden conectarse a la red de AC a través de inversores; mientras tanto una híbrida AC/DC ofrece mayor suministro de cargas internas DC [2].

En las redes industriales existen múltiples protocolos de comunicación, tales como el protocolo de red distribuida (DNP3, por sus siglas en inglés), arquitectura unificada de comunicaciones de plataforma abierta, PROFIBUS, *Modbus*, entre otros. En el campo industrial es necesario un sistema completo de comunicación para la interconexión integral de equipos *hardware* y *software* desde un centro de control hasta los actuadores o sensores; por lo que Modbus es el preferido por su simplicidad, escalabilidad, rendimiento y disponibilidad que ofrece en equipos industriales [1]. El protocolo Modbus tiene dos variantes: TCP y RTU. De acuerdo a [4], Modbus TCP se utiliza por su capacidad de sondeo, siguiendo un patrón de entregar una respuesta en base a una solicitud recibida; mientras que, Modbus RTU (comunicación serial sobre RS-232, RS-485 o RS-422) es más usado con las unidades de lectura o actuadores, por su velocidad.

Dentro de las redes industriales, existen varios retos que se deben analizar para lograr supervisar y monitorizar de forma adecuada los equipos interconectados; es así que en [5], se describen los principales retos y soluciones viables; enfatizando en las versatilidades que ofrece Modbus TCP como protocolo de comunicación con el centro de control bajo Ethernet (estándar IEEE 802.3), proporcionando un alto rendimiento a un bajo costo de inversión. Así mismo, [6] establece que el medio predominante para la transmisión de datos es Ethernet, tanto para redes de oficina como para redes industriales; pues proporciona gran ancho de banda, escalabilidad e interoperabilidad técnica entre sistemas digitales heterogéneos.

Otro de los aspectos importantes a destacar es el control y supervisión de equipos industriales, para lo cual se debe conocer las características de los sistemas en tiempo

real (RTS, por sus siglas en inglés); capacidad de los sistemas para soportar un error y tiempos de espera determinados por una respuesta para entender dicha demora como un error [7]. Por lo tanto, a decir de [7] es recomendable emplear Modbus TCP en la comunicación de puertas de enlace o dispositivos con Interfaz Hombre-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) con un Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés), para evitar retrasos en todo el sistema por las colas que se usan, llegando a producir falsos negativos. Por otro lado, para la comunicación con equipos de campo el protocolo óptimo es Modbus RTU, al reducir al máximo el problema de retraso que se genera con Modbus TCP.

En cuanto al sistema que gestiona el control y monitoreo de todos los equipos industriales de forma centralizada es el Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés); que a través de herramientas de comunicación y *software* obtiene datos de los equipos interconectados [8, 9]. Esta definición no necesariamente establece que se trata de una estructura completa, más bien se habla de una función de *software* para monitorizar y supervisar en tiempo real el sistema, mediante distintos complementos de nivel inferior como los PLCs e interfaces de control de cada uno de los equipos de la red [8].

Se ha comprobado que para mejorar la eficiencia general de una microrred en hasta un 75% es necesario emplear un sistema SCADA programado y desplegado con exactitud [10]. Varios estudios en distintos campos de aplicación así lo corroboran, por ejemplo, en [11] se usa SCADA para el control y supervisión de una red de sensores destinadas al control meteorológico con la interacción de Modbus. En [12] se hace una implementación de control de limpieza, llenado y empacado de botellas de agua; en este mismo sentido dentro de [13] se da la aplicación de control de aguas residuales, donde se da el tratamiento correspondiente usando SCADA en conjunto con el protocolo Modbus y OPC UA.

1.2. Identificación del problema

En el campus Balzay de la Universidad de Cuenca se encuentra el laboratorio de microrred eléctrica compuesto básicamente por tres grupos principales: Generación,

Almacenamiento y Consumo. Todo está conectado a una estructura de control, monitoreo y supervisión basada en el sistema SCADA, el cual está acoplado mediante servidores I/O Modbus declarados internamente para cada uno de los PLCs de los equipos conectados al sistema como los generadores fotovoltaicos, grupos electrógenos (GLP y diésel), el generador de microturbina y los sistemas de almacenamiento que se poseen en el laboratorio. Todos los dispositivos están conectados directamente a su PLC mediante Ethernet usando el protocolo Modbus TCP, que a su vez proviene de un convertidor RTU/TCP. Las conexiones RTU, tanto RS-232 o RS-485 se conectan directamente con los distintos inversores, actuadores y/o sensores que poseen los distintos equipos, sobre los cuales realiza el monitoreo y supervisión correspondiente.

Varios sistemas de almacenamiento de energía poseen un sistema de gestión de batería conocido como Sistema de Gestión de Batería (BMS, por sus siglas en inglés), el cual también interviene directamente en el manejo y supervisión de los equipos, por lo tanto, estos se conectan antes del inversor para poder tener conocimiento del estado de las baterías (esto únicamente para baterías de ion litio y flujo Redox de Vanadio). Así mismo se cuenta con cargas programables en AC y DC, que contienen una estructura de conexión similar a la descrita en el párrafo anterior; de la misma forma existen analizadores de red, que están conectados directamente al conmutador (*switch*) que conecta con el ordenador donde se aloja el sistema SCADA, en una máquina virtual dentro de un servidor, los analizadores obtienen la información del estado de energía de cada uno de los generadores y cargas conectados a la microrred.

Dentro del laboratorio, se han adquirido nuevos equipos que aún no se han integrado a la red industrial ni al sistema de gestión principal. Esto se debe a que al recibir los nuevos equipos, no se incluyó en la planificación y contratación los procesos de compra, despliegue y ejecución de la red física necesaria para integrarlos a la red de control y supervisión principal, que se había desplegado previamente en el primer canje de deuda. Por lo tanto, no se han llevado a cabo estudios para obtener datos de interés o analizar los protocolos de comunicación que manejan estos equipos. Actualmente, se han realizado pruebas aisladas con algunos equipos, pero se requiere un mayor estudio para obtener los datos necesarios que mejoren y contribuyan al desarrollo y gestión general del centro de investigaciones que posee la Universidad de

Cuenca.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema SCADA complementario para el monitoreo y supervisión de la celda de hidrógeno, carga y fuente programable en DC; usando el protocolo Modbus como actor principal en la comunicación entre el centro de control desarrollado en LabVIEW y cada uno de los dispositivos conectados.

1.3.2. Objetivos específicos

El presente trabajo de titulación tiene los siguientes objetivos específicos:

- Generar un diagrama estructural del estado de la red de comunicaciones del laboratorio de microrred de Balzay para brindar una idea clara de cómo están acoplados cada uno de los equipos conectados a la red.
- Desarrollar un SCADA para la integración de los nuevos equipos a monitorear para el despliegue y visualización de los datos.
- Emplear un controlador de automatización programable para la lectura, conexión, supervisión y monitoreo de los equipos con el sistema SCADA.
- Proporcionar al laboratorio de Balzay una apropiada recomendación de mantenimiento y planificación de expansión de la red industrial de la Microrred de energía eléctrica.

1.4. Revisión del estado del arte

En cuanto a trabajos relacionados, en [14] se detalla una arquitectura jerárquica que se asemeja a la presente en el laboratorio de microrred Balzay. En esta Arquitectura se describen los beneficios y las características de los sistemas SCADA, así como el uso de un servidor OPC dentro de la red. SCADA permite controlar el proceso, y por

lo tanto, optimizar cada uno de los parámetros para generar una mejor eficiencia de operación. Además, se puede visualizar en tiempo real mediante gráficas la condición de los procesos controlados, el estado de los equipos y las alarmas. También da la posibilidad de generar informes periódicos; controlar remotamente diferentes variables y, por supuesto, limitar el acceso a los distintos usuarios. Por otro lado, en [14] y [15] se habla de los beneficios y estructura del servidor OPC en un entorno industrial, que permite la integración de varios equipos PLC de distintas marcas y versiones. Esto ayuda a ampliar las aplicaciones que se pueden integrar a la red y garantiza calidad. Además, ofrece flexibilidad de manejo, ya que admite una conectividad “plug and play”.

Por otra parte, en [5], se describe un laboratorio de microrred, con elementos similares a los que se encuentran en la microrred de la Universidad de Cuenca, incluyendo sistemas de control y equipos de generación. Las recomendaciones de este texto pueden ser útiles para comprender mejor la utilidad y las funciones de dichos equipos, así como minimizar los inconvenientes asociados al trabajar con ellos.

En [16] se menciona que en el campo de las microrredes industriales se han dado cambios significativos para mantener un consumo energético adecuado y eficiente. Trabajos relacionados con [16] demuestran que los parques industriales pueden ser explotados como microrred para la generación y gestión de energía renovable, claro ejemplo es el parque industrial de inversión extranjera que se estudia como microrred industrial en East-Azarbaijan, Irán, equipada con turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos para la producción de energía limpia y rentable. Mientras que en [5] se menciona el despliegue de la microrred experimental de PRINCE Lab por parte de la Universidad Politécnica de Bari a través del protocolo Modbus TCP/IP para la transmisión de datos entre el sistema de control SCADA y los equipos de la microrred en torno a una red Ethernet con conexiones de fibra óptica entre los nodos. La arquitectura desplegada mantiene un canal de comunicación de gran velocidad para variables con requerimientos de procesamiento rápido para el control en tiempo real, facilitando la interoperabilidad con otras tecnologías.

En [17], los autores implementaron una plataforma común para microrredes que facilita la interoperabilidad entre diferentes estándares de comunicación, incluyendo el

estudio del lenguaje de configuración de subestaciones SCADA. Como resultado lograron interconectar la plataforma de microrredes con sistemas y equipos nuevos como antiguos, y se dió paso a una comunicación bidireccional entre las microrredes y sus componentes. En [10], se presentan los resultados del diseño, arquitectura e implementación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos robusto en la microrred ubicada en el LabDER del Instituto Universitario de Ingeniería Energética UPV. El sistema se implementó utilizando un PLC OMRON CJ2M CPU31 programado con el *software* CX-Programmer junto con el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP mediante gateways para Modbus RTU, RS-485 y Xanbus, lo que facilitó la integración posterior de nuevos dispositivos a la red de la microrred. Las comunicaciones con Internet y Modbus se realizan a través de la interfaz Ethernet RJ-45, y la información recolectada se centraliza en un SCADA de tres capas: física, red y control. Los componentes de la microrred de LabDER incluyen un arreglo fotovoltaico de 2.1 kW, una turbina de energía eólica de 3.5 kW, un generador eléctrico de gas de síntesis de 10 kW, un generador de diésel de 9 kW como respaldo, un banco de baterías de 12 kWh, y un inversor híbrido Xantrex que permite que la microrred funcione conectado a la red o fuera de ella [18].

En los últimos años el uso de controladores de borde han ganado terreno debido a su amplia y versátil adecuación dentro de las redes industriales. Según [19] su cercanía con los sistemas actuadores y sensores de un lado, y con el acceso a la nube o internet del otro, proporciona la ventaja de poder tomar decisiones óptimas basadas en varios factores que mejoran la operación de toda la planta. Esto no se limita únicamente a leer y transmitir los datos generados dentro de la planta, sino que también debe adaptarse a la capacidad de controlar y generar resultados analíticos de todo el perímetro. Con los nuevos requerimientos, surgen nuevos desafíos y una carga más pesada en los Controladores de automatización programable, por lo que en [20] se plantea el diseño y construcción de un PAC heterogéneo multinúcleo que utiliza la división de tareas para resolver la carga del sistema, ofreciendo un menor tiempo de respuesta en las múltiples tareas que se ejecutan. Además, proporciona un entorno con un lenguaje de programación C que utiliza módulos de entrada de texto y programación gráfica, lo que es una de las principales características de estos controladores.

En [21], se trabaja con un PAC para gestionar la carga de un banco de baterías en la microrred en Ilha Grande, noreste de Brasil. El controlador se utiliza para gestionar dos tipos de carga: cuando los niveles de carga son mínimos y cuando hay una carga parcial. La microrred está compuesta por un banco de baterías, generadores fotovoltaicos, generadores de diésel e inversores. El controlador de automatización programable tiene un buen desempeño en las funciones de control, con error nulo en estado estable, respuestas sin sobreimpulso y respuestas rápidas, lo que permite mantenerse operando dentro de la red.

1.5. Contribución

Considerando que los equipos del nuevo canje de deuda no poseen un sistema de gestión, el objetivo del trabajo de titulación es desarrollar un Sistema SCADA complementario para el control, monitoreo de dispositivos en la microrred Balzay, en particular para la carga programable en DC, fuente programable en DC y la celda de hidrógeno (electrolizador generador de hidrógeno y pila de combustible). El fundamento principal para desarrollar el presente trabajo recae en interactuar con una red industrial, a través de un sistema de gestión y supervisión útil para la microrred de Balzay, con lo cual se brinda una plataforma a los operarios del laboratorio para el control y supervisión en las distintas pruebas a realizar con los dispositivos antes mencionados; lo que permitirá aprovechar mejor los recursos del laboratorio y mejorar la eficiencia de la red. El sistema SCADA contribuirá a la modernización de la red para fomentar la interoperabilidad entre los distintos componentes.

El sistema SCADA complementario para el electrolizador generador de hidrógeno, pila de combustible, carga y fuente programable en DC incluye el diseño de la interfaz con una distribución lógica y clara, la adquisición de datos y gestión de las variables de lectura y/o escritura de cada equipo. La arquitectura del sistema contempla el uso de TCP/IP como protocolo de comunicación principal, donde los tres dispositivos principales se conecten directamente usando Ethernet con un *switch*. El electrolizador usa Modbus TCP/IP y la pila usa Modbus RTU. Mientras que la carga y la fuente programable en DC usan TCP/IP puro. Además, el uso de variables compartidas en LabVIEW hace que este protocolo tenga mayor énfasis. El *switch* se conecta al controlador de

automatización programable, que a su vez tiene conexión directa a la pila de hidrógeno mediante el puerto serial RS-232 de la placa. De esta manera, se ofrece la posibilidad de controlar y monitorear a los equipos que actualmente se encuentran aislados del sistema SCADA del laboratorio. El resultado final contempla un SCADA abierto con una amplia variedad de posibilidades de configuración para la fácil y sencilla incorporación de nuevos sistemas o dispositivos. Esto permite mantener los subsistemas interconectados y actuar sobre ellos según las especificaciones y el estado en el que se encuentre cada equipo.

El sistema de gestión SCADA del laboratorio se basa en el *software* LabVIEW de *National Instruments* (NI) con un sistema de control central jerárquico que integra los diferentes HMIs para el control, supervisión y adquisición de información en tiempo real. Además, la Universidad de Cuenca cuenta con varios controladores de automatización programables, entre ellos la sbRIO-9642 que se utiliza para manejar las comunicaciones dentro de nuestro subsistema. En este trabajo, se aprovechan las características de esta placa, describiendo como conectarse, programarla y acceder a sus funcionalidades. Este conocimiento del manejo de los procesos es compatible con la administración en LabVIEW y otros *hardwares*, *softwares* y servicios que ofrece NI, ya que son ampliamente utilizados en la automatización, control y monitoreo de las redes industriales.

Como complemento, se presenta un diagrama de la arquitectura de conexión y despliegue de las redes de comunicación de los equipos del laboratorio de la microrred de Balzay. Este diagrama muestra protocolos, conversores y estructura jerárquica de la red industrial, lo que resulta fundamental en el manejo de los dispositivos, porque nos ayuda a conocer una de sus características y brinda seguridad en su manejo al especificar que protocolo deben conocer para poder intervenir en algún punto de la red. La introducción del nuevo personal será mucho más fácil gracias a este diagrama, que proporciona información condensada de las comunicaciones. No será necesario ir a cada equipo a ver que protocolos maneja y como está conectado, lo que reducirá significativamente el tiempo de acoplamiento.

Fundamentos teóricos

En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos y conceptos relevantes que servirán de apoyo para el desarrollo del trabajo de titulación. La sección 2.1 presenta una descripción general de la cuarta revolución industrial. La sección 2.2 describe la pirámide de automatización industrial. La sección 2.3 presenta los sistemas de comunicación industrial existentes. La sección 2.4 describe el protocolo de comunicación Modbus. La sección 2.5 presenta una descripción de las redes inteligentes. La sección 2.6 presenta el sistema SCADA en el entorno industrial. Finalmente, en la sección 2.7 se define a la placa sbRIO-9642 como controlador de automatización programable.

2.1. Cuarta revolución industrial

La necesidad de mejorar las formas de producción ha dado paso a cuatro revoluciones industriales bien marcadas, que van desde una producción mecánica a una era de fabricación inteligente. Cada revolución se considera como un acontecimiento por separado, sin embargo, en conjunto se entienden como la evolución de las formas de producción. La primera revolución industrial dió paso a la mecanización de la producción y la fabricación de máquinas, siendo la principal invención la máquina de vapor. La segunda revolución impulsó la producción en masa a través del petróleo y la energía eléctrica. En cuanto a la tercera revolución se caracterizó por la automatización de la industria a través de la electrónica, las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) e inicio de Internet. De esta forma se llegó a la cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0 y caracterizada principalmente por el dominio digital e inmersión en la sociedad [22, 23].

El Internet de servicios en procesos de producción y el paradigma del Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) enfocado al medio industrial dieron lugar a la Cuarta Revolución Industrial [23, 25]; concepto impulsado por la fusión de tecnologías digitales como los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés). Entre los escenarios de aplicación más significativos se menciona: robótica, automatización inteligente, Big Data, impresión 3D, sensores inteligentes, computación en la nube, comunicación entre máquinas (M2M, por sus siglas en inglés), entre otros [23, 26].

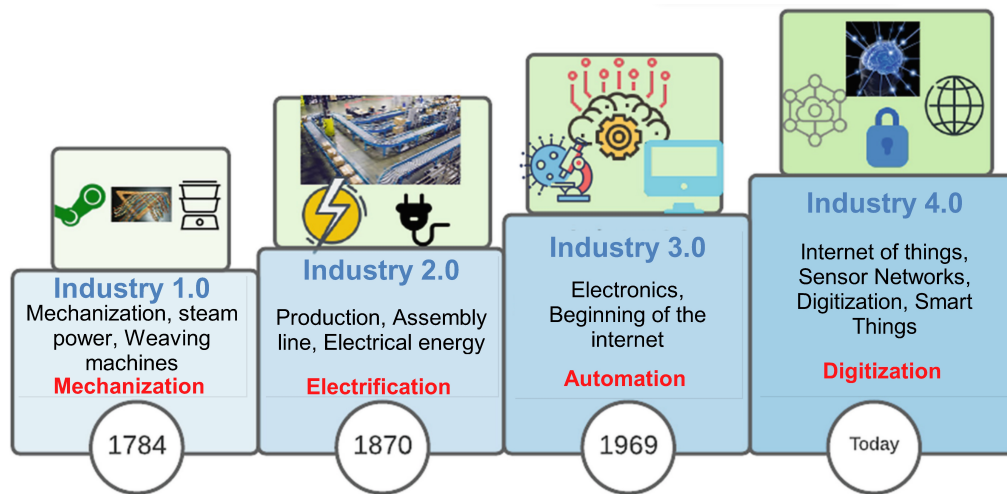


Figura 2.1: Cronología de las revoluciones industriales. Fuente: [24].

Estas tecnologías permiten la interoperabilidad e integración en tiempo real de múltiples procesos controlados remotamente, lo que proporciona facilidad y comodidad en la operación industrial a larga distancia.

La industria 4.0 incorpora tecnologías de la información en la producción industrial a través de CPSs y asistencia IoT, siendo este último el encargado de la incorporación de cualquier dispositivo inteligente dentro y fuera de una fábrica industrial [27].

2.1.1. Características

En [27] se mencionan las principales características de la industria 4.0:

- **Interoperabilidad:** Capacidad de integrar diferentes procesos en tiempo real.
- **Flexibilidad:** Adaptación a circunstancias cambiantes sin alterar otros procesos.
- **Descentralización:** Independencia de un proceso central con un entorno más dinámico, permitiendo una mayor agilidad en la toma de decisiones.
- **Autonomía:** No existe dependencia de terceros para la ejecución de procesos dentro de una industria determinada.
- **Configurabilidad:** Tanto el *hardware* como *software* de una planta pueden reutilizarse o reemplazarse según sea necesario.

2.1.2. Internet Industrial de las cosas

EL Internet de las cosas incluye cualquier componente físico con acceso a internet sin la intervención humana directa, mientras que el Internet Industrial de las Cosas (IIoT, por sus siglas en inglés) es una subcategoría de IoT que se enfoca en la conexión de sistemas y dispositivos en el área industrial. Es así que el IIoT permite la recolección, gestión y análisis en tiempo real de información de los objetos conectados a la red, dando lugar a fábricas ecológicas e inteligentes. El empleo de sensores, actuadores y transmisores de datos en plantas mejora los procesos industriales y agrega valor de mercado [28]. Los principales desafíos de comunicación que enfrenta el IIoT son: establecer conexiones seguras y precisas mediante diferentes medios [24].

En [25] se menciona que la Universidad Técnica de Dortmund establece que la industria 4.0 vista desde el punto industrial del Internet of Things (IoT) se basa en los siguientes principios de diseño:

- Interoperabilidad: Capacidad de interconexión de diferentes sistemas a través del IoT.
- Virtualización: Copia virtual de toda la información recolectada.
- Descentralización: Autonomía de cualquier elemento conectado a internet.
- Capacidades de tiempo real: Control, gestión y análisis de datos en tiempo real.
- Orientación al servicio: Capacidad de ofrecer servicios para la interacción y creación de nuevas aplicaciones.
- Modularidad: Flexibilidad para añadir o sustituir cualquier componente en una planta industrial.

2.1.2.1. Arquitectura

Debido a que no todos los dispositivos IIoT son diseñados con el mismo propósito, no existe una arquitectura estándar. Sin embargo, los autores en [29] proponen un posible modelo arquitectónico IIoT en función de lo establecido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y otras publicaciones revisadas, definiendo cuatro niveles como

se presenta en la Figura 2.2. El detalle se presenta a continuación:

1. Capa de datos: Se encarga de la automatización y recolección de datos a través de dispositivos físicos como sensores, actuadores, unidades de control, etc.
2. Capa de aplicación: Es el medio de acceso para la supervisión y gestión de información recopilada.
3. Capa de seguridad: La gran cantidad de información generada por la red IoT industrial implica garantizar la seguridad de los datos frente a vulnerabilidades y amenazas del sistema.
4. Capa de servicio: Plataforma empleada para la conectividad entre servicios y sistemas remotos. Esta capa permite el estudio de datos recolectados a través de distintos servicios en la nube.

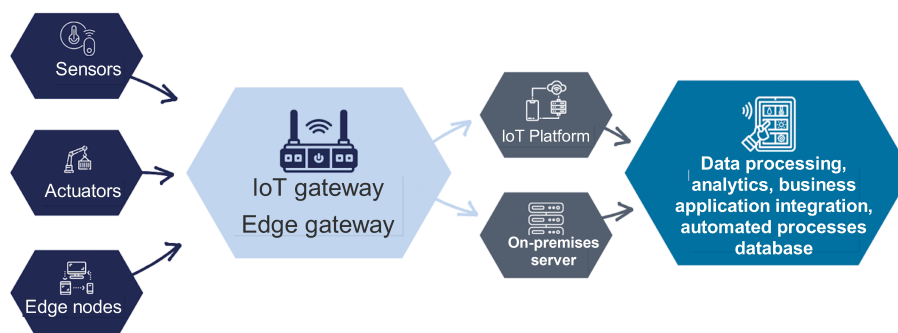


Figura 2.2: Arquitectura Industrial Internet of Things (IIoT). Fuente: [30].

2.2. Automatización industrial

Con la transformación digital en la industria, se automatizó en lo posible los procesos llevados a cabo en cualquier planta industrial. Para alcanzar una adecuada automatización se empleó el paradigma de pirámide de automatización industrial.

2.2.1. Pirámide de automatización industrial

La pirámide de automatización industrial define un sistema con actividades específicas y rendimiento requerido. Se conforma por niveles jerárquicos que en conjunto

mejoran la calidad de cualquier proceso industrial [31]. En la Figura 2.3 se observan los cinco niveles de la pirámide.

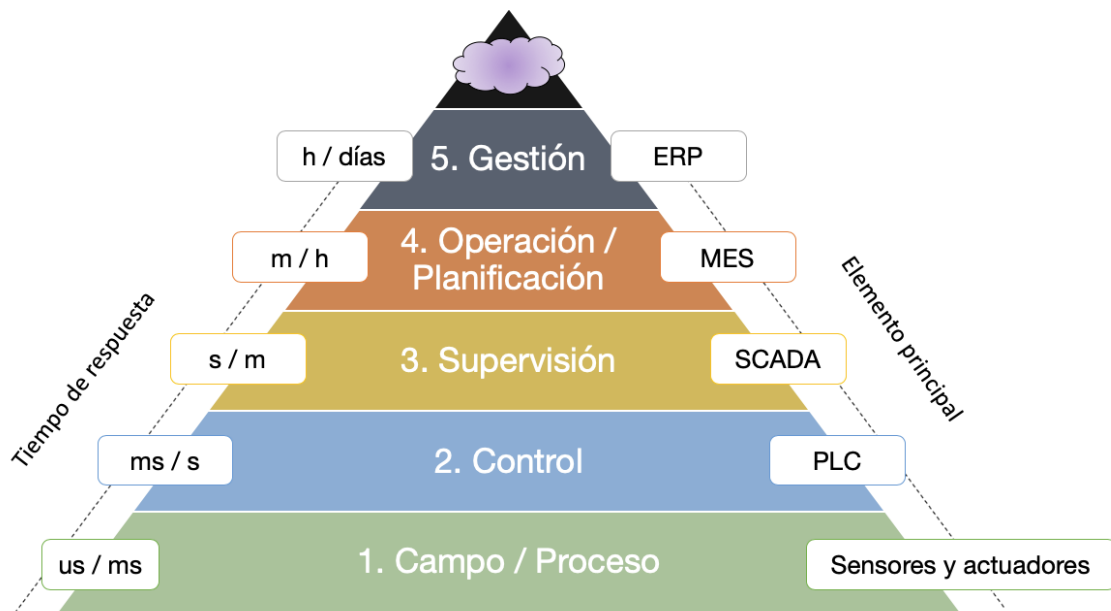


Figura 2.3: Pirámide de automatización industrial. Fuente: [32].

2.2.1.1. Nivel de campo

El primer nivel de la pirámide de automatización industrial se conforma por la instrumentación básica empleada para el inicio del proceso de automatización; el objetivo es generar señales observables desde dispositivos electrónicos (sensores, actuadores o similares) que interactúan directamente con algún proceso de producción en tiempo real. La calidad y competitividad alcanzable depende del grado de limitaciones de los dispositivos empleados en el nivel de campo [31, 32].

2.2.1.2. Nivel de control

Es el primer nivel inteligente de la pirámide porque recibe y transmite las señales generadas por los dispositivos de campo. La recolección de datos se realiza a través de unidades de control como: Controladores lógicos programables (PLC), Sistemas de control distribuido (DSC), Unidades terminales remotas RTU, entre otros. De esta

forma, los dispositivos lógicos controlan los componentes del nivel de campo para alcanzar requisitos predefinidos en una planta industrial [31–33].

2.2.1.3. Nivel de supervisión

Este nivel se encarga de la supervisión y control de alto nivel de toda la información recolectada en subprocesos y subsistemas de acuerdo a las necesidades de determinada planta. Para llevar a cabo un análisis continuo de los datos de múltiples procesos complejos tanto localmente como de forma remota, se utilizan Sistemas de Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés), que incluyen estaciones de trabajo e interfaces hombre-máquina (HMI). Además, en este nivel se suelen utilizar registros históricos de procesos para realizar un estudio posterior de patrones y anomalías en la planta industrial [31–33].

2.2.1.4. Nivel de operación

El nivel de operación o planificación emplea las TIC para monitorizar en su totalidad el proceso de fabricación desde el inicio hasta el final, garantizando la gestión de datos internos/externos de determinada planta. Para la toma de decisiones se emplean Sistemas de Ejecución de la Producción (MES, por sus siglas en inglés) que optimizan la producción en tiempo real a través del seguimiento y supervisión de todos los recursos [31, 32]. Los MES conectan a nivel empresarial los sistemas de control y gestión, optimizando la producción [34].

2.2.1.5. Nivel de gestión

Este nivel gerencial utiliza un sistema llamado Planificación de Recursos Empresariales (ERP, por sus siglas en inglés) para monitorizar y controlar la tecnología de los niveles inferiores. Un ERP es un *software* integrado basado en ordenadores de alto rendimiento que incrementan la productividad de la información recolectada en una misma plataforma. Los datos gestionados van acorde a la precisión y realidad que maneja determinada empresa en todos sus niveles [31–33].

2.3. Sistemas de comunicación industrial

Los sistemas de comunicación industrial son redes que se utilizan en la automatización de fábricas y procesos para intercambiar información de manera rápida y precisa entre todos los niveles de la pirámide de automatización. Estos sistemas deben cumplir con requisitos como el tiempo real, el determinismo y la confiabilidad. Existen tres tipos de sistemas de comunicación industrial: buses de campo, redes Ethernet industrial en tiempo real (RTE, por sus siglas en inglés) y redes inalámbricas industriales. La elección de un sistema u otro dependerá en gran medida de las tecnologías de información y redes de comunicación disponibles [35, 36].

2.3.1. Clasificación

2.3.1.1. Buses de campo

Los buses de campo son sistemas de comunicación utilizados principalmente en los niveles inferiores de la pirámide de automatización. Inicialmente se intentó establecer una norma universal para la automatización industrial, pero, las diversas limitaciones y requisitos impidieron mantener un único bus de campo. Por lo tanto, se optó por priorizar la interoperabilidad entre sistemas de comunicación y los buses de campo jugaron un papel fundamental para la evolución de los sistemas de automatización modernos [35, 36]. Los principales representantes son:

- *Process Field Bus* (PROFIBUS): Es un bus de campo sencillo basado en el acceso paso de testigo (token-pass) y servicios orientados a objetos para mantener un control distribuido. Tiene un amplio campo de aplicación con protocolos derivados como Profisafe y Profibus PA [37].
- *World Field Instrumentation Protocol* (WORLDFIP): Bus de campo ideal para aplicaciones de tiempo crítico, ya que maneja una base de datos distribuida que se actualiza periódicamente. Emplea el modelo productor/consumidor entre el nivel de campo y el nivel de control para producir, procesar y consumir variables de proceso. [37].
- Interbus: Es un sistema en anillo que permite la transmisión unidireccional de

datos entre dispositivos a través de un único cable ramificado. Al amplificar la señal de datos se reduce el ruido y se aumenta la velocidad en grandes distancias. El sistema de bus maestro/esclavo tiene una línea principal y subredes con un máximo de 16 niveles de profundidad [37].

- *Foundation Fieldbus* (FF): Organización de unidades de automatización, sensores y actuadores para la industria. Este protocolo está influenciado por WORLD-FIP y mantiene un sistema de comunicaciones bidireccional para la distribución completa de funciones de control entre dispositivos [37].
- *Controller area network* (CAN): Sistema de bus de campo orientado a mensajes, donde cada mensaje se asocia a un identificador que determina la prioridad y contenido. CAN se utiliza ampliamente en la industria de la automoción y ha sido adoptado en otros campos de aplicación como las redes industriales, equipos médicos, robótica, entre otros. Algunos de los principales protocolos de nivel superior basados en CAN incluyen CANopen, DeviceNet, FTT-CAN y TTCAN [37].
- *Modbus RTU* : Medio de comunicación serial para dispositivos del nivel de campo a través de una RTU para la transmisión de tramas RTU .

2.3.1.2. Redes ethernet industrial

Para alcanzar un mayor rendimiento en redes industriales complejas, se propuso emplear Ethernet como estándar principal para el intercambio de datos con una serie de modificaciones adaptadas al entorno industrial. Las redes Ethernet industrial en tiempo real (RTE, por sus siglas en inglés) fueron diseñadas para asegurar la coexistencia entre el tráfico en tiempo real y tráfico de uso general a nivel industrial [35, 36]. Algunos ejemplos populares son:

- *Ethernet for Control Automation Technology* (EtherCAT): Sistema de bus de campo basado en Ethernet para la automatización de aplicaciones con tiempos de ciclos cortos y bajas variaciones en el tiempo de retardo (jitter). Emplea un modelo maestro/esclavo y a nivel físico una topología en anillo. Caracterizado por su interoperabilidad con redes TCP/IP, Ethernet/IP o PROFINET [37].
- *Process Field Network* (PROFINET): Estándar de red industrial optimizado que

permite al usuario seleccionar el tipo de intercambio de datos en aplicaciones con requerimientos estrictos como velocidad de transmisión o ciclos de actualización de datos en decenas de milisegundos [37].

- **Ethernet/IP:** IP en Ethernet/IP significa protocolo industrial y no protocolo de internet. ControlNet y Ethernet/IP emplean los mismos protocolos de capa de aplicación, por lo cual los mensajes pueden ser enrutados entre DeviceNet ControlNet y Ethernet/IP [37].
- **Ethernet Powerlink (EPL):** Red ethernet en tiempo real caracterizada por mantener ciclos de comunicación rápidos y de baja fluctuación. Trabaja bajo el protocolo CANopen para asegurar la compatibilidad con los sistemas existentes, de ahí que generalmente EPL es conocido como CANopen sobre ethernet [37].
- **Modbus TCP:** Bajo TCP/IP se establece un modelo cliente-servidor para la transmisión de tramas por el puerto 502, considerando que un mismo dispositivo puede ser cliente y servidor al mismo tiempo.

2.3.1.3. Redes inalámbricas

Son la última tecnología introducida en el campo de las comunicaciones industriales. El interés en este tipo de redes se debe a su capacidad de reducir cableado y permitir el uso de dispositivos móviles. Aunque las redes inalámbricas siguen siendo objeto de investigación, actualmente se consideran como extensiones inalámbricas a los sistemas de bus de campo y Ethernet para el intercambio de datos de manera transparente. En este sentido, los estudios se centran en la familia de estándares IEEE 802.11 (*Wireless Local Area Network (WLAN)*), así como IEEE 802.15.4 (*Wireless Personal Area Network (WPAN)*). Por ejemplo, ZigBee ha adoptado el estándar 802.15.4 para la automatización de edificios así como en sistemas de producción [35, 36].

2.4. Protocolo de comunicación Modbus

Modbus fue creado en 1979 por *Modicon*, siendo el primer estándar ampliamente aceptado para la comunicación industrial en general. Actualmente el protocolo es

controlado e impulsado por Modbus-IDA para la evolución y distribución abierta del estándar. Modbus brinda un medio de comunicación para que un dispositivo lea y escriba datos a áreas de memoria localizadas en otro dispositivo remoto. Emplea el modelo cliente-servidor, en el que un cliente puede realizar peticiones a varios servidores Modbus diferentes y un servidor Modbus puede responder peticiones de varios clientes. La capacidad de procesamiento del servidor depende de las propiedades de sí mismo. Existen cuatro áreas de memoria en un servidor(ver Tabla 2.1), en cada área los elementos son direccionados en un rango que va de 1 a 65.536. Sin embargo, en las tramas enviadas entre cliente y servidor por lo general estos valores se codifican en un rango de 0 a 65.535, lo que puede ocasionar errores por un paso [37]. La familia de protocolos Modbus conocidos se presentan en la Figura 2.4.

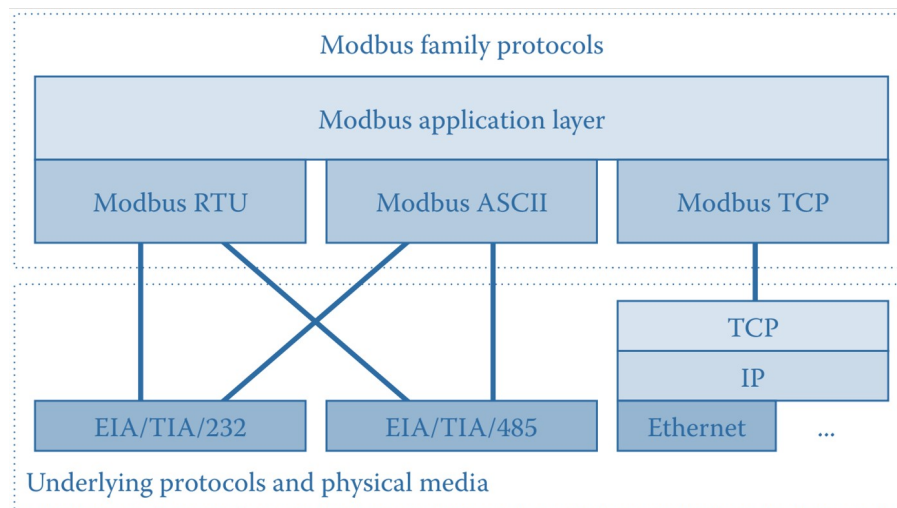


Figura 2.4: Familia de protocolos Modbus. Fuente: [37].

Tabla 2.1: Áreas de memoria del modelo de datos Modbus.

Nombre del área de memoria	Dirección Absoluta	Rango de direcciones	Tamaño (Bits)	Permisos de acceso
Coils	000001-065535	1-65 536	1	Lectura/Escritura
Entradas discretas	100001-165535	1-65 536	1	Lectura
Registros de ingreso	300001-365535	1-65 536	16	Lectura
Registros de retención	400001-465535	1-65 536	16	Lectura/Escritura

Modbus está estructurado por dos capas: capa de aplicación y capa inferior, que se describen en las siguientes subsecciones.

2.4.1. Capa de aplicación Modbus

La capa de aplicación Modbus se encarga de solicitudes de funciones o servicios hacia el servidor, cómo estas solicitudes se codifican en una Unidad de Datos de Protocolo de Capa de Aplicación (APDU, por sus siglas en inglés)+, así como las acciones que realiza el servidor en nombre del cliente. Existen tres tipos de APDU, cada uno con un tamaño máximo de 253 bytes. Los tres APDU empiezan con un byte de función de solicitud o respuesta, seguido por un número variable de bytes que indican los datos o parámetros de determinada función, así como el número de registros de memoria a los que se ingresen. La descripción de cada APDU se presenta a continuación:

1. Solicitud APDU: Solicitud de datos enviada por el cliente al servidor
2. APDU de respuesta: Respuesta del servidor cuando una función se completa satisfactoriamente.
3. APDU de respuesta de excepción: Si se produce un error durante el procesamiento de una solicitud, se envía una notificación de error desde el servidor al cliente.

De igual forma, Modbus determina que las direcciones de 16 bits se codifiquen con big-endian, es decir, el byte más significativo se transmite primero. Sin embargo, depende de un fabricante dejar a elección del usuario si se codifica con big-endian o little-endian.

2.4.2. Capa inferior Modbus

Define el tipo de encapsulamiento y codificación en tramas de las APDU de capa superior. Existen dos versiones de esta capa inferior: Serial (ASCII, RTU) y TCP.

2.4.2.1. Modbus Serial

Modbus serial hace referencia a aquellos dispositivos conectados a un medio físico como un bus de serie. En el modelo empleado maestro/esclavo, un cliente Modbus

puede convertirse en maestro, mientras que un servidor Modbus se convierte en esclavo. El maestro inicia la comunicación al enviar peticiones a los esclavos una a la vez, los cuales responden al maestro con la información solicitada. El intercambio petición/respuesta puede ser unicast cuando una solicitud es enviada a un único esclavo o broadcast cuando el maestro envía solicitudes a varios esclavos.

Cada red serial Modbus tiene un único maestro y un máximo de 247 esclavos, en este sentido un dispositivo puede ser esclavo o maestro según sea necesario pero no ambos roles al mismo tiempo. De forma práctica la asignación de roles es estática debido a que Modbus no especifica cómo gestionar el intercambio dinámico de roles.

Los APDUs empleados en el intercambio solicitud/respuesta se transmiten dentro de tramas seriales que tienen la estructura de la Figura 2.5(a):

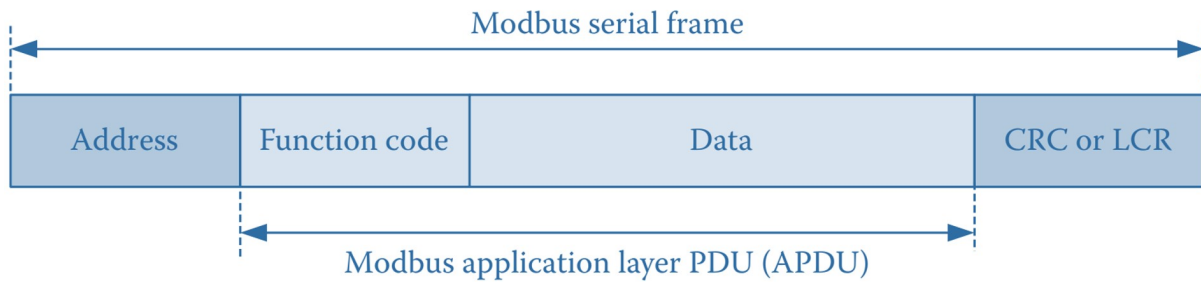
- Dirección: En una trama de solicitud identifica la dirección del destinatario, mientras que en una trama de respuesta identifica la dirección del remitente. Un esclavo tiene una dirección única en el rango 1-247, debido a que el 0 utiliza el maestro para mensajes de difusión.
- APDU: Es la capa de aplicación *Protocol Data Unit* (PDU) formado por un código de función y datos de información
- *Cyclic Redundancy Check* (CRC) o *Longitudinal Redundancy Check* (LRC): Son métodos de detección de errores y depende del modo de transmisión ya sea RTU o ASCII. Entre los dos, el método CRC tiene una mayor capacidad de detección.

Los modos de transmisión definen diferentes formas de codificar el contenido de una trama, en el caso de ASCII y RTU pueden ser implementados uno o el otro, pero no simultáneamente.

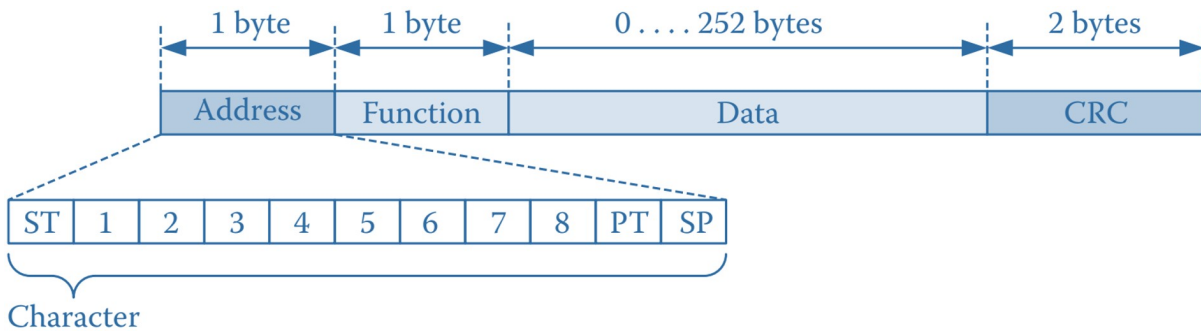
Los modos de interfaz RTU y ASCII se detallan a continuación:

- Modbus RTU

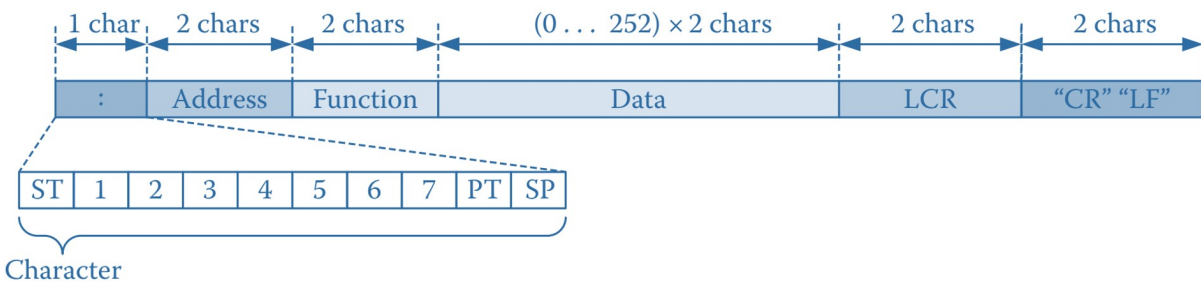
Modbus RTU emplea transmisión asíncrona, en una trama cada byte se transmite como un carácter RTU de 11 bits como se observa en la Figura 2.5(b). La estructura se detalla a continuación:



(a) Trama de Protocolo Modbus Serial.



(b) Trama de Modbus en Modo Remote Terminal Unit (RTU).



(c) Trama de Modbus en Modo ASCII.

Figura 2.5: Tramas de Modbus Serial. Fuente: [37].

- Un bit inicial de sincronización (ST)
- 8 bits de datos, siendo el primer bit enviado el menos significativo
- 1 bit de paridad para la detección de errores denominado (PT)
- 1 bit de parada SP para asegurar un tiempo de espera mínimo entre caracteres consecutivos

El modo RTU requiere de un control estricto de temporización, de tal forma que el tiempo necesario de transmisión dentro de una trama RTU es de un mínimo de 1.5 veces por carácter, mientras que la separación entre tramas consecutivas es de al menos 3.5 veces el carácter.

■ Modbus ASCII

Al igual que el modo RTU, el modo ASCII emplea una transmisión asíncrona, con la diferencia que cada byte se transmite como dos caracteres ASCII (0-9, A-F), cada uno de 10 bits. Cada carácter ASCII se compone de la siguiente manera:

- Un bit inicial de sincronización (ST)
- 7 bits de datos, siendo el primer bit enviado el menos significativo.
- 1 bit de paridad para la detección de errores denominado (PT)
- 1 bit de parada SP para asegurar un tiempo de espera mínimo entre caracteres consecutivos

A diferencia del modo RTU, el modo ASCII es más fácil de implementar al no requerir un control de temporización particular, sin embargo se debe considerar la duplicación del tamaño de la trama, la estructura de la trama ASCII se observa en la Figura 2.5(c).

Modbus serial admite dos tipos de capas físicas que pueden emplearse en modo ASCII o RTU.

- RS485: Red multipunto compuesta por lo general por 32 dispositivos por segmento de red, dichos segmentos pueden conectarse por repetidores. La red soporta 1 maestro a la vez y un máximo de 247 esclavos en distancias de hasta 1000 m, con velocidades de transmisión altas.
- RS232: Red punto a punto compuesta por un maestro y un esclavo. La red se emplea en distancias menores a 20m con velocidades de transmisión bajas o medias

2.4.2.2. Modbus TCP

Modbus TCP establece una conexión TCP/IP bajo un modelo cliente-servidor, el intercambio solicitud/respuesta se realiza por tramas Modbus TCP/IP. Un servidor Modbus escucha por el puerto 502 (puerto registrado y reservado para aplicaciones Modbus)

las solicitudes de los clientes que desean establecer una nueva conexión con el servidor. Un dispositivo puede ser cliente y servidor al mismo tiempo.

Una trama de Modbus TCP consta de dos partes como se observa en la Figura 2.6: Un encabezado *Modbus Application Protocol* (MBAP) y el APDU de la capa de aplicación. No existe un campo de detección de errores, debido a que en la pila TCP/IP se incluye mecanismo de detección. El encabezado MBAP tiene cuatro campos:

- Identificador de transacción (ID): Debido a las múltiples transacciones existentes, se emplea un identificador para hacer coincidir las tramas de solicitud con las tramas de respuesta correspondientes
- Identificador de protocolo: Identifica el protocolo de la trama
- Longitud: Permite identificar los límites de las tramas
- Identificador de unidad: Identifica la unidad de destino que actúa como esclavo

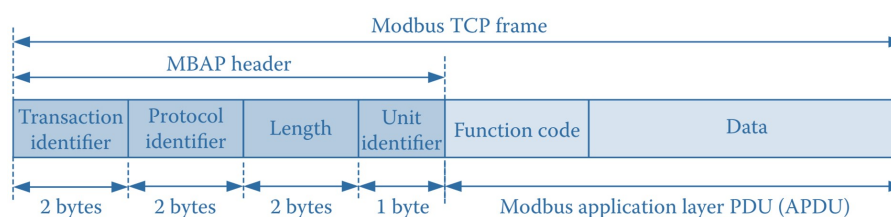


Figura 2.6: Trama de Modbus TCP. Fuente: [37].

2.5. Redes inteligentes

Con la evolución de las tecnologías de IoT se ha buscado fusionar energía e información a través de las *Smart Grid* (SG, por sus siglas en inglés). Las SG actúan como una red eléctrica unida a tecnologías de la información y comunicación (TIC) para recopilar y analizar datos que no pueden ser heredados como las líneas de transmisión, líneas de distribución y subestaciones. Una SG es una red distribuida que maximiza la potencia disponible generando y distribuyendo electricidad en función de una carga [27, 38]. En [39] se menciona que una red inteligente debe tener los siguientes atributos:

- Acceso a la información de uso y precios de energía para mejorar ciertas limitaciones del sistema eléctrico actual.

- Reducción del impacto ambiental provocado por el sector eléctrico
- Optimización y gestión inteligente del suministro eléctrico
- Garantizar seguridad y calidad del suministro eléctrico

2.5.1. Microrredes inteligentes

Una *Microgrid* (MG, por sus siglas en inglés) es un sistema eléctrico único e independiente que proporciona energía a un área geográfica limitada, incorporando generación, transmisión y distribución a través de recursos energéticos (renovables y/o no renovables), cargas eléctricas y sistemas modernos de automatización y supervisión conectados a una red de comunicaciones. La microrred tiene una estructura flexible ya que puede funcionar de manera aislada o paralela a la red pública para un suministro eléctrico auto-sostenible. Dentro de este paradigma, las redes de comunicación juegan un rol importante para garantizar fiabilidad y seguridad en la automatización y supervisión en tiempo real, siendo la interoperabilidad el principal reto en el despliegue de redes inteligentes [1, 3, 38, 40]. Las tres características clave de una microrred son:

- Local: La energía generada es local, para evitar pérdidas de energía eléctrica a larga distancia.
- Independiente: Se mantiene un suministro continuo de energía independiente de la red pública ya sea en modo conectado o aislado de la red principal.
- Inteligente: Una microrred crea soluciones innovadoras en control y gestión para maximizar la eficiencia energética y minimizar los costos de energía [38].

2.5.1.1. Funcionamiento

Por lo general, una microrred funciona conectada a la red eléctrica cuando ésta se encuentra disponible, sin embargo, en casos de interrupción de suministro eléctrico, la microrred funciona con sus propias fuentes de generación en modo aislado. En este sentido existen dos modos de operación: Modo conectado a la red eléctrica y modo aislado, el cambio se realiza por un único punto de acoplamiento común (PCC, por sus

siglas en inglés). En la Figura 2.7 se observa que cuando la microrred se conecta a la red pública el interruptor permanece cerrado, por lo cual el proveedor eléctrico regula la frecuencia y tensión del sistema. Si existe un exceso de energía generada por la microrred se inyecta a la red pública mientras que si la generación es insuficiente se consume energía de la red. En el modo aislado el interruptor permanece abierto para que la red principal no suministre energía a la microrred, por lo cual la frecuencia y tensión no dependerán de las variaciones de la red pública. Para garantizar un funcionamiento estable y seguro se reduce la capacidad de generación, priorizando el suministro continuo en cargas críticas, esto regula la producción de los Sistemas de Generación Distribuida, a diferencia del modo de red conectado donde se tiene una máxima eficiencia económica [38, 40].

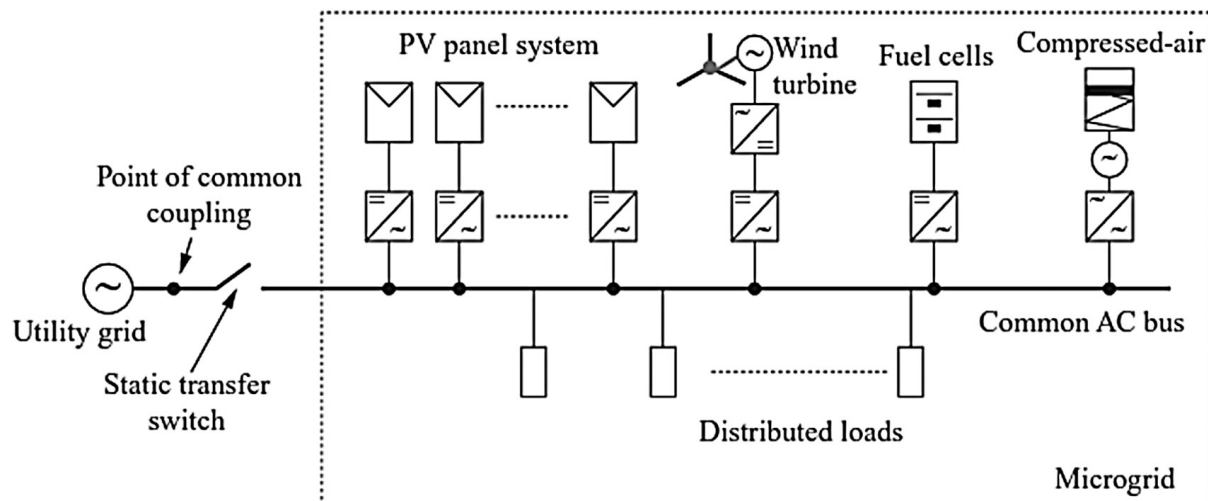


Figura 2.7: Estructura general de una microrred. Fuente: [38].

2.5.1.2. Elementos

Por lo general los componentes de una microrred son:

- Generación Distribuida (GD): Incluye cualquier tipo de energía como la fotovoltaica (FV), eólica, pila de combustible, combinación de calor y electricidad (CHP) para satisfacer la demanda de la microrred.
- *Energy Storage System* (ESS): Incluyen sistemas físicos, químicos, electromagnéticos y electroquímicos para el almacenamiento de energía renovable, cambio

de carga y arranque autónomo de la microrred.

- Cargas controlables: Incluye cargas críticas y comunes
- Dispositivos de supervisión y control: Componen el sistema de control para GD, ESS y transferencia entre el modo conectado a la red y modo aislado, asegurando así la supervisión y gestión de la energía en tiempo real [40]

Además existen otros sistemas con los cuales las microrredes se interconectan, como: el *Energy Management System* (EMS), el Sistema de gestión de distribución (DMS) y el Sistema de Gestión del Mercado (MMS) [17].

2.5.1.3. Generación Distribuida

Entre los principales tipos de GD se tiene:

- Energía Fotovoltaica (FV): medio de generación eléctrica a través de la conversión de energía solar en electricidad. El principal elemento utilizado para este propósito es una celda fotovoltaica, siendo las celdas de silicio monocristalino o policristalino los más comunes.
- Microturbinas: tienen una vida útil más larga que un generador a diésel y se pueden emplear para varios combustibles (gas natural, metano, gasolina, etc). Una microturbina impulsa un rotor a girar al convertir un combustible en gas a alta temperatura y presión. La microturbina puede ser de eje único o dividido. En cuanto a la estructura de eje único, se tiene un compresor, turbina radial y cámara de combustión de bajas emisiones.
- Energía de biomasa: se entiende por biomasa la materia orgánica generada por el proceso de fotosíntesis. La energía puede obtenerse de cultivos, madera, carbón, algas, recursos orgánicos industriales u otros. La generación de electricidad puede ser por combustión, gasificación o metanización [40].

2.5.1.4. Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía permite equilibrar los problemas de oferta y demanda de una carga, entre las tecnologías ESS conocidas se tiene:

- Almacenamiento por bombeo: sistema físico ampliamente utilizado al utilizar depósitos de agua a diferentes alturas para generar electricidad cuando el agua baja de un depósito a otro.
- Super condensadores: sistema electromagnético que emplea condensadores de doble capa eléctrica para suministrar energía tras una caída de tensión o perturbaciones instantáneas, sin embargo, la cantidad y duración de almacenamiento es limitado.
- Baterías: Sistema electroquímico que se presenta de diferentes formas:
 - Batería de plomo-ácido: tecnología madura de bajo costo pero alta fiabilidad, sin embargo su vida útil disminuye cuando funciona a elevadas temperaturas y su fabricación no es amigable con el medio ambiente.
 - Baterías de iones de litio: prometedora tecnología ES a futuro por tener una autodescarga baja que no contamina, sin embargo su vida útil es 10 veces menor a una celda.
 - Batería de flujo redox de vanadio: consiste en una batería recargable de flujo caracterizada por su descarga total, larga vida útil y con una potencia nominal independiente de la capacidad nominal. De hecho, la capacidad mejora con el incremento de concentración del electrolito [40].

2.6. Sistema SCADA en automatización industrial

Frente a la creciente demanda en el sector energético, es esencial la optimización de recursos disponibles, por lo cual se busca automatizar cada sector del sistema eléctrico (generación, transmisión y distribución). La evolución del control distribuido en la automatización de la industria se dió con los sistemas de control y adquisición de datos (SCADA). Un sistema SCADA se define como una tecnología integrada compuesta por equipos controlados desde una posición remota para llevar a cabo acciones sobre procesos geográficamente distribuidos. De esta forma se lleva a cabo la adquisición y control de procesos para una automatización completa [41]. En la industria energética, las principales ventajas de un sistema SCADA son:

- Medidas oportunas para solucionar de forma rápida interrupciones inesperadas, por ejemplo, el restablecimiento casi instantáneo de energía en el caso de fallas.
- Reducción de costos en mano de obra y mantenimiento de equipos gracias a la automatización de procesos.
- Mejor gestión de la potencia activa y reactiva debido a la precisión de datos registrados en el sistema SCADA.
- Disposición oportuna para la toma de decisiones precisas y adecuadas sobre las condiciones del sistema, reduciendo el número de errores posibles.

2.6.1. Componentes

Los componentes principales de un esquema SCADA son:

- Dispositivos de interfaz de información: Incluye controladores programables como RTUs, PLCs o los actuales Dispositivos electrónicos Inteligentes (IED, por sus siglas en inglés). En el caso de una RTU recolecta información de los dispositivos de campo para su procesamiento y transmisión a la estación principal, la cual responde al RTU con las acciones que deben realizarse en campo. Por otra parte, un IED es cualquier dispositivo que incorpora uno o más procesadores para el intercambio de datos, con características de integración e interoperabilidad para el control y análisis completo de un sistema.
- Sistema de comunicación: hace referencia a los canales y protocolos de comunicación para el transporte de datos entre nivel de campo y control. La principal barrera es el ancho de banda del canal que limita la velocidad de transmisión. Puede ser satélite, radio, teléfono y televisión por cable o similares.
- Unidad central de proceso: por lo general se encuentra en una estación maestra donde los operadores supervisan y toman decisiones de control sobre el estado de los procesos que se llevan a cabo en el nivel de campo.
- Interfaz hombre-máquina (HMI, por sus siglas en inglés): se refiere a una interfaz creada por código informático para la interacción entre la unidad central y operadores o usuarios en tiempo real a través de una representación gráfica del

sistema [27, 41].

2.7. Controladores de automatización programable

En general, los PLC dominaban el campo de la automatización. Sin embargo, la búsqueda de optimización dió paso a otros controladores industriales con capacidades extendidas, como los Controladores de automatización programable (PAC, por sus siglas en inglés) que son PLC robustos de próxima generación. En este sentido un PAC integra procesos de coma flotante (operaciones con números reales y fraccionarios) con amplias capacidades de comunicación, opciones sofisticadas de programación basados en PC así como E/S industriales para el registro de datos [42, 43].

2.7.1. sbRIO-9642

La empresa *National Instruments* (NI) ha diseñado múltiples controladores programables para la adquisición de datos, uno de estos dispositivos es el controlador CompactRIO Single-Board que es un sistema embebido independiente que integra un procesador en tiempo real, un FPGA y módulos de E/S en un solo PCB. Mantiene un diseño flexible, fiable y de alto rendimiento. El controlador está configurado con el lenguaje de programación LabVIEW [44].

La descripción de los componentes principales del controlador de la Figura 2.8 se detalla en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Componentes principales sbRIO-9642.

1	Conector para Módulo 3 Serie C, J10	11	Puerto Ethernet RJ-45, J2
2	Orificios de montaje chapados.	12	Puerto serial RS-232, J1
3	Conector análogo E/S, J7	13	Interruptores DIP.
4	Conector para Módulo 2 Serie C, J9	14	Botón de reinicio.
5	Entrada digital de 24V, J6	15	Terminal de tierra, P1
6	Conector para Módulo 1 Serie C, J8	16	LEDs
7	Salida digital de 24V, J5	17	Conector de alimentación, J3
8	E/S digital de 3.3V, P4	18	E/S digital de 3.3V, P3
9	Batería de respaldo	19	E/S digital de 3.3V, P5
10	E/S digital de 3.3V, P2		

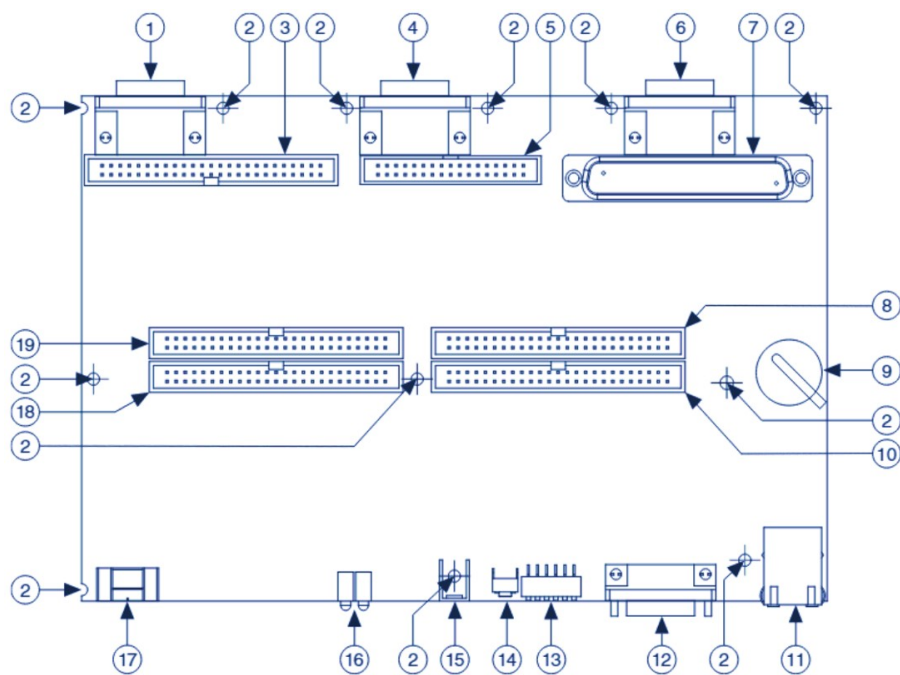


Figura 2.8: Diagrama del controlador CompactRIO Single-Board. Fuente: [44].

Metodología

Este capítulo proporciona una descripción detallada del procedimiento llevado a cabo para la implementación del sistema SCADA propuesto. De esta forma, se presenta una base sólida para validar los resultados obtenidos. En la sección 3.1 se presenta una descripción general del estado actual de la microrred. En la sección 3.2 se presenta información relevante de los equipos de estudio. En la sección 3.3 se presenta la arquitectura implementada. Finalmente, en la sección 3.4 se presenta el diseño del sistema.

3.1. Descripción del estado actual del Laboratorio Micro-red

Para describir el estado actual del laboratorio Micro-Red (LMR) se consultaron las referencias [45–47] con el objetivo de obtener información precisa. También se consultó a los encargados del laboratorio para obtener detalles adicionales. El LMR se encuentra en el campus Balzay de la Universidad de Cuenca y fue creado como parte del proyecto 'Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay'. Para su financiamiento, se gestionó el Programa de Conversión de Deuda de Ecuador frente a España (PCDEE) en dos etapas entre 2013 y 2019. El edificio cuenta con una superficie de $750m^2$ distribuida en dos plantas. En la primera planta se encuentra un área destinada a la docencia, otra para la administración, servicios higiénicos y un espacio pertinente para los equipos de generación, almacenamiento, control y cargas del LMR. En la segunda planta hay espacios destinados a investigadores, así como una sala de monitoreo y supervisión principal equipada con el sistema SCADA.

El LMR tiene dos modos de operación: aislado y conectado a la red pública. En el primer modo, se utilizan barras de conexión con un transformador que se alimenta de la red pública, y este suministra de energía a los equipos del laboratorio Micro-Red solo si es necesario. Caso contrario, el LMR suministra el excedente de energía que produce a la red pública. En el modo aislado, el LMR es capaz de generar y consumir toda la energía que se produce, y se conecta a las barras de circuito cerrado interno del LMR, lo que permite operar de manera autónoma y mantener el funcionamiento normal del LMR, independientemente de la red pública.

3.1.1. Distribución de componentes

Los equipos del laboratorio se distribuyen acorde a su naturaleza y se conectan a través de buses AC. Por lo tanto, se dispone de un grupo de generación, un grupo de almacenamiento y un grupo de consumo.

3.1.1.1. Grupo de generación

La generación de energía eléctrica en LMR se realiza a partir de fuentes renovables como solar, eólica, hídrica y térmica, así como fuentes no renovables como los combustibles fósiles. A continuación, se detallan los diferentes grupos de generación:

- Generación fotovoltaica: se ubica en la azotea del LMR y consta de 140 paneles fotovoltaicos con capacidad nominal de 35 kWp. Estos paneles se distribuyen en cuatro subconjuntos:
 - 60 paneles fijos monocristalinos
 - 60 paneles fijos policristalinos
 - 16 paneles móviles policristalinos en 1 eje
 - 4 paneles policristalinos en 2 ejes
- Generación Eólica: consta de tres aerogeneradores ubicados en el campus Irquis de la Universidad de Cuenca, separados 12 m entre sí. El parque eólico tiene una capacidad total de 15 kW, conformado por dos aerogeneradores de eje horizontal de 3 palas, y un aerogenerador de eje vertical.
- Mini-hidro: se trata de una microturbina hidrocínética de 3 aspas a 90-230 rpm, ubicada en un canal de 100 m de largo junto al río Tomebamba.
- Celda de hidrógeno: la generación de energía eléctrica se produce a partir de la reacción química del hidrógeno, produciendo 48 V DC.
 - Pila de combustible: una pila de combustible de la serie T de Horizon modelo T30S1 tiene una capacidad de 3kW y funciona bajo una membrana de intercambio de protones PEM. Además, se utiliza un inversor monofásico DC/AC para inyectar energía al bus AC del LMR.

- Grupo electrógeno: se utilizan dos grupos electrógenos para la generación de energía:
 - Generador a diésel: generador de 3 fases a 180 rpm con un voltaje nominal de 220/127 V, que convierte energía mecánica en eléctrica. Se cuentan con tanques de almacenamiento de diésel con una capacidad de 1000 litros.
 - Generador a gas con opción a GLP: generador a gas de 3 fases a 180 rpm con un voltaje nominal de 220/127 V. Además, se dispone con un equipo de almacenamiento de 2 m^3 .
- Fuente programable AC: tiene una potencia de 12 kVA y suministra energía al bus AC del LMR por un perfil de alimentación programable o con una referencia externa, también puede suministrar energía a cargas trifásicas en un rango de frecuencias de 15-1200 Hz.
- Fuente programable DC: tiene una potencia de 15 kW con capacidad de programación de múltiples combinaciones de salida de voltaje y corriente en tiempo real, así como programas para pruebas de larga duración.
- Kit de micro generación: Se compone por un inversor y 5 paneles solares policristalinos.

3.1.1.2. Grupo de almacenamiento

Los equipos de almacenamiento permiten al laboratorio realizar tareas de carga y descarga:

- Banco de baterías de Plomo-Ácido: constituido por 84 celdas en serie que, en conjunto permiten obtener 168 V DC.
- Baterías de flujo de Vanadio-Rédox: compuesta por 12 módulos de celdas con una potencia de salida de 20 kW y capacidad de almacenamiento de 100 kWh. La batería emplea el principio químico de intercambio de iones durante la reducción - oxidación del vanadio. Dispone de dos contenedores que almacenan 5 000 litros de vanadio líquido.
- Banco de baterías de flujo de Ion-Litio: Banco de baterías recargable compuesto

por 11 celdas en serie y voltaje nominal de 642 V DC. La capacidad de almacenamiento es de 44 kWh.

- Banco de supercondensadores: Compuesto por 10 condensadores en serie equivalente a 13 F y voltaje nominal de 560 V DC. El banco se utiliza para suministrar de energía al laboratorio por períodos transitorios cuando el LMR se desconecta de la red principal.
- Almacenamiento de hidrógeno: Se dispone de un electrolizador Heliocentris modelo EL 500 que produce 500 NI/h a 30 bar con una pureza de 99.94 % por destilación del agua. El hidrógeno obtenido se almacena en recipientes con capacidad de 2000 litros a 30 bar.

3.1.1.3. Grupo de consumo

El grupo está compuesto por cargas que convierten la energía eléctrica en calor, iluminación y energía cinética:

- Banco de cargas trifásicas programables: es un banco resistivo con capacidad variable de 150 kW, con pasos de 5 kW.
- Estaciones de carga lenta y rápida de vehículos eléctricos: en cuanto a la estación de carga lenta, puede ser monofásica de 120 V a 16 A y otra bifásica de 220 V a 25 A. El LMR dispone de vehículos 100 % eléctricos para estudios de eficiencia energética en movilidad y actividades regulares.
 - 3 Vehículos eléctricos KIA SOUL EV
 - 1 Montacargas eléctrico HYUNDAI 10BTR-9 (capacidad de carga de 1.5 Ton)
 - 2 Furgonetas BYD: Se emplean como vehículos eléctricos utilitarios con un motor de 100 kW y autonomía nominal de 300 km.
 - 6 Bicicletas y 2 motonetas eléctricas: Se emplean para la micromovilidad eléctrica
- Alimentación de la microrred: incluye cargas de iluminación, oficinas del LMR y

un sistema de respaldo de energía UPS con capacidad de 10kVA para la comunicación entre el sistema SCADA y componentes del laboratorio.

- Emulador de Red de distribución: emula líneas de transmisión de baja tensión a través de un terminal (500 kW) de conexión para conectar automáticamente los dos buses AC.
- Carga programable en DC: permite realizar pruebas y control de calidad de diferentes dispositivos electrónicos de conversión de potencia (fuentes de alimentación, baterías y estaciones de vehículos eléctricos, entre otros). Posee una capacidad de 12 kW de potencia, con máximos de voltaje y corriente de 600 V y 840 A, respectivamente.

3.1.1.4. Red eléctrica pública

La red pública puede ser utilizada para generación o consumo. Como elemento generador alimenta cargas y elementos de almacenamiento, mientras que como elemento consumidor recibe la inyección de energía producida en la microrred con capacidad de 400 kW.

3.1.2. Conexiones de la Microrred

Para conocer el entorno de trabajo, se realizó la verificación, inspección y levantamiento de cada una de las conexiones de comunicaciones de la microrred. La Figura 3.1 presenta el diagrama de conexiones de todos los equipos que actualmente se encuentran supervisados y controlados por el sistema SCADA del LMR con sus respectivos protocolos de comunicación en los tres niveles base de la pirámide de control. Cabe mencionar que de los equipos descritos en la subsección 3.1.1, los componentes de la segunda etapa del canje de deuda no se encuentran conectados al SCADA.

En la Figura 3.1 (para mejor visualización revisar el Apéndice E.1) se observa que los equipos de generación y almacenamiento manejan la comunicación mediante Modbus RTU (RS-232 o RS-485), para mantener un bajo tiempo de retraso en el envío y recepción de mensajes; del mismo modo la transmisión de mensajes está en el orden de los microsegundos debido a que el procesamiento de tramas se realiza de acuerdo

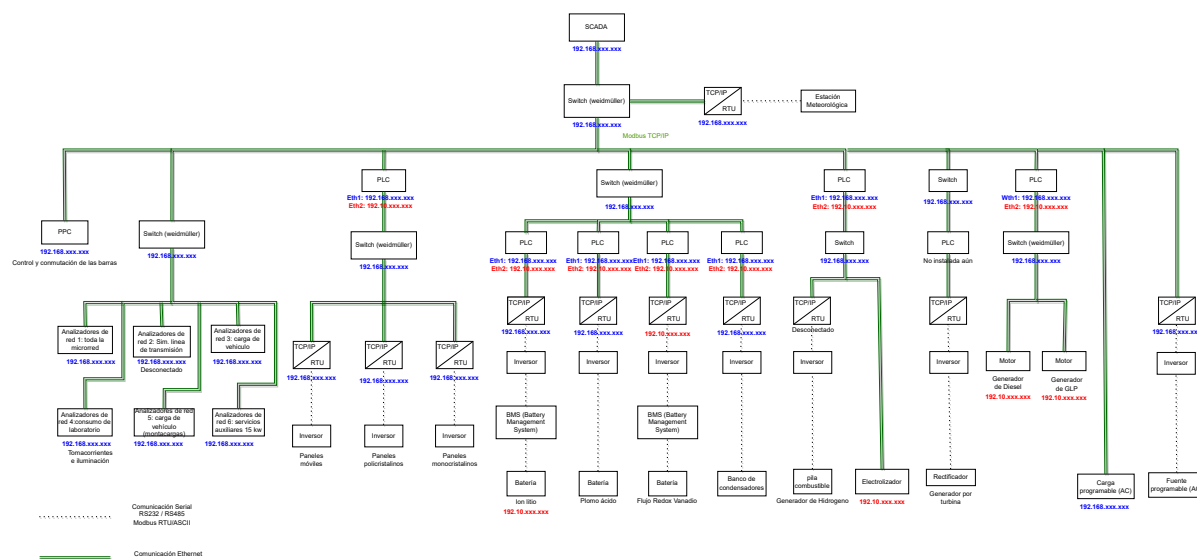


Figura 3.1: Arquitectura de conexión previo de los equipos en la microrred de Balzay.

a su orden de llegada. Luego en un orden superior se usa un conversor a TCP/IP para asignar una dirección IP única a cada dispositivo dentro de la red, esto permite aplicar distintos procesos de supervisión y control de acuerdo a las capacidades de lectura y escritura de cada equipo.

Con la dirección IP es posible realizar el control de variables mediante un controlador (PLCs o PACs) que funciona como intermediario en la comunicación entre el sistema SCADA y un equipo. Cada PLC puede tener a su cargo varios equipos de acuerdo su capacidad de procesamiento. Varios de estos controladores poseen dos puertos Ethernet con una dirección IP cada uno; en el caso de los dispositivos de la microrred, el puerto 1 (color azul) se usa para comunicarse con el sistema de monitoreo superior mediante Modbus TCP/IP, para ello se usan direcciones de registros de memoria de acuerdo a la variable, pues puede ser de lectura y/o escritura, según el tipo de registro de la Tabla 2.1. Por otro lado, la dirección IP del puerto 2 (color rojo en la Figura 3.1) se la usa para el mantenimiento y configuración por parte del fabricante de los equipos, teniendo un acceso directo al equipo para detectar errores o conflictos en el dispositivo.

Por otra parte, el grupo de cargas y dispositivos adicionales se conectan directamente al SCADA mediante un *switch*. En este sentido, el PPC controla y conmuta las barras, mientras que los analizadores de red miden la calidad de la energía eléctrica de toda

la microrred y de puntos específicos como los puntos de carga del vehículo, consumo interno, entre otros. Cabe mencionar que para interconectar cada uno de los equipos con el sistema de control de nivel tres, se usa conmutadores en puntos específicos; estos permiten monitorizarlos y tener una noción clara del estado de cada uno de los puertos, por lo cual poseen una dirección IP para la comunicación remota.

Finalmente, para el control y gestión de los componentes descritos se cuenta con un sistema SCADA en LabVIEW, instalado en servidores Lenovo X3550 M5 en un sistema operativo Microsoft Windows 7 mediante una máquina virtual. Del mismo modo, el sistema de control se comunica a los dispositivos HMI de cada componente del laboratorio por fibra óptica en una topología de anillo. Cada HMI se encarga del control a bajo nivel y el control a alto nivel entre el sistema de control y los convertidores de potencia bajo Modbus TCP.

3.2. Descripción de los equipos de estudio

En esta sección se presenta información relevante de cada uno de los equipos de estudio, enfatizando en las características, componentes, especificaciones y principio de funcionamiento de cada uno. Cabe mencionar que en el caso de la carga y fuente programable en DC se detallan las principales configuraciones y modos de operación disponibles.

3.2.1. Electrolizador ELS500

En [48] se presenta la información del Electrolizador ELS500, y en la Figura 3.2(a) se muestra el generador de hidrógeno o electrolizador Heliocentris modelo ELS500 que produce hidrógeno puro (500 NI/h a 30 bar) y oxígeno como producto derivado a partir de la electrólisis de bajo costo de agua destilada. Está diseñado para utilizarse con la pila de combustible y así generar electricidad. El hidrógeno producido se almacena en los depósitos de la Figura 3.2(b) con capacidad de almacenamiento de 200 litros a 30 bar.

Los principales beneficios son:



Figura 3.2: Electrolizador Heliocentris modelo ELS500.

- El sistema utiliza únicamente agua desmineralizada
- El proceso electrolítico consume sólo agua
- Es automático, autorregenerable y respetuoso con el medio ambiente.

3.2.1.1. Módulos

La Figura 3.3 muestra que el electrolizador está conformado por cuatro módulos:

1. Módulo de control electrónico: se destaca la pantalla táctil digital con dos modos: MAIN y MONITOR. En la pantalla MAIN mostrada en la Figura 3.4 se despliega información del estado de producción de hidrógeno, así como un botón para iniciar/detener el sistema. Por otra parte, la pantalla MONITOR muestra información eléctrica de la pila (voltaje y corriente), errores, alarmas y dirección IP.

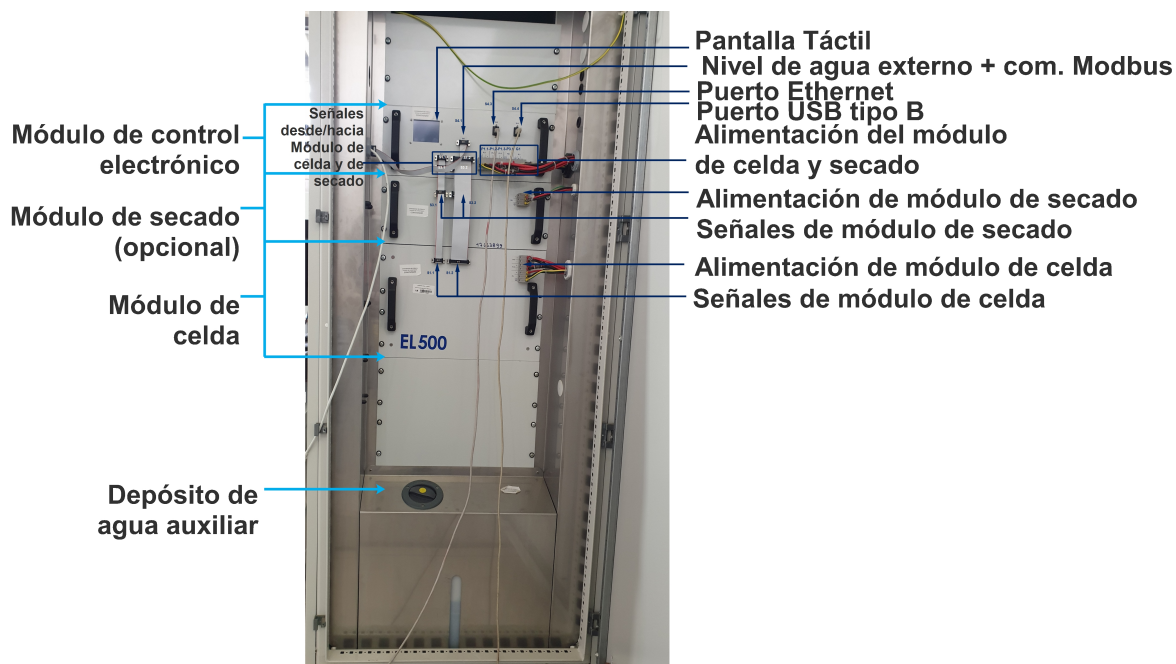


Figura 3.3: Descripción general de Electrolizador ELS500.

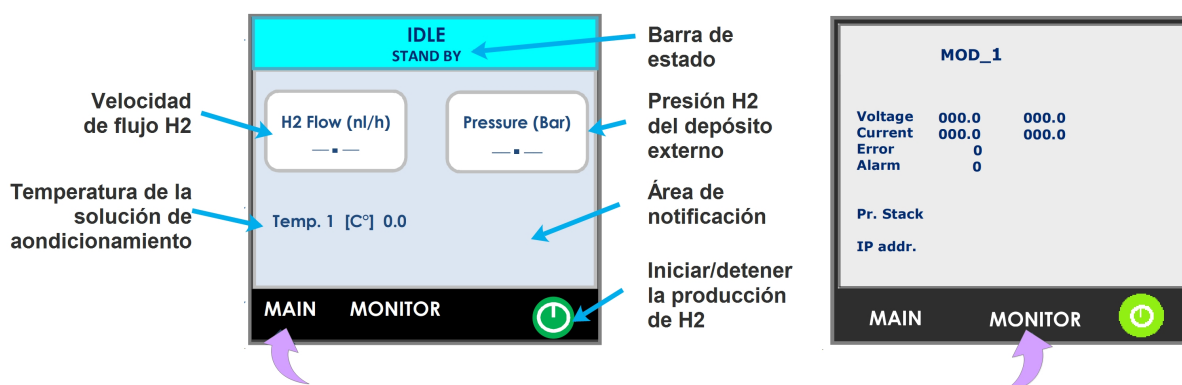


Figura 3.4: Descripción de la pantalla principal y del monitor del electrolizador EL 500.

2. Módulo de secado: permite mejorar la pureza del hidrógeno producido, pasa de una pureza de 99.94 % a 30 bar a 99.999 % a 30 bar, lo cual es necesario en una pila de combustible para la generación de energía eléctrica.
3. Módulo de celda: Se encarga de la salida y purga de hidrógeno, así como puer-tos de rellenado y drenaje de agua.
4. Depósito de agua auxiliar: depósito con agua desmineralizada hasta un máximo de 30 litros.

3.2.1.2. Especificaciones

En la Tabla 3.1 se presenta las principales especificaciones del sistema.

Tabla 3.1: Especificaciones del Electrolizador.

Especificación	Valor
Fabricante	Heliocentris
Modelo	ELS500
Flujo máximo de Hidrógeno	500l/h
Presión máxima de salida de hidrógeno	35 bar
Pureza del hidrógeno	99.999 % a 30 bar
Potencia instantánea	2300 W
Potencia máxima	2 900 W
Voltaje de alimentación	230 Vac/50 Hz
Temperatura de operación	45 °C
Consumo máximo de agua	0.40 l/h
Comunicación	Ethernet

3.2.1.3. Principio de funcionamiento

El electrolizador ELS500 produce hidrógeno lo suficientemente seco a partir de una pila electrolítica AES500 y una solución acuosa de hidróxido de potasio al 1 %. Durante la generación de hidrógeno se produce oxígeno como producto derivado, por lo cual se emplea una barrera física denominada membrana de intercambio aniónico (AEM, por sus siglas en inglés) para que no se mezcle el hidrógeno puro con el oxígeno. Para obtener una pureza del 99.999 % se emplea un módulo de purificación/secado conectado con los demás módulos del generador de hidrógeno. El proceso se realiza hasta alcanzar una presión de 35 bar, deteniendo la producción de hidrógeno de forma automática, mientras que el hidrógeno residual se expulsa por conductos internos de la pila.

3.2.1.4. Comunicación

Para la supervisión remota de los principales parámetros del electrolizador se emplea comunicación Modbus TCP/IP, de tal forma que la conexión física (red de transporte) se realiza por Ethernet desde la salida S4.3 del módulo de control electrónico.

3.2.2. Pila de hidrógeno

Según [49–51], el sistema de pila de combustible de la serie T de Horizon T30S1 tiene una capacidad de 3kW y genera energía eléctrica a partir del hidrógeno (sustancia incolora, inodora e inflamable) que puede ser producido por el electrolizador. El principio de funcionamiento del sistema se basa en una membrana de intercambio de protones PEM con capacidad de producción de 48 V DC. El sistema se constituye por módulos de celda de combustible, control y electrónica integrados en un solo chasis.

3.2.2.1. Características y especificaciones

- Funcionamiento indefinido siempre y cuando se disponga de una fuente de combustible.
- Ideal para aplicaciones híbridas con otras energías y baterías del laboratorio.
- En el caso de fallas o inestabilidad, se dispone de un sistema de respaldo automático y suministra energía continuamente para respaldar el funcionamiento normal del equipo.
- El sistema se enfría por aire y es auto hidratante
- Se considera una tecnología ecológica ideal para instalaciones con restricciones de emisiones.
- Diseñado para apagarse automáticamente si existe un funcionamiento anormal (baja tensión, elevada corriente, alta temperatura, baja presión del combustible).

En la Figura 3.5 se observa los componentes principales que conforman el panel frontal y posterior de la pila de combustible.

En la Tabla 3.2 se presenta las principales especificaciones del sistema:

3.2.2.2. Principio de funcionamiento

La pila de combustible funciona como una fuente de alimentación DC alimentada por combustible y de potencia limitada (se suministra energía para alcanzar la tensión

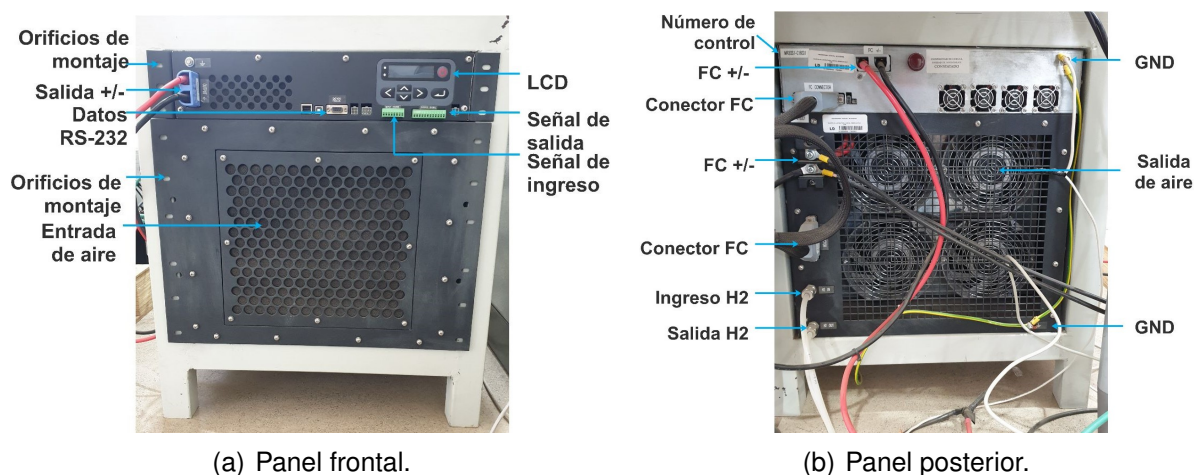


Figura 3.5: Panel frontal y posterior de pila de combustible

Tabla 3.2: Especificaciones de la pila combustible.

Especificación	Valor
Fabricante	Horizon
Modelo	ECOBX-MR30S1
Potencia nominal	0-3 kW
Capacidad de corriente	0-56 A
Tensión regulable	43.2-57.6 Vdc
Temperatura ambiente	0-40 °C
Temperatura de almacenamiento	20-50 °C
Reactivos	Hidrógeno-Aire
Enfriamiento	Aire (Ventilador de refrigeración)
Presión de ingreso de H2	0.55-0.75 bar
Pureza de hidrógeno	$\geq 99.995\%$
Tiempo de inicio	≤ 2 min a temperatura ambiente
Consumo	$0.78 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$
Tipo de comunicación	RS-232

de salida). El sistema es similar a un rectificador de reserva porque la energía generada se puede inyectar al bus de alimentación DC. Para la generación de energía eléctrica se emplea un suministro de combustible de hidrógeno industrial de grado 3,5 (99,995 % de concentración de H₂) y una fuente de aire limpio. La electricidad se genera por la reacción química de aire e hidrógeno a través de la pila de combustible PEM mientras que los productos derivados son agua/vapor puro y calor. El objetivo es generar la mayor cantidad de energía posible mientras se evapora el agua generada. La pila de combustible requiere estar en funcionamiento al menos 30 minutos al mes para mantener una hidratación adecuada.

3.2.2.3. Comunicación

La pila de combustible cuenta con un puerto de salida RS-232 para la comunicación remota. Este puerto es del tipo DE-9, con nueve pines, de los cuales dos pines son los que realizan la comunicación activa para la transmisión y recepción de datos. En el apartado 3.4.1.3 se realiza la conexión remota entre el equipo y un host para la extracción de datos del equipo.

3.2.3. Carga programable DC

Según [52, 53], la carga electrónica programable DC permite realizar pruebas y control de calidad de diferentes dispositivos electrónicos de conversión de potencia (fuentes de alimentación, baterías y estaciones de vehículos eléctricos, entre otros), así como simulaciones de condiciones de fallo. Se tiene tres rangos de potencia medidos a través de la corriente y voltaje en tiempo real del equipo. En la Figura 3.6 se presenta los componentes principales de la carga programable DC.



Figura 3.6: Panel frontal de la carga programable DC.

3.2.3.1. Características y especificaciones

Entre las principales características se tiene:

- Producto fiable para pruebas de ingeniería
- La carga puede funcionar de forma independiente en cada uno de los modos de operación que dispone.
- Dispone de una pantalla electrónica que utiliza tubos de vacío y material fluorescente para mostrar información (Visualizador de Fluorescencia en Vacío (VFD, por sus siglas en inglés)) que muestra mediciones y desviación de datos en tiempo real para el ajuste adecuado de la carga.
- Tiene un modo de operación CZ que activa la simulación de carga capacitiva

Entre las principales especificaciones del equipo se menciona:

Tabla 3.3: Especificaciones de la carga programable DC.

Especificación	Valor
Fabricante	Chroma
Serie	63200A
Modelo	63212A-600-840
Voltaje	0-600V
Corriente	0-840A
Potencia	12kW
Rango de corriente constante	84/420/840 A
Rango de voltaje constante	80/150/600 V
Rango de resistencia constante	25m-250 (80V)
	0.1-1000 (150V)
	1-2000 (600V)
Rango de potencia constante	1200/6000/12000 W

3.2.3.2. Modos de operación

Para la carga programable DC se destacan once modos de operación independientes, para la activación de cada uno la entrada de la carga se desactiva momentáneamente antes de activar otro modo de operación. Los modos se reescalan para ajustarse a la resolución de los parámetros de corriente, voltaje y resistencia, mientras que si se sobrepasa el límite la carga fija el nivel máximo o mínimo según corresponda. En la Figura 3.7 se describen de forma gráfica cada uno de los modos que se detallan a continuación:

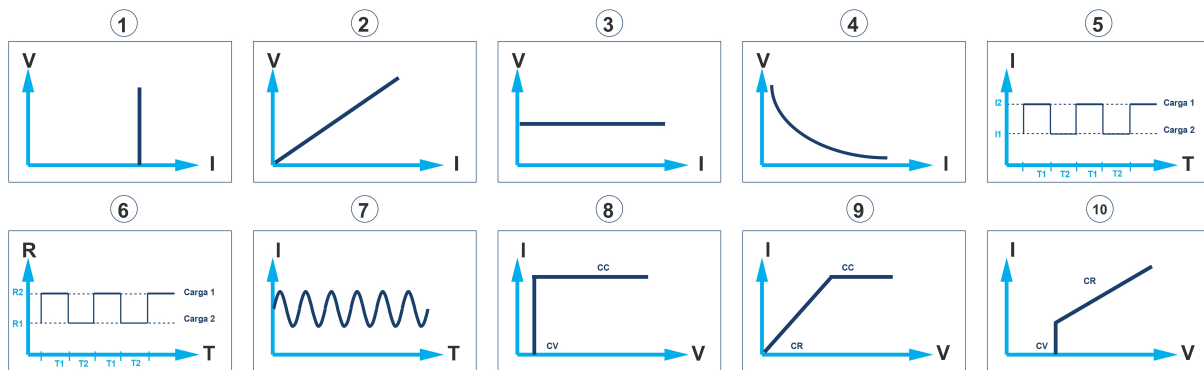


Figura 3.7: Modos de operación.

1. Corriente constante (CC): Las cargas L1 y L2 absorben la corriente programada en tres tipos de rango (bajo, medio, alto), independiente del voltaje de ingreso.
2. Resistencia constante (CR): Las cargas L1 y L2 absorben la resistencia configurada en tres tipos de rango (bajo, medio, alto), independiente del voltaje de ingreso.
3. Voltaje constante (CV): Las cargas L1 y L2 absorben el voltaje configurado en tres tipos de rango (bajo, medio, alto), mientras que la salida de corriente varía. Este modo tiene cuatro tipos de velocidades de respuesta (rápida, normal, lenta y UD)
4. Potencia constante (CP): Las cargas L1 y L2 absorben una corriente cada una en función de las potencias configuradas en tres tipos de rango (bajo, medio, alto).
5. Corriente constante dinámica (CCD): Las cargas L1 y L2 absorben una corriente dinámica (nivel alto/bajo de corriente) en función de la corriente y temporización configuradas, independiente del voltaje de ingreso. La corriente tiene tres tipos de rango (bajo, medio, alto).
6. Resistencia Constante Dinámica (CRD): Las cargas L1 y L2 absorberán una resistencia dinámica en función de la resistencia y temporización configuradas. La resistencia tiene tres tipos de rango (bajo, medio, alto).
7. Señal senoidal dinámica (SWD): La carga puede ser programada con una corriente de carga senoidal a partir de una corriente de polarización, onda senoidal

y frecuencia.

8. Voltaje y corriente constante (CVCC): Este modo combina los modos CV y CC en función al voltaje y corriente configurados, con tres tipos de velocidad (rápido, normal, lento)
9. Resistencia y corriente constante (CRCC): Este modo combina los modos CR y CC en función de la resistencia y corriente configuradas.
10. Voltaje y resistencia constante (CVCR): Este modo combina los modos CV y CR en función del voltaje y resistencia configuradas.
11. Circuito RLC (CZ): La carga absorbe corriente en función de una impedancia constante configurada. Los parámetros de ingreso se ajustan al circuito de la Figura 3.8.

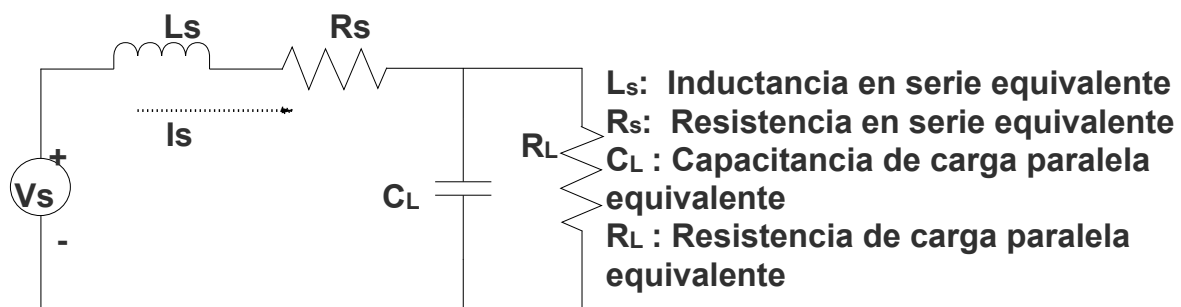


Figura 3.8: Circuito RLC.

3.2.3.3. Parámetros de edición

En la Tabla 3.9 se describe los principales parámetros de configuración en cada modo de operación que se describieron anteriormente.

3.2.3.4. Comunicación

Para la comunicación remota se utiliza un puerto Ethernet con el cual mediante el uso del programa NI-VISA se realizará la conexión con el computador para el control remoto del equipo. En el apartado 3.4.1.1 se da mayores detalles del proceso de conexión remota realizado para lograr una conexión remota.

3.2.4. Fuente programable DC

Según [54–56], la fuente electrónica programable DC de la Figura 3.9 proporciona una salida CC estable y medición adecuada de voltaje y corriente.

3.2.4.1. Características y especificaciones

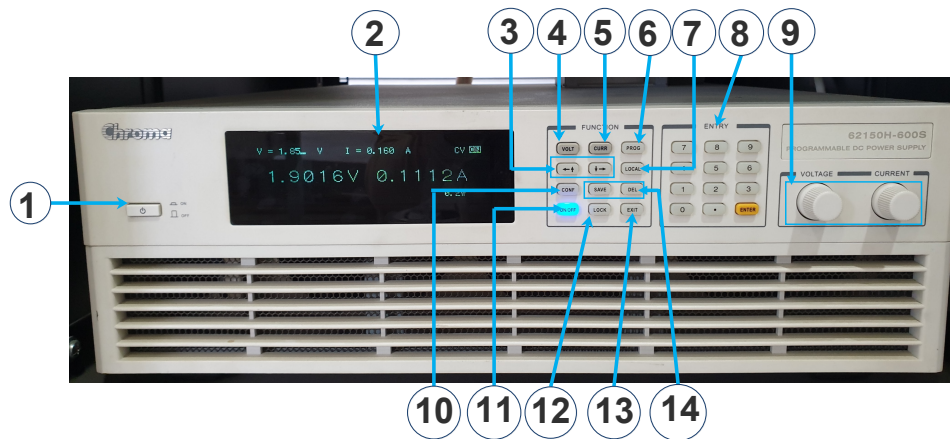
Entre las principales características del equipo se menciona:

- Capacidad de ajuste de la tasa de cambio de voltaje y corriente de salida
- Potencia máxima de salida de hasta 15 kW
- Salida dentro de un rango de tolerancia aceptable y protección para variaciones de carga
- Modo de programación de múltiples combinaciones de voltaje y corriente en tiempo real
- Diferentes modos de salida para el ajuste de parámetros característicos V-I empleados por lo general en el diseño de inversores fotovoltaicos y pruebas de verificación en el mismo campo.
- Control repetitivo y constante para pruebas de larga duración.

En la Tabla 3.4 se detallan las principales especificaciones del equipo.

Tabla 3.4: Especificaciones de la fuente programable DC.

Especificación	Valor
Fabricante	Chroma
Serie	62000H
Modelo	62150H-600S
Voltaje	0-600V
Corriente	0-25A
Potencia	15000W
Rango de medición de voltaje	120/600 V
Rango de medición de corriente	10-25 A



- | | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 ON/OFF | 8 Teclas numéricas |
| 2 Pantalla VFD | 9 Perillas de voltaje y corriente |
| 3 Desplazamiento | 10 Configuración de modo |
| 4 Modo de ajuste de V | 11 ON/OFF de la salida |
| 5 Modo de ajuste de I | 12 Bloqueo de teclas |
| 6 Modo Programa | 13 Salir |
| 7 Control local | 14 Borrar y guardar |

Figura 3.9: Panel frontal de la fuente programable en DC.

3.2.4.2. Modos de salida

Los modos de salida a excepción del modo CC/CV se relacionan con la simulación de los parámetros característicos corriente-voltaje (I-V abreviadamente) de celdas fotovoltaicas por medio de diferentes modelos matemáticos que vienen programados en el equipo y así devolver una salida de corriente y voltaje adecuada. Los parámetros característicos I-V que se ingresan al equipo se obtienen experimentalmente de algún panel fotovoltaico sometido a ciertas condiciones de temperatura e irradiación.

Existen cuatro parámetros característicos, los cuales pueden ser medidos en múltiples pares de I-V que interpolados forman la curva característica de la Figura 3.10 en donde V_{oc} es el voltaje en circuito abierto, I_{sc} es la corriente en cortocircuito, I_{mp} la corriente de máxima potencia, V_{mp} el voltaje en máxima potencia y P_{MP} la potencia máxima. Mientras que la división de las áreas A y B indican el factor de llenado FF de un módulo FV. La finalidad de conocer estos parámetros recae en conocer el comportamiento de un panel en alguna condición de operación, tal como la eficiencia de inversores fotovoltaicos, potencia máxima, comportamiento eléctrico de un módulo FV, entre otros.

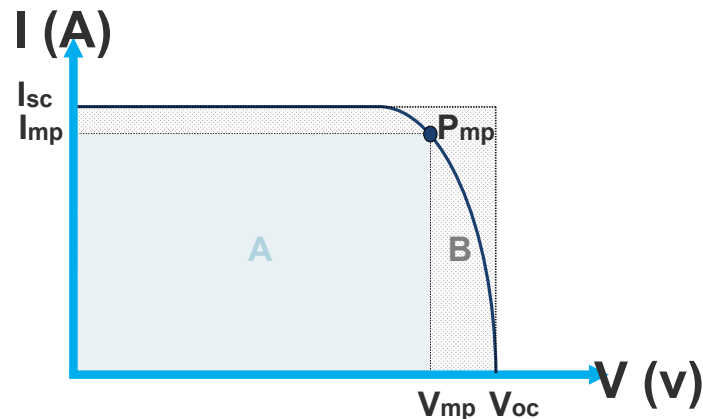


Figura 3.10: Curva I-V de para panel fotovoltaico con parámetros característicos.

En la Tabla 3.10 se observan los diferentes modos de salida que pueden ser configurados con el equipo y se escriben a continuación:

- **Modo CV/CC:** Hace referencia al modo de salida de voltaje y corriente de una fuente tradicional. En modo CV la salida es de voltaje (para mantener el modo CV, la corriente ajustada debe ser mayor a la corriente de la carga), mientras que en modo CC la salida es de corriente (para mantener el modo CC, el voltaje ajustado debe ser mayor al voltaje de la carga)
- **Modo Tabla:** Permite el ingreso de hasta 128 puntos de una curva I-V, la curva puede modificarse en tiempo real simulando diferentes condiciones. Una curva I-V de ingreso debe cumplir con las siguientes condiciones:
 - Dos columnas, una columna de voltaje y otra de corriente.
 - Un máximo de 128 valores y un mínimo de 4 valores incluyendo duplicados.
 - El voltaje y la corriente deben estar en orden inverso, uno debe aumentar iniciando en cero, mientras que el otro debe disminuir hasta llegar a cero.
 - El máximo voltaje es el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) cuando la corriente es cero y la máxima corriente es la corriente en cortocircuito (I_{sc}) cuando el voltaje es cero.
- **Modo SAS:** El equipo obtiene los valores en función del modelo matemático de Sandia National Lab para obtener la salida de voltaje y corriente a partir de la simulación de los parámetros de ingreso de la Tabla 3.10, así como los

valores equivalentes de funcionamiento real de máxima potencia (P_{MP}), voltaje de máxima potencia (V_{mp}) y corriente de máxima potencia (I_{mp}). En (3.1) se presentan las consideraciones que se deben cumplir para este modo de salida.

$$\left\{ \begin{array}{l} FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \\ V_{oc} > V_{mp} > 0 \\ I_{sc} > I_{mp} > 0 \\ V_{mp} > V_{oc} \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

- Modo EN50530: El equipo emplea el proceso definido en la norma EN50530 para calcular los valores equivalentes de los parámetros de ingreso de la Tabla 3.10 y obtener la salida de voltaje y corriente adecuada. Para obtener los valores de voltaje en circuito abierto y corriente en cortocircuito en condiciones de prueba estándar (STC, por sus siglas en inglés) se emplean las ecuaciones 3.2 y 3.3 según corresponda, considerando los valores típicos de factor de llenado de la Tabla 3.5.

$$FF_v = \frac{V_{MPP;STC}}{V_{OC,STC}} \quad (3.2)$$

$$FF_I = \frac{I_{MPP;STC}}{I_{SC,STC}} \quad (3.3)$$

Tabla 3.5: Valores típicos de FF para el modelo del generador fotovoltaico.

	Tecnología cSI	Tecnología Thin film	Tolerancia
FF_V	0.8	0.72	< 1 %
FF_I	0.9	0.8	< 1 %

- Modo SANDIA: Para definir mejor los parámetros características de I-V, en diferentes condiciones de irradiación y temperatura, el equipo tiene un modo de salida basado en el modelo SANDIA para la caracterización de sistemas fotovoltaicos. En este modo se ingresan los ajustes de la tabla 3.10 para obtener como salida un equivalente de los parámetros característicos, así como la salida adecuada de corriente y voltaje. En este modo se asumen las relaciones presentadas en las ecuaciones 3.4 y 3.5 para definir de mejor manera I_{sc} y V_{oc} . En

la Tabla 3.6 se presentan valores sugeridos de FF y β para diferentes arreglos fotovoltaicos que pueden ser ingresados en este modo.

$$V_{OC} = \frac{V_{MP}}{\sqrt{FF}} \quad (3.4)$$

$$I_{SC} = \frac{I_{MP}}{\sqrt{FF}} \quad (3.5)$$

Tabla 3.6: Valores de FF y β para diferentes tipos de arreglos fotovoltaicos.

	Tipo de array	Valor nominal FF	Coeficiente de temperatura (β)
1	Thin-film	0.55	-0.25
2	Multicristalino	0.68	-0.38
3	Cristalino de alta eficiencia	0.80	-0.50

3.2.4.3. Programas

Con el equipo se pueden realizar diferentes combinaciones de voltaje y corriente para pruebas de larga duración. Se destaca:

- **Modo List:** consta de un programa que puede ser configurado con un máximo de 100 secuencias. En la Tabla 3.11 se presentan los ajustes que se pueden realizar, en donde se destaca que el programa puede ejecutarse de forma infinita o una cantidad determinada de veces. En cuanto a la configuración de las secuencias, se observan los ajustes permitidos, como el tiempo de ejecución por secuencia que puede ser de hasta 15 000 segundos en modo auto, mientras que en modo skip, es posible saltar una secuencia sin ser ejecutada. El tiempo máximo de ejecución de todas las secuencias configuradas es de 99 horas, 59 minutos y 59 segundos.
- **Modo Step:** Este modo de programa permite obtener una salida de voltaje en función de los parámetros de ingreso de la Tabla 3.11, de tal forma que la salida es una función escalón con una duración de hasta 99 horas, 59 minutos y 59.99 segundos.

3.2.4.4. Comunicación

La comunicación remota se realiza por Ethernet a partir de la previa configuración de una dirección IP, puerto de enlace y máscara de subred. La transmisión de datos se realiza por TCP bajo el puerto 2101. En el apartado 3.4.1.1 se da mayores detalles para lograr una conexión remota.

3.3. Arquitectura

Dentro de esta sección se describe la estructura que posee el sistema SCADA desarrollado. Se inicia con la diagramación UML de componentes, donde se describe a los principales actores del sistema de supervisión y control. Luego se presenta al diagrama de conexiones y protocolos del sistema propuesto usado en cada nivel de control. Finalmente se muestra un diagrama UML de procesos del funcionamiento del sistema SCADA y el rol de cada uno de los componentes en cada paso.

3.3.1. Diagrama de componentes

Para el monitoreo y supervisión de la pila de hidrógeno, electrolizador, carga y fuente programable en DC se cubrió los tres principales niveles de la pirámide de control con los componentes mostrados en el diagrama de la Figura 3.11; este muestra la interacción bidireccional e interoperabilidad entre los distintos componentes del sistema SCADA.

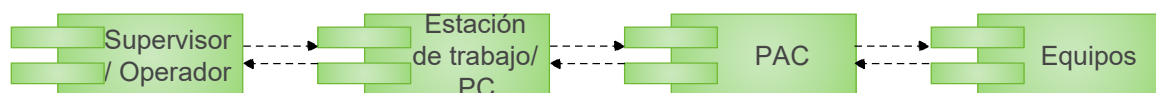


Figura 3.11: Diagrama UML de componentes para el sistema SCADA.

En la Figura 3.11 se observan los componentes principales de la arquitectura que cumplen con funciones específicas dentro del proceso de supervisión y monitoreo:

- **Equipos:** hacen referencia a los dispositivos de campo intervenidos para establecer la comunicación remota. Tienen puertos de conexión Ethernet o puertos

seriales para habilitar el control a distancia mediante la comunicación bidireccional con un agente de control superior. Los equipos obedecen a las órdenes del controlador; para la entrega y envío de datos o cambios de configuración. Del mismo modo, los equipos tienen la capacidad de informar de cualquier proceso anormal existente.

- **PAC:** su principal objetivo es gestionar las comunicaciones entre los dispositivos de campo en el primer nivel y en el tercer nivel de la pirámide de control con el host (HMI). El PAC recibe las señales de los dispositivos de control superior, las procesa y estructura las órdenes pertinentes para solicitar datos o cambiar la configuración de los equipos.
- **Computador:** implica todo lo referente al programa HMI; es el encargado de enviar las solicitudes de cambios o de lectura de datos de los equipos de campo al PAC, o cuando el controlador tenga los datos, entonces los tomará y procesará para colocarlos en los campos correspondientes para el análisis del operador. Se encuentra en el nivel tres de la pirámide de automatización, por tanto, necesita presentar de forma clara cada uno de los campos para no generar confusiones en la toma de decisiones.
- **Supervisor:** analiza e interpreta los datos entregados por los equipos y presentados en el HMI para la toma de decisiones en los equipos. Cuando se desea cambiar la configuración el operador deberá seleccionar adecuadamente el modo de operación y rellenar los campos correspondientes para confirmar y enviar los cambios a los equipos.

3.3.2. Diagrama de conexiones

En base a la arquitectura de la microrred presentado en la Figura 3.1 se plantea una arquitectura similar para el trabajo de titulación, considerando los protocolos, elementos del diagrama de componentes de la Figura 3.11 y características de los equipos descritos en el apartado 3.2.

El controlador de automatización programable utilizado es la sbRIO-9642, porque posee un FPGA reconfigurable desde la plataforma de desarrollo LabVIEW; además se

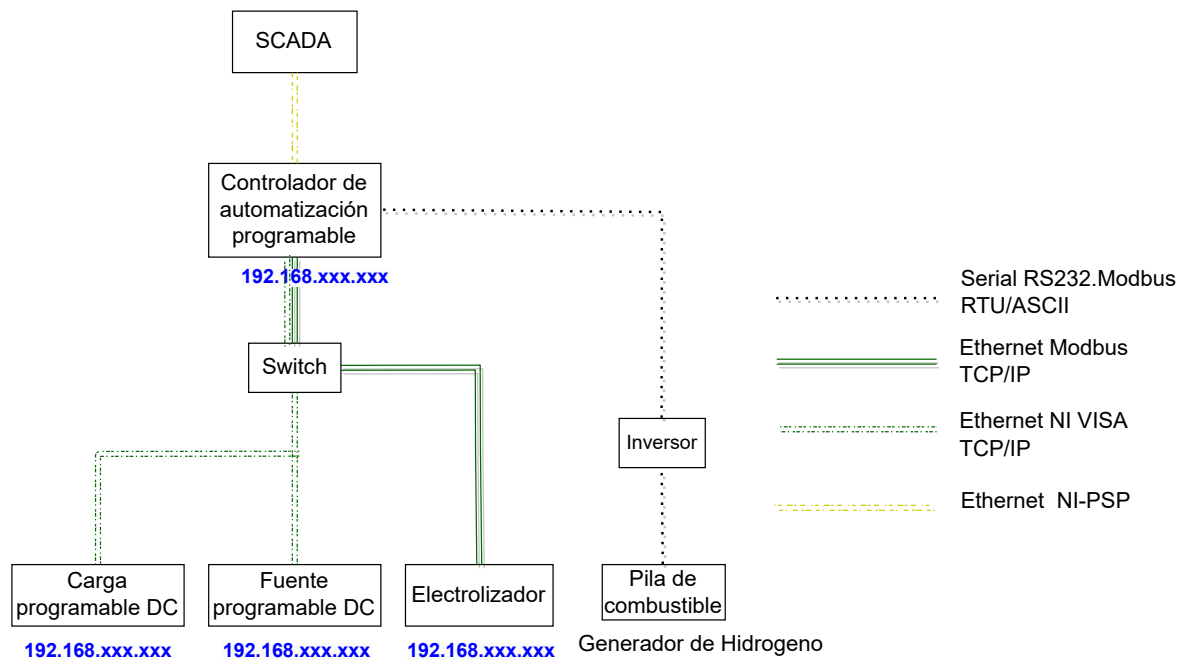


Figura 3.12: Arquitectura de conexión propuesto para el control y monitoreo de los equipos.

caracteriza por su velocidad de procesamiento y control en tiempo real. En la Figura 2.8 se observa que la placa posee dos puertos: Ethernet y RS-232, los cuales se utilizaron para la comunicación con los equipos mediante TCP/IP en el puerto Ethernet y RS-232 en el puerto serial.

La Figura 3.12 muestra que la fuente y la carga programable en DC utilizan una comunicación bajo Ethernet con mediación de un *switch*; los dos equipos pueden comunicarse bajo el protocolo TCP/IP (capa de transporte) mediante el entorno NI-VISA como plataforma de orden superior para enviar y recibir mensajes entre los dispositivos y el PAC.

El electrolizador usa el protocolo de comunicación Modbus en la capa de aplicación, el acceso a las variables de supervisión se realiza en función a los registros de ingreso de las Tablas 2.1 y 3.12, mientras que para las variables de escritura se ingresa a los coils en función de la Tabla 3.13. En los niveles inferiores se usa TCP como protocolo de transporte, IP como protocolo de red y Ethernet en el enlace de datos.

Finalmente, para la pila de hidrógeno la comunicación se lleva a cabo por el puerto serial RS-232 que posee la placa, por lo que brinda la facilidad de poder usar NI-VISA

como plataforma de supervisión. La conexión con el PAC se realiza bajo el nombre del puerto serial, la tasa de transmisión de bits(baudios), bit de paridad y el formato de los datos en ASCII.

La comunicación entre el sistema SCADA y el PAC se da bajo el protocolo NI-PSP, que es un protocolo propietario de la capa de aplicación de NI, este tiene en sus bases a TCP como protocolo de transporte, IP como protocolo en la capa de red y Ethernet en la capa de enlace de datos. NI-PSP fue diseñado para optimizar el uso de variables compartidas dentro de una red local, mejorando los procesos de lectura y escritura en tiempo real que se ejecutan en distintas plataformas de control.

3.3.3. Diagrama de procesos

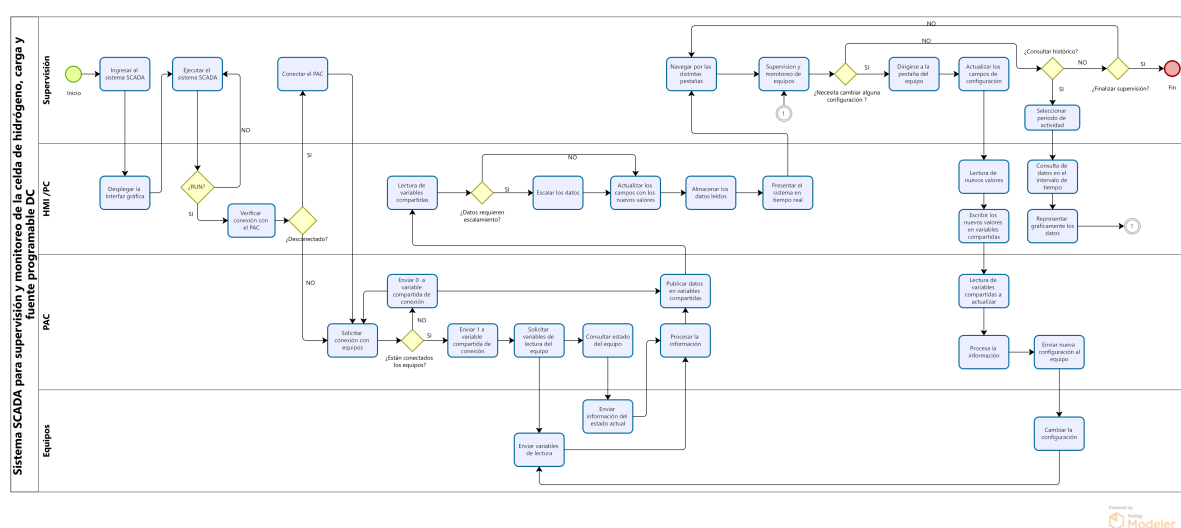


Figura 3.13: Diagrama UML de procesos para sistema SCADA implementado.

La Figura 3.13 presenta el diagrama de procesos para el SCADA implementado y se constituye de cuatro elementos: supervisor, HMI/PC, PAC y equipos; en el Apéndice E.2 se lo puede ver de forma ampliada. La supervisión inicia al ingresar al sistema SCADA y desplegar la interfaz gráfica para que el supervisor ejecute el programa y verifique la conexión del PAC en el HMI, caso contrario se vuelve a llevar a cabo el programa hasta tener una ejecución exitosa. Si en el lado del supervisor se verifica que el PAC está conectado se inicia con la conexión a los equipos, caso contrario el supervisor debe conectar el PAC para seguir con el proceso. Cabe mencionar que si

durante el funcionamiento normal del SCADA, uno de los equipos se desconecta por alguna razón, esto no afecta la supervisión y monitoreo de los demás equipos, porque se vuelve a solicitar la conexión, hasta obtener una respuesta de conexión válida, además de indicar en la interfaz de dicho inconveniente.

Establecida la conexión con el equipo de campo, el PAC solicita las variables de lectura y el estado de los equipos. Se consulta el estado de los equipos para conocer si un equipo se encuentra conectado, en ejecución o si existe alguna anomalía, para ello se envía el código del error correspondiente. A continuación, el PAC recibe y procesa toda la información para obtener únicamente los datos de interés en el formato adecuado y publicarlos en variables compartidas que se leen en el lado del HMI, aquí se decide si los datos requieren de un escalamiento o se procede directamente a actualizar los diferentes campos de la interfaz. El escalamiento hace referencia a la multiplicación de los datos para así obtener los parámetros reales del equipo.

Siempre que se actualizan los datos del HMI, las variables principales son almacenadas para mantener un registro histórico. Un supervisor tiene la capacidad de navegar por las pestañas del HMI, y así mantener la supervisión de los equipos. Durante el monitoreo, el operador puede decidir si actualiza la configuración de un equipo para ajustar los campos requeridos, de tal forma que en el HMI se leen los valores actualizados y se escriben nuevamente en las variables compartidas respectivas; estas se envían al PAC, en donde se leen, se procesan y se envían a los equipos para establecer los cambios realizados. En el lado de los equipos, los cambios recibidos vuelven a enviarse en las variables de lectura y se sigue con el proceso descrito anteriormente.

Si el operador no realiza ningún cambio, pero requiere consultar el histórico tiene la opción de buscar un período de actividad y realizar la consulta en el HMI, como resultado se representa gráficamente los datos de consulta en determinado intervalo de funcionamiento. Si el operador no desea realizar ninguna de las acciones mencionadas, puede volver a navegar dentro de la interfaz o por alguna situación externa finalizar el sistema y así la supervisión/control de los equipos.

3.4. Diseño del sistema SCADA

El diseño del sistema SCADA conlleva varias etapas, iniciando con la experimentación individual de cada equipo para explorar las características de cada comunicación. A continuación se procede a configurar el PAC, que será el encargado de gestionar las comunicaciones entre los equipos de campo y el HMI. La interfaz de usuario es la última en ser diseñada porque en base a la información y tipos de datos entregados en cada nivel se agrupan los campos en el HMI.

3.4.1. Conexión remota con equipos de estudio

Inicialmente para la elaboración del sistema SCADA se realizó la conexión aislada con cada uno de los equipos para conocer las características y funcionalidades que se pueden leer o editar. Para ello se consideraron las especificaciones dadas de cada equipo en el apartado 3.2.

3.4.1.1. Carga y fuente programable DC

La carga y fuente programable en DC cuentan con el mismo procedimiento de comunicación remota con el *software* NI-VISA (disponible en la página web de NI), por lo tanto, se emplea como ejemplo la conexión realizada con la carga. De esta forma, cuando se ejecuta NI-VISA, se realiza una búsqueda exhaustiva de las interfaces disponibles, cuando hay alguna conexión disponible, se presenta la dirección y tipo de comunicación respectiva. La Figura 3.14 presenta que la carga está conectada, por lo que al dar doble clic sobre el enlace, se abre una nueva sesión dentro del equipo.

Para enlazar la carga con NI-VISA se especifica el protocolo de transporte, la dirección IP y el número de socket como se observa en el extracto de código 3.1.

Extracto de código 3.1: Formato del nombre de recurso de la fuente o carga programable

```
TCPIP0::IP_FUENTE/CARGA::2101::SOCKET
```

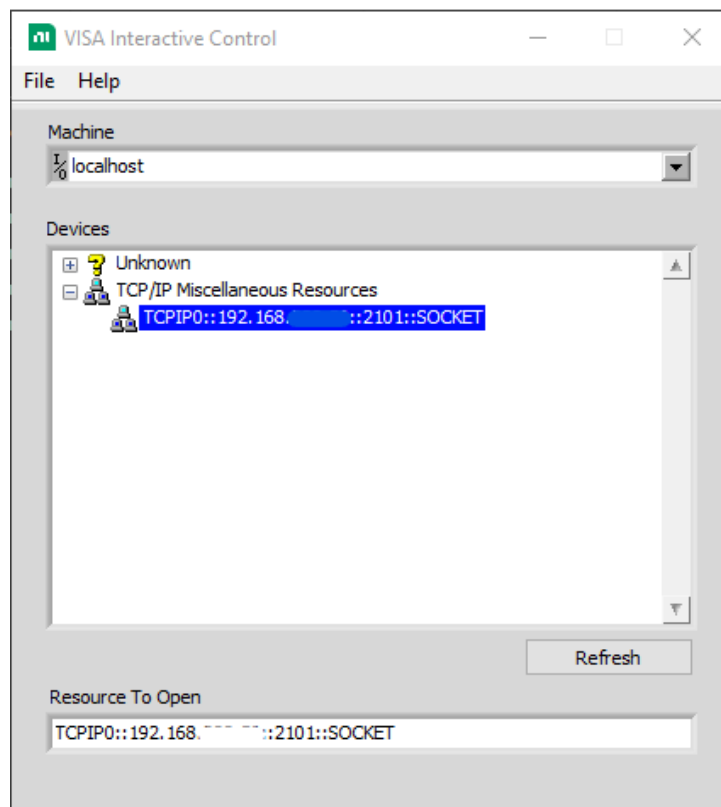


Figura 3.14: Visualización de los equipos disponibles dentro de NI-VISA.

Iniciada la sesión, se despliega la ventana de la Figura 3.15; en esta se presentan los datos principales de la sesión como dirección IP, nombre de host y puerto de comunicación; los dos primeros son iguales porque la dirección IP del dispositivo es un identificador único dentro de la red para la máquina; esto sigue el formato mostrado en 3.1. Además, se define si se desea mantener la sesión TCP abierta con los mensajes Keep Alive y si se va a colocar un retraso por defecto en el envío de datos. Otras configuraciones importantes dentro de la comunicación son el timeout y el carácter de terminación de línea para cada sentencia.

La Figura 3.16 presenta la consola principal de interacción entre la plataforma y la carga, en la parte superior existe un campo para el ingreso de comandos que pueden ser de escritura, lectura o consulta (lectura y escritura). En la Figura 3.16(a) se observa que para verificar la conexión remota se consulta el comando **IDN?*, debido a que si el dispositivo responde con los datos de marca y versiones de *software* confirma que existe comunicación, caso contrario existe error de conexión.

Verificada la comunicación remota, es posible ingresar diferentes sentencias, conside-

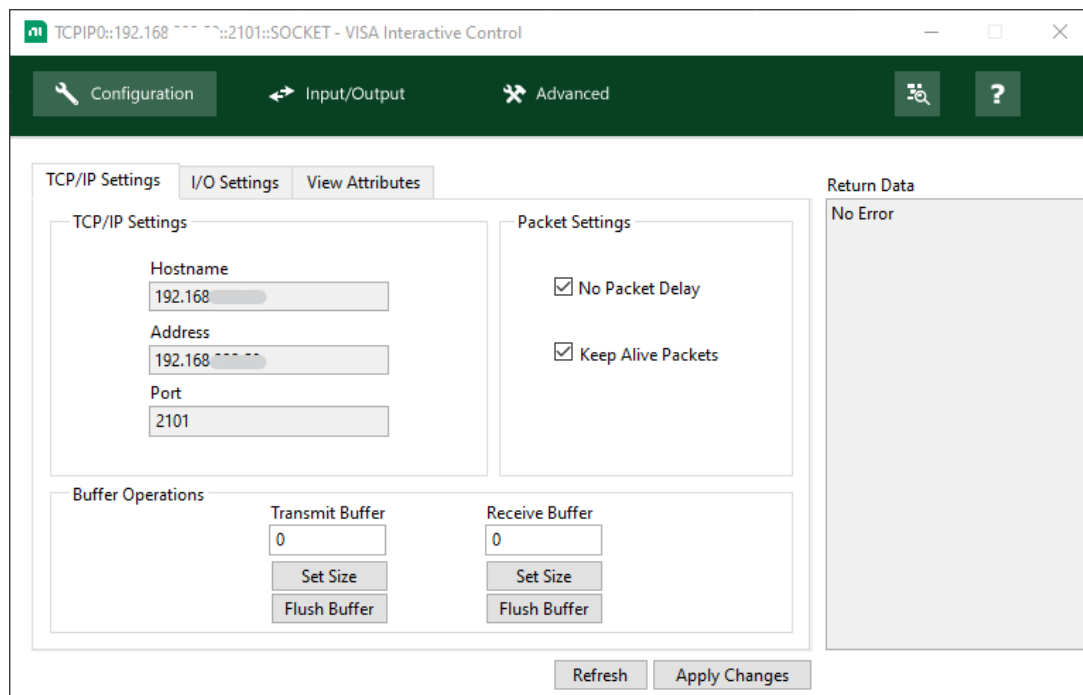


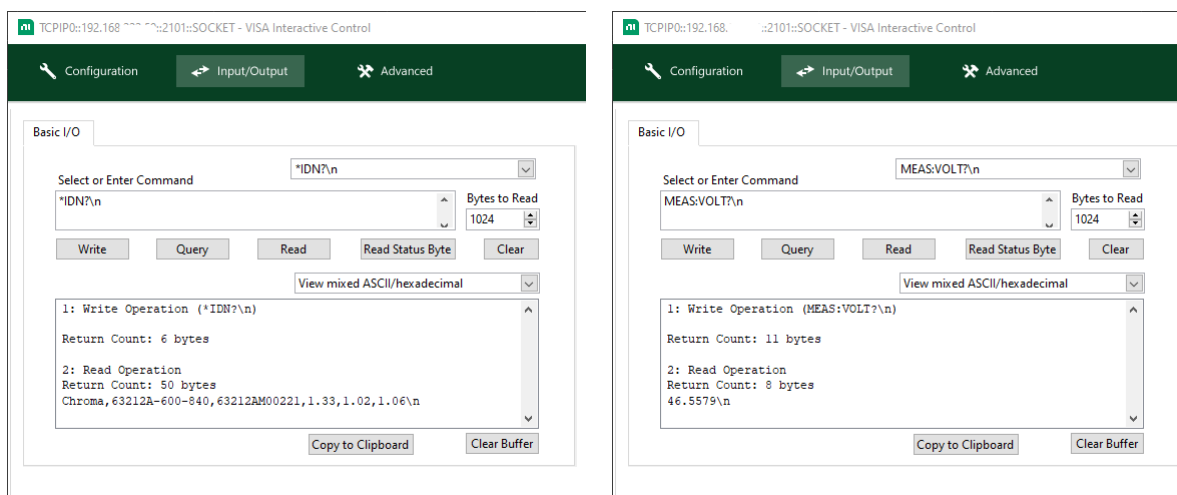
Figura 3.15: Datos principales de la conexión TCP/IP realizada mediante NI-VISA.

rando que éstas deben ser escritas en mayúsculas, con separación de palabra clave con dos puntos. Una consulta se termina la sentencia con un signo de interrogación para que el equipo reconozca que debe devolver el valor configurado o medido de una de sus variables. Del mismo modo, todas las sentencias deben terminar con un salto de línea para indicar que termina la orden; si se desea concatenar dos sentencias se debe usar el punto y coma como carácter de separación entre ellas. La Figura 3.16(b) demuestra el uso de estas reglas para la medición del voltaje en los terminales de la carga con respuesta exitosa a la consulta.

De esta forma, en LabVIEW se puede adaptar el mismo proceso descrito a partir de módulos especiales de VISA, dado que al conocer el formato de las sentencias, tipo de comunicación aceptada y el comportamiento del equipo es posible mantener el control y supervisión remoto de los dispositivos.

3.4.1.2. Electrolizador

En LabVIEW existe una herramienta para definir servidores de entrada y salida para varios protocolos de comunicación industrial; uno de ellos es el servidor Modbus, con el cual se puede realizar la comunicación con el electrolizador para tener acceso a las



(a) Consulta de identificación de la carga.

(b) Consulta de voltaje de la carga.

Figura 3.16: Interacción de la carga con NI-VISA.

distintas posiciones de memoria que poseen la información del electrolizador.

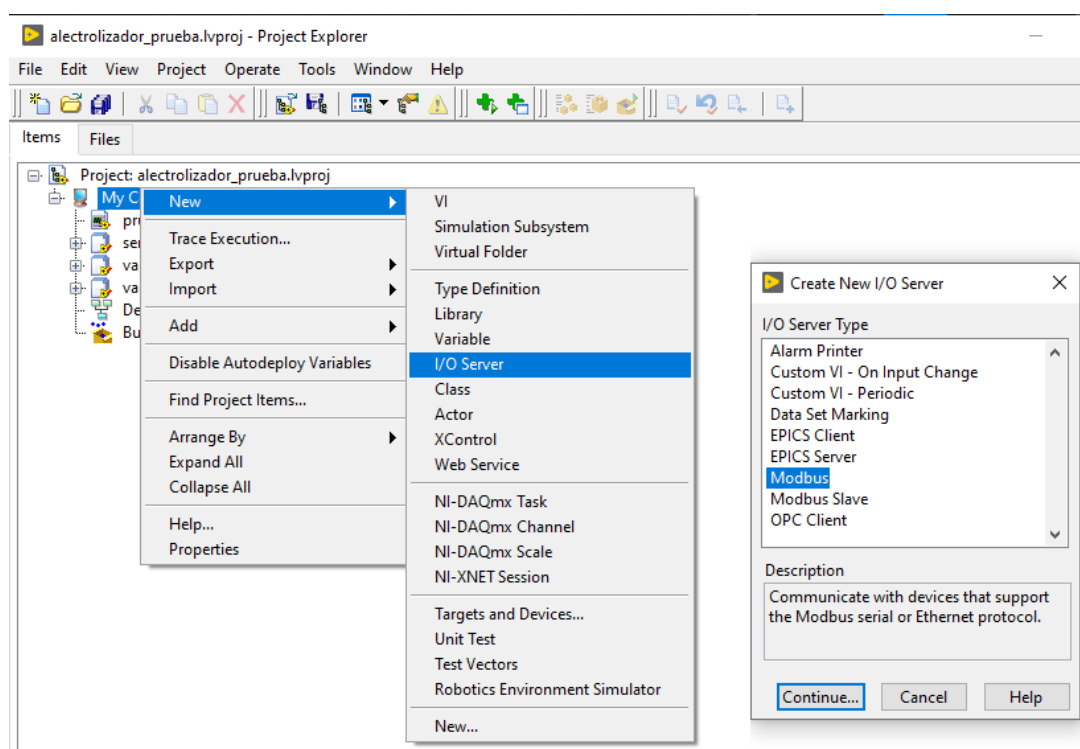
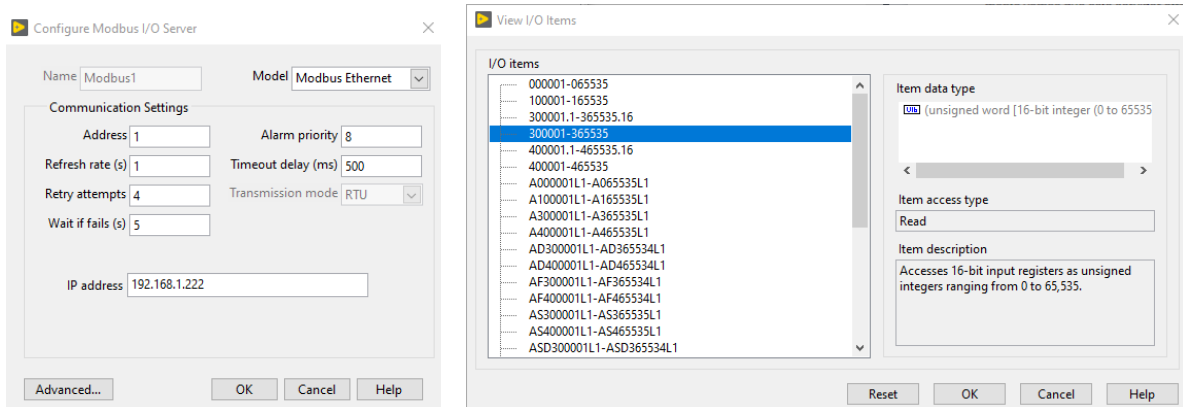


Figura 3.17: Creación del servidor Modbus en Labview.

La Figura 3.17 detalla los pasos seguidos para la creación de un nuevo servidor Modbus, el cual se comunica con la placa sbRIO-9642 por Ethernet. Por otro lado, en la Figura 3.18(a) se observan los principales parámetros de conexión utilizados con el servidor Modbus: dirección IP del Electrolizador (dirección IP por defecto en el dis-

positivo, 192.168.1.222), tipo de prioridad, el timeout máximo de retraso antes de dar por caído el enlace con el equipo y tiempos de reintento para mantener la conexión en caso de presentarse algún problema.



(a) Propiedades de la conexión.

(b) Items del servidor Modbus.

Figura 3.18: Propiedades de la conexión e items del servidor Modbus del electrolizador.

Con esto se finaliza la creación del servidor e inmediatamente se puede visualizar los ítems usando la opción del mismo nombre al pulsar el botón secundario sobre el icono del servidor, se despliega la ventana mostrada en la Figura 3.18(b); donde se observa el tipo de registros, los accesos permitidos y el tipo de dato entregado por cada uno.

De los registros presentados en la Tabla 2.1 se utilizan los registros de ingreso por medio de variables compartidas enteras sin signo de 16 bits enlazadas a las posiciones de memoria; si se desea acceder como variables tipo array, booleano, sin signo de 32 bits u otros se pueden escoger las demás opciones que existen dentro del cuadro de diálogo al momento de seleccionarlás. Cabe mencionar que si el tipo de variables es de más de 16 bits (32 o 64 bits), LabVIEW toma los registros subsiguientes hasta cumplir con el requerimiento de la variable declarada.

3.4.1.3. Pila de hidrógeno

La pila de hidrógeno emplea comunicación serial RS-232, por lo cual para las pruebas de conexión se usa un conversor RS-232 a USB para experimentar con el enlace y supervisar el dispositivo. De acuerdo a las recomendaciones del fabricante, se usa el *software Hyperterminal* para verificar la comunicación entre el equipo y el host remoto

con las configuraciones de la Figura 3.19.

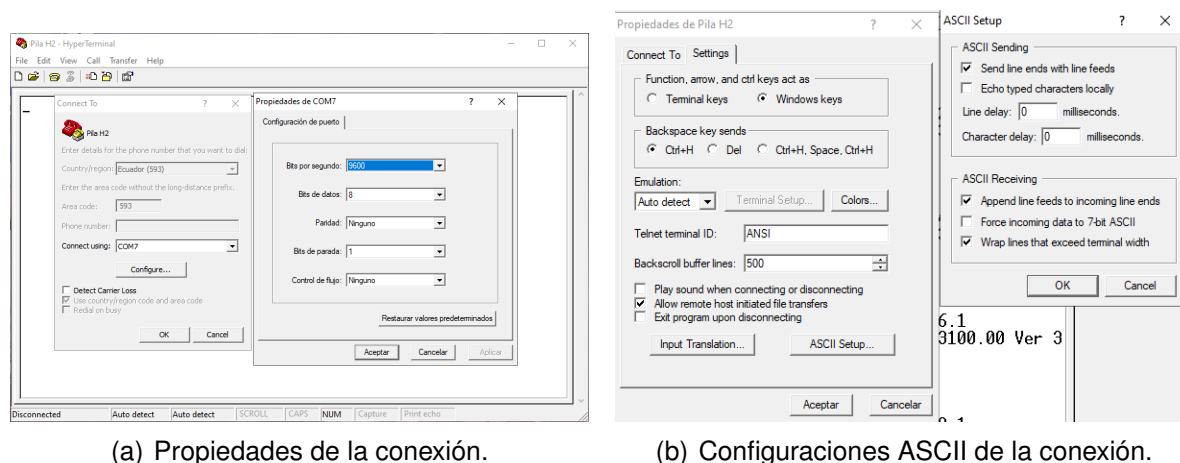


Figura 3.19: Propiedades de la conexión con la pila de hidrógeno.

En la Figura 3.19(a) se observan las propiedades de conexión establecidas: puerto, bits por segundo, bit de paridad y el control de flujo en la conexión serial. Posteriormente, se procede con las configuraciones del formato de los datos a ASCII, como se muestra en la Figura 3.19(b), donde se especifica el salto de línea y los espacios respectivos en cada dato que entrega el sistema del equipo. Esto hace posible el procesamiento de la información en un formato específico.

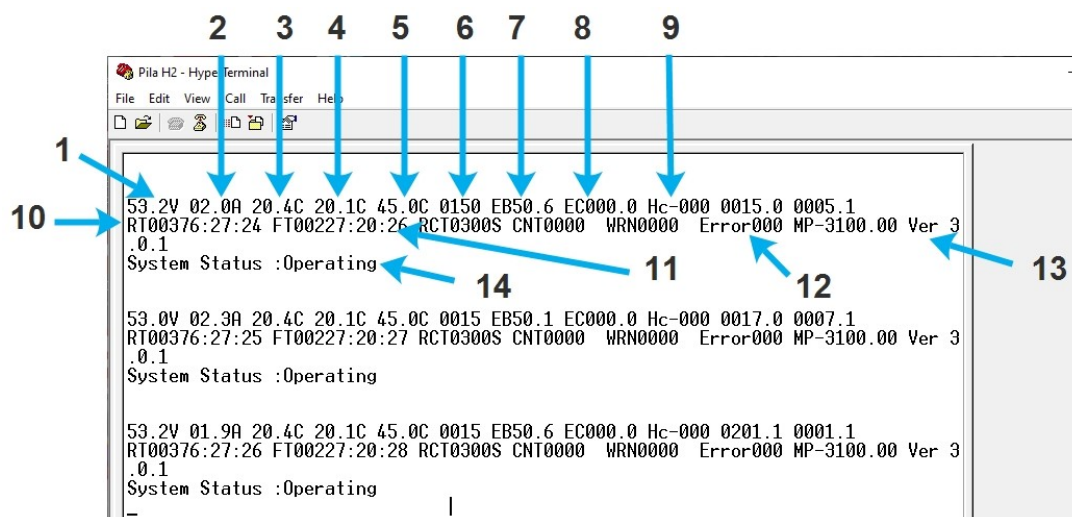


Figura 3.20: Formato de datos entregados por la pila de hidrógeno.

Los datos se entregan cada segundo en el formato mostrado en la Figura 3.20, la expresión concatena los parámetros de la Tabla 3.7 en tres líneas.

Tabla 3.7: Datos entregados por la pila de hidrógeno mediante RS-232.

N°	Instrucciones
1	Voltaje de la pila
2	Corriente de la pila
3	Temperatura de la pila
4	Temperatura ambiente
5	Temperatura de la tarjeta
6	Velocidad de ventiladores
7	Voltaje de salida
8	Corriente de Salida
9	Concentración de H ₂
10	Tiempo total de operación
11	Tiempo de operación con potencia de salida
12	Código de Error
13	Versión del <i>software</i>
14	Estado de operación del sistema

3.4.2. Configuración del PAC

El sbRIO-9642 de NI tiene la ventaja de ser administrado por los *softwares* NI-MAX y LabVIEW. NI-MAX permite gestionar distintas configuraciones de la placa (carga del *software* base, ajustes de red y del sistema en general); mientras que LabVIEW permite gestionar varios dispositivos conectados a las interfaces y/o pines del PAC. La función principal del PAC en este trabajo de titulación es la gestión de la comunicación entre el sistema SCADA y los equipos de campo por medio del puerto Ethernet y el puerto serial RS-232.

La configuración inicial y la actualización del sistema del controlador a LabVIEW 2019 se detalla en el Apéndice A.1, la versión de LabVIEW instalada es la versión más moderna que permite la placa. El sistema de monitoreo visto desde la pirámide de automatización se ubica el nivel dos con el PAC y en el nivel tres con el computador para el HMI. En el Apéndice A.2 se detalla el procedimiento seguido para crear el proyecto con el FPGA.

Se emplearon dos estructuras que juegan un papel importante en la repetición del código programado y en la ejecución secuencial de procesos entre los dispositivos y el controlador. La estructura While Loop de la Figura 3.21(a) ejecutará al menos una

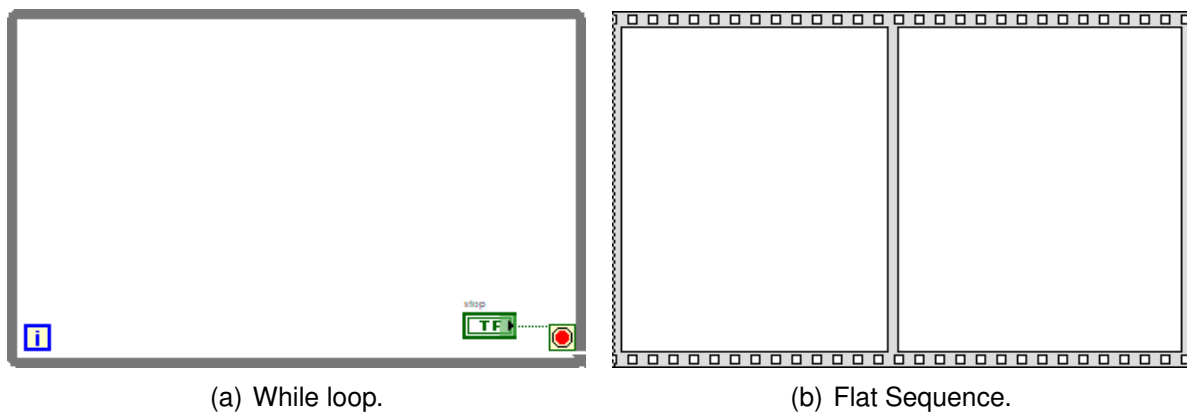


Figura 3.21: Estructuras relevantes en LabVIEW.

vez el código interno y se mantendrá ejecutando mientras se cumplan las condiciones establecidas (cambio de estado de un botón, error o activación de alguna variable booleana). La estructura Flat Sequence mostrada de la Figura 3.21(b) ejecuta el código interno de cada uno de los módulos de izquierda a derecha, siempre y cuando todas las variables ingresadas se hayan efectuado y los valores estén disponibles.

En consecuencia, se utilizó un While Loop por equipo para paralelizar los procesos, y para llevar orden en el control de cada componente se usa los Flat Sequences en su versión Stack Sequence para reducir la extensión del programa. Para la supervisión de la pila, carga y fuente en DC, cada secuencia de control usa tres procesos principales, descritos en la Tabla 3.8, el detalle se presenta en los siguientes apartados.

Tabla 3.8: Secuencia de procesos para el monitoreo y supervisión de los equipos.

Stack	Proceso
0	Establecer la conexión
1	Supervisión y monitoreo
2	Cierre de sesión

3.4.2.1. Pila de hidrógeno

Debido a que la pila de hidrógeno únicamente entrega datos, se interpretó la información a través de la interfaz RS-232. Para la lectura de datos de memoria del equipo se realiza la conexión usando las funciones de VISA en LabVIEW y se sigue la secuencia de procesos de la Tabla 3.8.

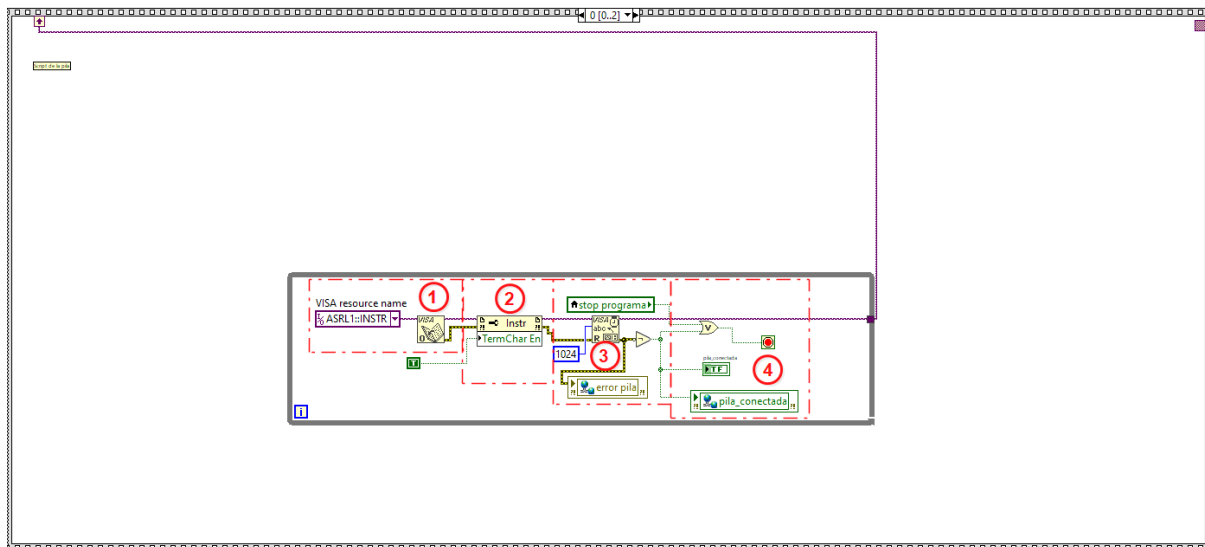


Figura 3.22: Proceso de conexión con la pila de hidrógeno.

- **Establecimiento de conexión:** la Figura 3.22 muestra el proceso para el establecimiento de conexión entre la pila y el PAC de forma general, mientras que en el Apéndice F.1 se muestra ampliada. Siguiendo la numeración de color rojo, en el primer paso se usa la función VISA OPEN, con argumento de entrada el nombre del recurso (en este caso el puerto serial RS-232 de la placa). El segundo paso, habilita el carácter de terminación de sentencia para diferenciar la finalización de todas las respuestas. El tercer paso realiza una primera lectura de los datos, en el caso de existir un error no se da paso al siguiente proceso y se mantiene en el intento de comunicación hasta detectar una conexión exitosa. En el caso de no tener errores se pasa al cuarto paso, para detener ese While Loop y continuar con el siguiente proceso de la Tabla 3.8.
- **Supervisión y monitoreo:** En la Figura 3.23 se observa en rojo los pasos del proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno de forma general, mientras que en el Apéndice F.2 se muestra en fragmentos. El primer paso lee los datos con la función VISA READ, en donde se ingresa como argumentos el nombre del recurso que se abrió en el proceso anterior y la posición 1024 de la memoria del equipo. A la salida se tendrá el nombre del recurso y la sentencia de la Figura 3.20 en una sola cadena.

El segundo paso elimina todos los saltos de línea y los espacios dobles existen-

tes para dejar como separador un solo espacio entre cada dato. El tercer paso separa los datos en función al espacio existente entre cada variable. En el cuarto paso se realizan las transformaciones de formato y escalamientos respectivos para su posterior publicación en la red.

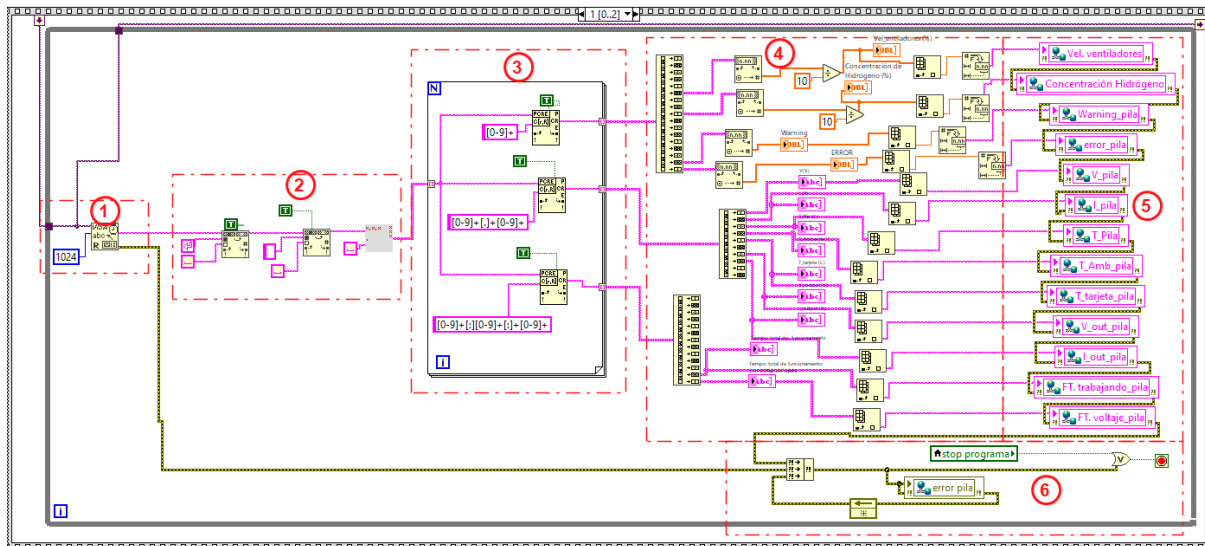


Figura 3.23: Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno.

El paso cinco publica en la red por separado los valores de cada uno de los parámetros leídos a través de la herramienta variables compartidas. Las variables compartidas permiten al controlador leer los datos del equipo, procesarlos y difundirlos a la red para que un host acceda a ellos, los lea y los presente dentro de un HMI de forma ordenada. Cada una de las variables utilizadas se describen en el Apéndice B.1 con el formato string, siguiendo lo mostrado en la Tabla 3.2.

Finalmente, en el paso seis se concatenan todos los errores de las distintas funciones usadas dentro del código de control de la pila y se publica en una variable compartida para la visualización remota del error en el caso de existir una alteración en el funcionamiento normal de la placa.

- **Cierre de sesión:** Es el tercer proceso de la Tabla 3.8 para detener la supervisión de los datos cerrando la sesión. Para esto se emplea la función VISA CLOSE, que tiene como único argumento el nombre del recurso.

En el caso de la carga programable se mantiene el formato general de los procesos vistos en la Tabla 3.8, con las siguientes diferencias:

- **Establecimiento de conexión:** Para el proceso de establecimiento de conexión se cambia el nombre del recurso al formato mostrado en la sentencia 3.1 bajo TCP/IP. Si el equipo no está conectado se dará un error (no hay respuesta al enviar el mensaje de apertura de conexión) y no se procede al siguiente proceso.
- **Supervisión y monitoreo:** El cambio más relevante se presenta en este proceso; pues se controlan mediciones eléctricas y se configuran los distintos modos de operación que el equipo posee. En la Figura 3.24 se observa en rojo los pasos seguidos para la supervisión y monitoreo de la carga programable DC de forma general, mientras que en el Apéndice G se muestra en fragmentos.

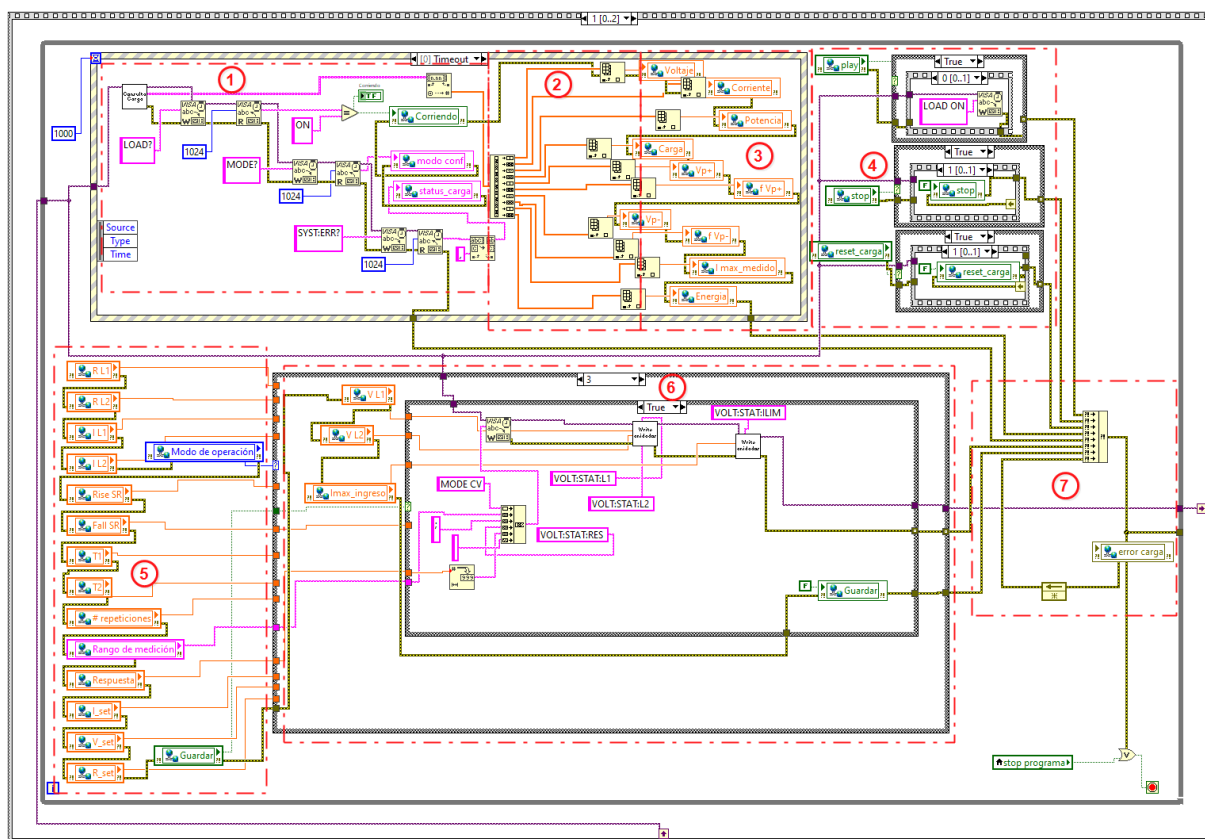


Figura 3.24: Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC.

En el paso uno se realiza la lectura de los datos de la carga, iniciando por el

SubVI *Consulta carga* que se encarga de la consulta de valores de las variables eléctricas de la carga: voltaje, corriente, potencia, carga y energía, así como de la lectura y ubicación de la información en la posición de memoria 1024 por medio de las funciones VISA WRITE y VISA READ. Como salida del SubVI se tiene un array de strings de los datos consultados. Seguido al SubVI, se observa que se realizan consultas individuales sobre el estado de la carga, modo de operación configurado y el estado activo o apagado de la carga.

Los comandos empleados para la lectura y escritura en la carga programable emplean el formato de las sentencias de 3.2, en donde se observa que se coloca una sentencia que concatena dos órdenes (lectura y escritura juntas). El uso de letras mayúsculas y palabras claves es importante para denotar cada una de las operaciones de los subsistemas, por ejemplo MEAS (del inglés measure, hace referencia a realizar mediciones en los terminales de la carga) se usa para leer los valores medidos por el equipo; luego separado por dos puntos se coloca la variable a leer. Cabe mencionar que para concatenar dos sentencias se usa el punto y coma, caso contrario se usa el salto de línea correspondiente para terminar con la orden enviada al equipo.

Extracto de código 3.2: Formato de las sentencias para control remoto

```
MEAS:CURR?; MEAS:POW?                #Lectura de datos
anidadas
CURR:STAT:L1 10; VOLT:STAT:L1 52      #Escritura anidado
```

En el paso dos se procede a desglosar toda la información leída desde la carga para publicarlas en la red en el formato flotante usando las variables compartidas del bloque tres, cada una de estas se desglosa en el Apéndice B.2. En el paso cuatro se realiza el control del equipo por medio de variables tipo booleanas para la ejecución, detención y reinicio de los programas configurados. El paso cinco lee los datos de variables compartidas para la configuración del equipo; cada una de estas están descritas dentro del Apéndice C.1 en base a la información mostrada en la Tabla 3.9. Todas las variables compartidas se almacenaron dentro de librerías según el tipo de dato que guardan y con el distintivo del equipo en el nombre de la librería.

En el paso seis de la Figura 3.24 se coloca las distintas configuraciones de los modos de operación usando una estructura de once casos que siguen la codificación mostrada en la Tabla 3.9; en cada proceso se declararon variables acorde al modo de operación con su respectivo tipo de variable y límites de operación. Para cargar la configuración se inicia con la lectura del valor de la variable del paso cinco de la imagen, se lo convierte todo a formato string, se concatena con otras sentencias e ingresa de argumento a la función VISA WRITE. Cada modo sigue las especificaciones descritas en el apartado 3.2.3.

Adicional a los once modos de operación, se añadió un modo cero para no alterar la configuración de la carga y generar cambios en su comportamiento (modo adicional para no variar ningún parámetro de la carga). En el resto de modos de operación se configuran cada uno de los parámetros descritos en la Tabla 3.9. Cabe mencionar que la carga realiza la conmutación automática entre cambios de modos de operación sin la necesidad de que se detenga la ejecución.

- **Cierre de sesión:** El proceso se mantiene similar al descrito en la pila, pues únicamente se necesita el nombre del recurso como argumento de ingreso a la función VISA CLOSE.

3.4.2.3. Fuente programable

Como se había mencionado en el apartado 3.4.1.1, la fuente programable en DC tiene un comportamiento similar al de la carga para los procesos de comunicaciones, control y supervisión. Los procesos se describen a continuación:

- **Establecimiento de conexión:** El proceso para establecer la conexión se mantiene con el formato general visto anteriormente. Por lo tanto, el formato del nombre del recurso es igual al presentado en el extracto de código 3.1; mientras que el formato de las cadenas de ingreso a la función VISA WRITE sigue lo descrito en el extracto de código 3.2.
- **Supervisión y monitoreo:** El proceso de monitoreo y supervisión de la fuente se realiza de manera análoga al desarrollado con la carga; la diferencia recae en

Tabla 3.9: Parámetros de la carga programable DC.

Modo de Operación	Parámetros	Descripción	Valor
Corriente constante	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-840 A
	$SR \uparrow, SR \downarrow$	Velocidad de subida y bajada	0.01-24 A/ μ s
	V_{range}	Rango de medición	H, M, L
Resistencia constante	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-2000 Ω
	$SR \uparrow, SR \downarrow$	Velocidad de subida y bajada	0.01-24 A/ μ s
	I_{range}	Rango de medición	H, M, L
Voltaje constante	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-600 V
	I_{limit}	Máxima corriente de carga	0-840 A
	Response	Velocidad de respuesta	Fast, Normal, Slow
	I_{range}	Rango de medición	H, M, L
Potencia constante	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-12000 W
	$SR \uparrow, SR \downarrow$	Velocidad de subida y bajada	0.01-24 A/ μ s
	V_{range}	Rango de medición	H, M, L
Corriente constante dinámica	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-840 A
	$SR \uparrow, SR \downarrow$	Velocidad de subida y bajada	0.01-24 A/ μ s
	$T1, T2$	Tiempo de carga $L1, L2$	0.1-99999.99 ms
	Repeat	Número de veces de repetición	0-65535
	V_{range}	Rango de medición	H, M, L
Resistencia constante dinámica	$L1, L2$	Carga 1 y 2	0-2000
	$SR \uparrow, SR \downarrow$	Velocidad de subida y bajada	0.01-24 A/ μ s
	$T1, T2$	Tiempo de carga $L1, L2$	0.1-99999.99 ms
	Repeat	Número de veces de repetición	0-65535
Señal senoidal dinámica	I_{DC}	Corriente de polarización en CC	0-840 A
	I_{AC}	Onda senoidal de carga pico a pico en CA	0-840 A
	$FREQ$	Frecuencia de onda senoidal	0-20 kHz
Circuito RLC	C_L	Capacitancia de carga paralela equivalente	30 μ F-50 mF
	R_L	Resistencia de carga paralela equivalente	0-2000 Ω
	L_S	Inductancia en serie equivalente	0.1-20 μ H
	R_S	Resistencia en serie equivalente	30m Ω -20 Ω
Modo CVCC	V_{set}	Nivel de voltaje	0-600 V
	I_{set}	Nivel de corriente	0-840 A
	Response	Velocidad de respuesta	Fast, Normal, Slow
Modo CRCC	R_{set}	Nivel de resistencia	0-2000 Ω
	I_{set}	Nivel de corriente	0-840 A
Modo CVCR	V_{set}	Nivel de voltaje	0-600 V
	R_{set}	Nivel de resistencia	0-2000 Ω

la configuración de modos de salidas y programas para pruebas de larga duración. En la Figura 3.25 se observa en rojo los pasos seguidos para este proceso de forma general, mientras que en el Apéndice H se muestra en fragmentos.

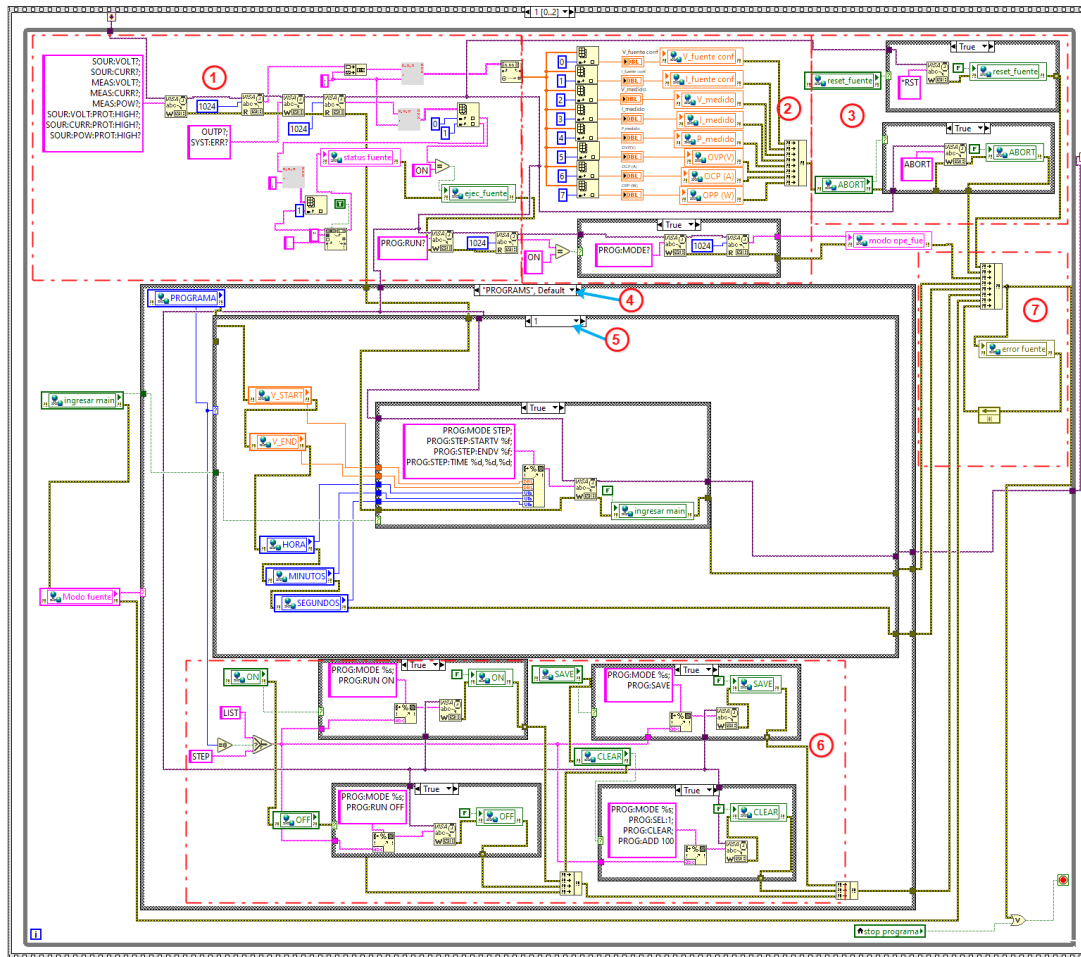


Figura 3.25: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC.

Como primer paso se tiene la medición de las variables eléctricas de la fuente como: voltaje, corriente, potencia y límites de protección del equipo que se agrupan en un solo array. También se consulta el estado y el modo de operación (modo de salida y modo programa) en el que está configurado el equipo. En el paso número dos se descompone el array para la publicación de las variables individuales en variables compartidas. En el Apéndice B.3 se presentan las variables de supervisión para la fuente, las cuales son del tipo double.

En el tercer paso de la Figura 3.25 se inicia con el proceso de control por medio de una estructura de casos que detecta el cambio de estado de las variables booleanas de control para reiniciar o abortar la ejecución de algún programa

configurado. Dentro del cuarto y quinto paso se configuraron dos modos de operación predeterminados (Programas y Modos de Salida). En la Tabla 3.10 se describen los seis modos de salida configurados en el primer modo de operación, mientras en la Tabla 3.11 se describen los tres programas configurados en el segundo modo de operación. Los modos de operación se desarrollaron en función a la información descrita en el apartado 3.2.4.

Tabla 3.10: Parámetros para modos de salida del primer modo de operación.

Modos de salida	Ajuste	Descripción	Valor
Modo CV/CC	V	Voltaje de ingreso	0-600V
	I	Corriente de Ingreso	0-25A
Modo Tabla	Col. V	Columna de voltajes	0-600V
	Col. I	Columna de corrientes	0-25A
Modo SAS	V_{oc}	Voltaje en circuito abierto	0-600V
	I_{sc}	Corriente en cortocircuito	0-25A
	V_{mp}	Voltaje de máxima potencia	
	I_{mp}	Corriente de máxima potencia	
Modo EN50530	V_{mp}	Voltaje de máxima potencia	
	P_{MP}	Máxima potencia	0-15000W
	FF	Indicador de eficacia en panel solar	c-Si/ Thin-Film
	Irr	Irradiación	0-3000 W/m^2
Modo SANDIA	V_{mp}	Voltaje de máxima potencia	
	P_{MP}	Máxima potencia	0-15000W
	FF	Indicador de eficacia en panel solar	0.4-0.95
	β	Coeficiente temperatura-voltaje	-2-0 %/°C
	Irr	Irradiación	0-3000 W/m^2
	T_{mp}	Temperatura de celda	-40-85 °C
	Irr_{ref}	Irradiación de celda de referencia	0-3000 W/m^2
	$T_{mp_{ref}}$	Temperatura de celda de referencia	-40-85 °C

En el modo de operación *Modos de salida*, el modo CC/CV permite configurar en los terminales de salida del equipo un valor de corriente y voltaje constante. El modo Tabla permite ingresar una tabla de datos según las condiciones del apartado 3.2.4, con esto se tendrá una corriente y voltaje en las salidas de la fuente. El modo SAS, EN50530, Tabla y SANDIA permiten obtener valores de voltaje y corriente en función a la información y condiciones detalladas en el apartado 3.2.4.

En el apartado 3.2.4 se describen las funcionalidades del modo List y Step dentro del modo de operación *Programas*. El modo List puede configurar un progra-

Tabla 3.11: Parámetros para programas del segundo modo de operación.

Programa	Estructura	Ajuste	Descripción	Valor
List Mode	Programa	Trig Pull	Señal de disparo para cambio de secuencia	Alto/Bajo
		N° Prog.	Repeticiones del programa (0 crea un loop infinito)	0-15000
		Clear	Limpia las secuencias del programa	Si/No
		Save	Guarda el estado del programa	Si/No
	Secuencias	N°	Número de secuencia	1-100
		Tipo	Tipo de secuencia. En skip se salta la secuencia.	Auto/Skip
		Tiempo	Tiempo de ejecución de una secuencia. Se configura en Tipo=Auto	0.005-15000s
		V	Voltaje de salida de una secuencia	0-600V
		V S.R	Velocidad de cambio de voltaje	0.01-10 V/s
		I	Corriente de salida de una secuencia	0-25 A
		I S.R	Velocidad de cambio de corriente.	0.0030-0.1 A/s
Step Mode		V_{start}	Voltaje inicial	0-600V
		V_{end}	Voltaje final	0-600V
		Tiempo	Tiempo de ejecución (HOUR:MIN:SEC)	00:00:00-99:59:59.99
VI Program		$Plot_{VT}$	Señal de ingreso	-
		voltaje	Límite eje y	0-50V
		tiempo	Límite eje x	0-40s

ma con un máximo de cien secuencias que tienen como parámetros de entrada principales al voltaje, corriente y tasa de cambio de los mismos. En el modo Step se configura un voltaje inicial y un voltaje final que debe ser alcanzado en un tiempo determinado. Adicionalmente a los programas predeterminados del equipo, se configuró un programa llamado VI-PROGRAM, que permite simular cualquier señal a partir del ingreso de una gráfica Voltaje-tiempo definida por el usuario.

En el paso 6 de la Figura 3.25 el proceso es similar al descrito en el apartado tres; pues en cada modo de operación de la fuente hay distintas formas de ejecutar, parar y guardar las configuraciones realizadas. Es decir, en cada modo

de operación las sentencias de ingreso al VISA WRITE son distintas pero el formato y manipulación es similar. En el Apéndice C.2 se resumen las principales variables compartidas que se utilizaron para configurar los diferentes modos de operación. En la tabla se detalla el nombre, tipo y descripción de cada variable, cuyos nombres son similares a los parámetros mostrados en las Tablas 3.10 y 3.11.

- **Cierre de sesión:** El proceso es similar al descrito para la pila, pues únicamente se necesita el nombre del recurso como argumento de ingreso a la función VISA CLOSE.

3.4.2.4. Electrolizador

Antes de realizar la configuración respectiva, se asignó una dirección IP al electrolizador dentro de la subred interna del laboratorio. La programación del electrolizador con el PAC se realiza según lo descrito en la sección 3.4.1 declarando el servidor Modbus y las variables compartidas enlazadas. En función a la Tabla 3.12 los datos que son leídos desde los distintos registros se deben escalar para presentarse en pantalla. El proceso de escalamiento se realizó directamente en el programa de visualización de los datos o HMI, pues declarar variables compartidas para leer los registros y luego crear otras que únicamente están escaladas es redundar en la información, agregando carga innecesaria a la red.

Para la creación del servidor se siguió los pasos de la Figura 3.17, quedando con las propiedades mostradas en la Figura 3.18(a).. Después, se procedió con las distintas variables compartidas para leer las posiciones de memoria del registro de ingreso; siguiendo el orden de la Tabla 3.12. Cada variable mantiene un número del registro y el tipo de variable para distinguir los datos en el HMI, escalarlos y presentarlos al usuario. En el Apéndice B.4 se muestran cada una de las variables de visualización del Electrolizador declaradas en el PAC. De esta forma, cuando se detecta que el electrolizador está conectado, los valores se actualizan constantemente.

El electrolizador también permite realizar un control remoto de propiedades básicas, como el inicio de operación, detención de operaciones y reinicio del controlador; para

esto se usan variables booleanas declaradas en el registro Coil, las cuales se muestran en la Tabla 3.13. Las variables compartidas se presentan en la Apéndice C.3.

Tabla 3.12: Registros de ingreso Modbus del Electrolizador.

Variable	N°	Tipo	Tamaño (bits)	Conversión LSB
Estado actual	128	unsigned	16	1
Errores	133	unsigned	16	1
Alarmas	134	unsigned	16	1
Temperatura dryer 0 (°C)	135	float	32	0.0023283064370808
Temperatura dryer 1 (°C)	137	float	32	0.0023283064370808
Flujo H2 (L/h)	139	float	32	0.0023283064370808
Ciclos de producción de cada pila	149	short	16	1
Temperatura agua (Mod. A)	153	float	32	2.3283064370808e-07
Temperatura agua Mod. B (°C)	155	float	32	2.3283064370808e-07
Presión Mod. A (bar)	159	float	32	2.3283064370808e-07
Presión Mod. B (bar)	161	float	32	2.3283064370808e-07
Presión salida Mod.A (bar)	163	float	32	2.3283064370808e-07
Presión salida Mod.B (bar)	165	float	32	2.3283064370808e-07
Vel. ventilador A (rpm)	167	float	32	2.3283064370808e-07
Vel. ventilador B (rpm)	169	float	32	2.3283064370808e-07
Vel. ventilador A2 (rpm)	171	float	32	2.3283064370808e-07
Vel. ventilador B2 (rpm)	173	float	32	2.3283064370808e-07
Vel. ventilador Dryer (rpm)	175	float	32	2.3283064370808e-07
Señal externa (V)	177	float	32	2.3283064370808e-07
Voltaje de pila 1 (V)	179	float	32	2.3283064370808e-07
Voltaje de pila 2 (V)	181	float	32	2.3283064370808e-07
Voltaje de pila 3 (V)	183	float	32	2.3283064370808e-07
Voltaje de pila 4 (V)	185	float	32	2.3283064370808e-07
Corriente de pila 1 (A)	187	float	32	2.3283064370808e-07
Corriente de pila 2 (A)	189	float	32	2.3283064370808e-07
Corriente de pila 3 (A)	191	float	32	2.3283064370808e-07
Corriente de pila 4 (A)	193	float	32	2.3283064370808e-07
Total de H2 (L)	195	float	32	0.232830643475249
Total de pilas	197	unsigned	16	1
Presión de salida (bar)	208	float	32	2.3283064370808e-07
Presión del dryer (bar)	210	float	32	2.3283064370808e-07
Pilas activas	212	unsigned	16	1
Potencia Mod. A (W)	217	short	16	1
Potencia Mod. B (W)	218	short	16	1
Estado del dryer	219	short	16	1
Error del dryer	220	short	16	1

Tabla 3.13: Coils de control del Electrolizador.

Coil	Nombre	Descripción
32	EL_ON	Iniciar electrolizador
33	EL_OFF	Detener electrolizador
34	EL_RESET	Reiniciar controlador del electrolizador

3.4.3. Diseño de HMI

En la interfaz gráfica del SCADA los operadores pueden monitorear, visualizar y controlar los dispositivos de estudio. De forma general, el HMI se divide en seis partes principales: cuatro pestañas dedicadas a cada equipo sinóptico general e históricos. El sinóptico general resume los datos del estado de los dispositivos, mientras que para mayor detalle se emplean cada una de las ventanas de los equipos.

El manejo de cada uno de los dispositivos se lo hace de manera análoga al realizado dentro del PAC; en este caso, para paralelizar los procesos de cada máquina se usan While Loops para una interacción más rápida entre el control remoto y la respuesta del equipo. Los casos de cada uno de los dispositivos mostrados en la sección 3.4.2 se mantienen, dado que en el lado del host se leen los datos de configuración ingresados por el usuario y se publican en las variables compartidas para que el controlador los lea y los actualice dentro de la respectiva máquina. Para los valores de visualización se realiza un proceso inverso, porque el PAC lee los valores del equipo y actualiza las variables compartidas respectivas, mientras que el host HMI lee estos valores y los presenta al usuario.

Además de la programación similar a la del controlador, para el acceso a las variables compartidas, tanto en lectura como escritura, se emplean las funciones de Shared Variable del módulo Data Communications, facilitando el acceso a las variables de la red al colocar la dirección de ruta y el tipo de dato. El proceso de lectura/escritura entre los equipos es similar, por lo cual se toma la carga como ejemplo de aplicación.

En la Figura 3.26 se observan los tres pasos del proceso en rojo, siendo en uno donde se leen las variables de visualización de la carga presentados en el Apéndice B.2. Para la lectura se establece la ruta de la variable y el tipo de dato que se lee, con esto se tendrá a la salida de la función Read Variable directamente el valor del

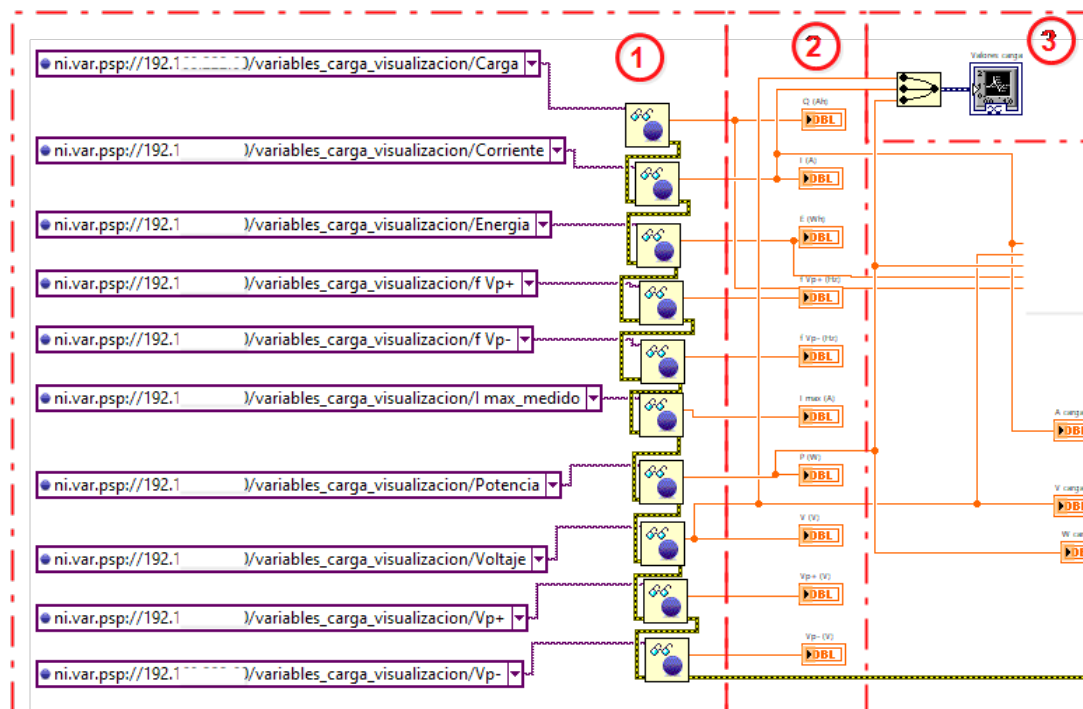


Figura 3.26: Lectura de una variable compartida con la función Read Variable del módulo Data Communications.

dato de la variable. La ruta de la variable compartida se conforma por el protocolo de comunicación PSP, la dirección IP del equipo que contiene a la variable, la librería y el nombre de la variable que se lee. El formato general de las rutas de las variables compartidas se observa en la sentencia 3.3.

Extracto de código 3.3: Formato de la ruta de las variables compartidas

```
ni.var.psp://IP_controlador/nombre_libreria/nombre_variable
```

En el paso dos se seleccionan los datos leídos desde las variables compartidas y se los presentan en un indicador para su visualización. Los datos de la carga, fuente y pila no necesitan ser escalados por ningún factor por lo que pasan directamente a visualización, mientras que los datos del electrolizador se escalan siguiendo el orden de los valores a multiplicar mostrados en la Tabla 3.12. Finalmente, en el paso tres se observa que las principales magnitudes se presentan de forma gráfica para representar el comportamiento de los datos en un intervalo de tiempo definido.

Referente a la escritura de las variables compartidas ubicadas en el PAC, se utilizan botones y campos de ingreso en el HMI para las distintas funcionalidades a configurar. En la Figura 3.27 se presentan los cinco pasos del proceso en rojo. En uno se leen

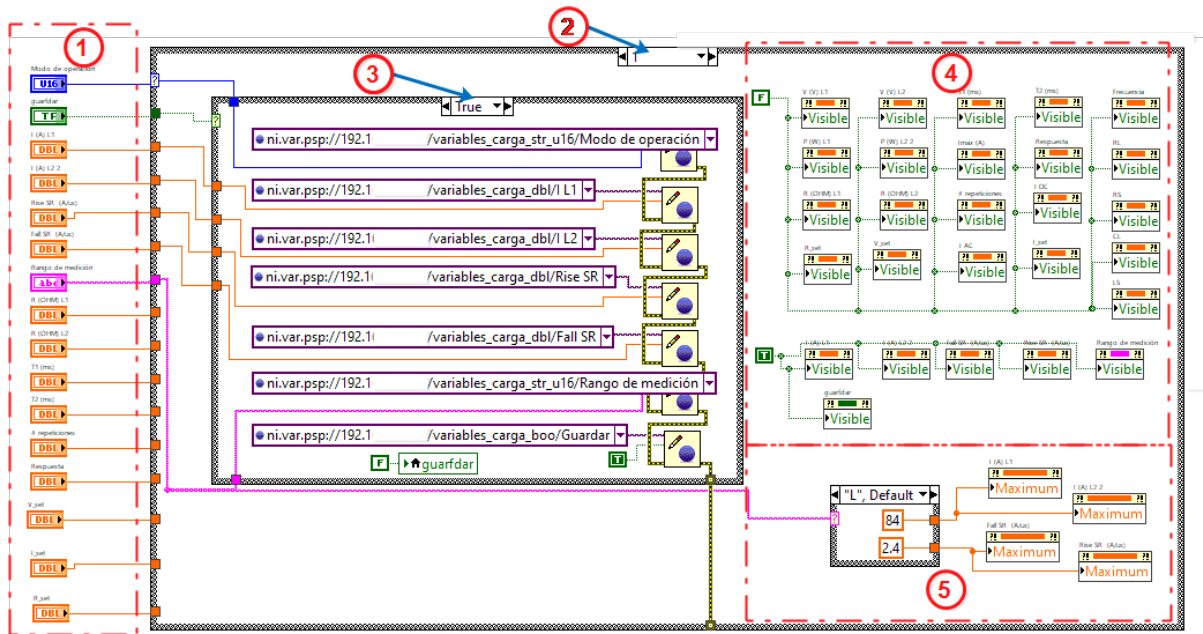


Figura 3.27: Escritura de una variable compartida con la función Write Variable del módulo Data Communications.

los valores de los campos de ingreso que son enviados a los demás procesos. En el paso dos se utiliza una estructura de casos para especificar el modo de operación en función a las Tablas 3.10 y 3.11 de manera análoga a lo realizado en el paso seis de la Figura 3.24.

Los pasos tres, cuatro y cinco se encuentran dentro de la estructura de casos descrita en el paso dos de la Figura 3.27 para la escritura de las variables compartidas, la visualización u ocultamiento de los campos de acuerdo al modo a configurar y la limitación de los valores. En este sentido, en el paso tres se detecta que se ha confirmado el cambio de configuración y se escriben los valores en las variables compartidas usando la función Write Variable. La función tiene como argumentos de ingreso el valor de la variable y la ruta de las variables descritas con el formato presentado en el extracto de código 3.3.

En el paso cuatro de la Figura 3.27 se realiza la operación de control de visualización y ocultamiento de ciertos campos que no se relacionan con el modo de operación seleccionado. El objetivo de esta acción es lograr una pantalla optimizada, mostrando únicamente los parámetros necesarios para determinado modo de operación. Finalmente, en el paso cinco de la Figura 3.27 se limitan las variables en el rango de

funcionamiento establecido.

3.4.3.1. Sinóptico general

La Figura 3.28 presenta la interfaz de control general para el monitoreo de los cuatro equipos; la interfaz se conforma por seis pestañas: General, Pila H_2 , Electrolizador, Carga DC, Fuente DC e Históricos.

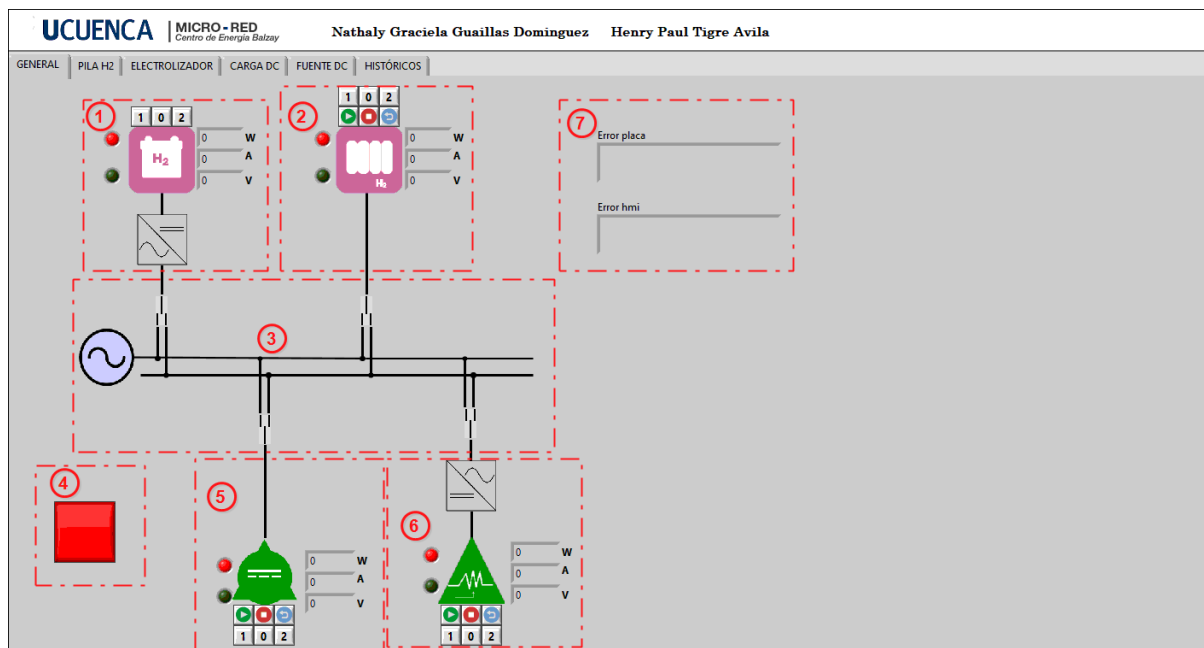


Figura 3.28: Interfaz del SCADA de control principal.

En la Figura 3.28 se observa la ventana de la pestaña general, la cual contiene información resumida de los equipos de supervisión y monitoreo. Los parámetros relevantes son: indicadores de conexión, estado activo, mediciones eléctricas y botones de inicio/detención de operaciones según corresponda. La ventana se dividió en siete bloques que se describen a continuación:

1. Pila de hidrógeno: Se conforma por el respectivo ícono, dos indicadores led, el primero de estado (verde cuando el equipo está conectado y sin error, rojo si hay error) y el segundo indicador si está operando; valores de potencia, corriente y voltaje. En la parte superior se muestran los indicadores de las barras a las que está conectado el equipo.

2. Electrolizador: Se conforma por el respectivo ícono y una información similar a la presentada en la pila. Adicionalmente, se muestran botones de inicio, detención y reinicio del equipo de forma remota, los cuales se ubican entre los indicadores de las barras y el icono del equipo.
3. Diagrama de las barras de conexión: Cada una de las líneas horizontales representa a una línea trifásica: la superior hace referencia a la conexión hacia las barras cuyo alimentador es la red eléctrica pública y la línea horizontal inferior hace referencia a una línea trifásica cuya conexión de barras indica el funcionamiento aislado interno entre equipos de la microrred. La conexión a las distintas barras se controlan por los números ubicados en la parte superior e inferior de los íconos de los dispositivos, según corresponda.
4. Botón de detención: Suspende todos los procesos de monitoreo y supervisión.
5. Fuente programable en DC: Se conforma por el respectivo ícono, variables eléctricas, botones de control, estado de conexión, estado de ejecución y botones de barras.
6. Carga programable en DC: Contiene el ícono respectivo, botones de control, variables eléctricas, estados de conexión/ejecución y botones de las barras.
7. Indicadores de errores: Indican los errores que se pueden producir en el PAC y el HMI. Los campos se ocultan en el caso de no existir error, caso contrario serán visibles con la descripción del error pertinente.

Para mayor detalle de algún equipo se debe ir a la pestaña respectiva y al pulsar en cualquiera de ellos se desplegará una pantalla con la información detallada de cada dispositivo.

3.4.3.2. Pila de hidrógeno

En la Figura 3.29 se visualiza la pestaña de la pila de hidrógeno con información detallada de las variables de medición del equipo. La ventana se conforma por:

- Presentación numérica de datos: El bloque se conforma por 4 partes: En uno se presenta el estado actual de la pila (estado de ejecución y errores) y un in-

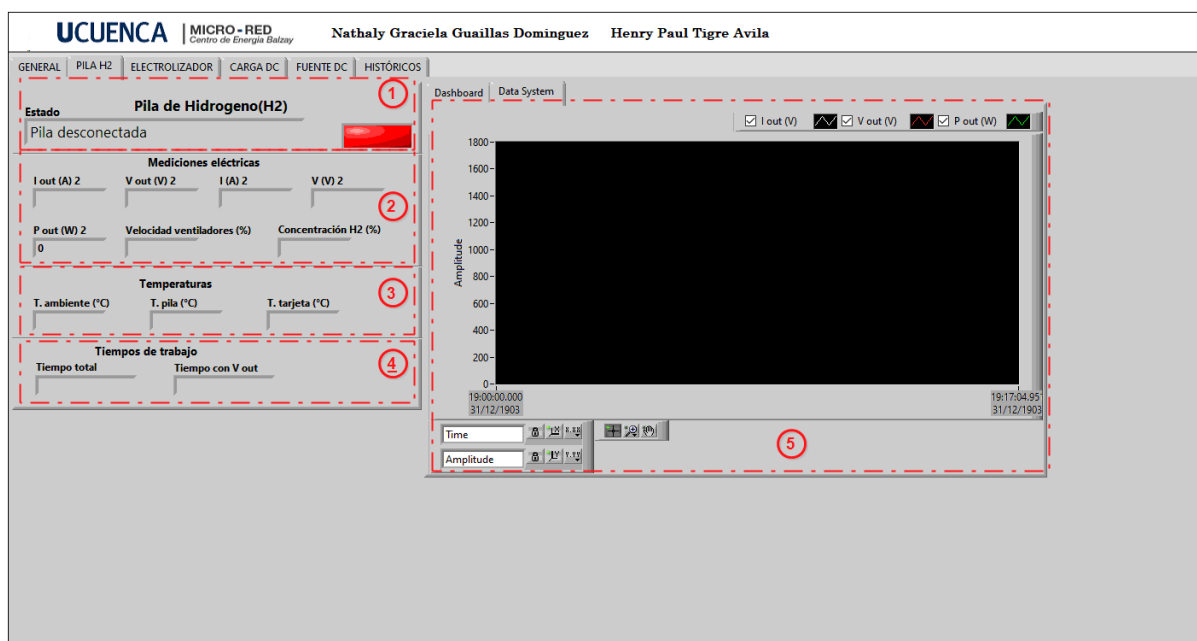


Figura 3.29: Panel de la pila de hidrógeno en el sistema SCADA 1/2.

dicador led que está en rojo cuando el equipo esta desconectado o hay algún error y verde cuando la pila opera correctamente. En el fragmento dos se presentan los valores de corriente, potencia, voltaje, concentración de hidrógeno y velocidad de ventiladores en tiempo real. En el fragmento tres se presentan los valores de la temperatura medidos en el equipo. Por otro lado, en el fragmento cuatro se tienen los campos de tiempos de operación del equipo, tanto el total de operación como el tiempo con salida de voltaje en los terminales.

- Comportamiento gráfico de variables eléctricas: En el bloque cinco se despliega la pestaña Data System, en el cual se muestra el comportamiento en tiempo real de la corriente, voltaje y potencia de salida de la pila de hidrógeno.
- Dashboard: En el bloque seis de la Figura 3.30 se presenta la última pestaña para la pila de hidrógeno; aquí se observan indicadores gráficos (tacómetros) para los valores de temperatura, velocidad de ventiladores y concentración de hidrógeno. El panel tiene como objetivo brindar una noción más clara de los rangos seguros de las variables para cambiar de configuración o modificar ciertas características del equipo.



Figura 3.30: Panel de la pila de hidrógeno en el sistema SCADA 2/2.

3.4.3.3. Electrolizador

En la Figura 3.31 se muestra la pestaña del electrolizador, que al igual que la pila de hidrógeno tiene un interfaz similar, en la parte izquierda de la interfaz se encuentran los campos que se actualizan en tiempo real y en la derecha se tienen ventanas para las gráficas de varias variables a través del tiempo y el tablero visual.

La pestaña se conforma por 16 bloques, los primeros 11 bloques se muestran en la Figura 3.31, mientras que los 5 bloques restantes que pertenecen al dashboard se muestran en la Figura 3.32. El detalle de cada bloque se muestra a continuación:

1. Estado, subestado e indicador led del comportamiento del electrolizador. El led estará en verde cuando haya conexión sin errores y rojo cuando haya algún comportamiento inusual.
2. Campos para la visualización en tiempo real de los valores eléctricos del electrolizador.
3. Mediciones relacionadas con el hidrógeno como el flujo, total almacenado y presión de salida.
4. Número total de los stacks instalados y cuántos de ellos están activos.

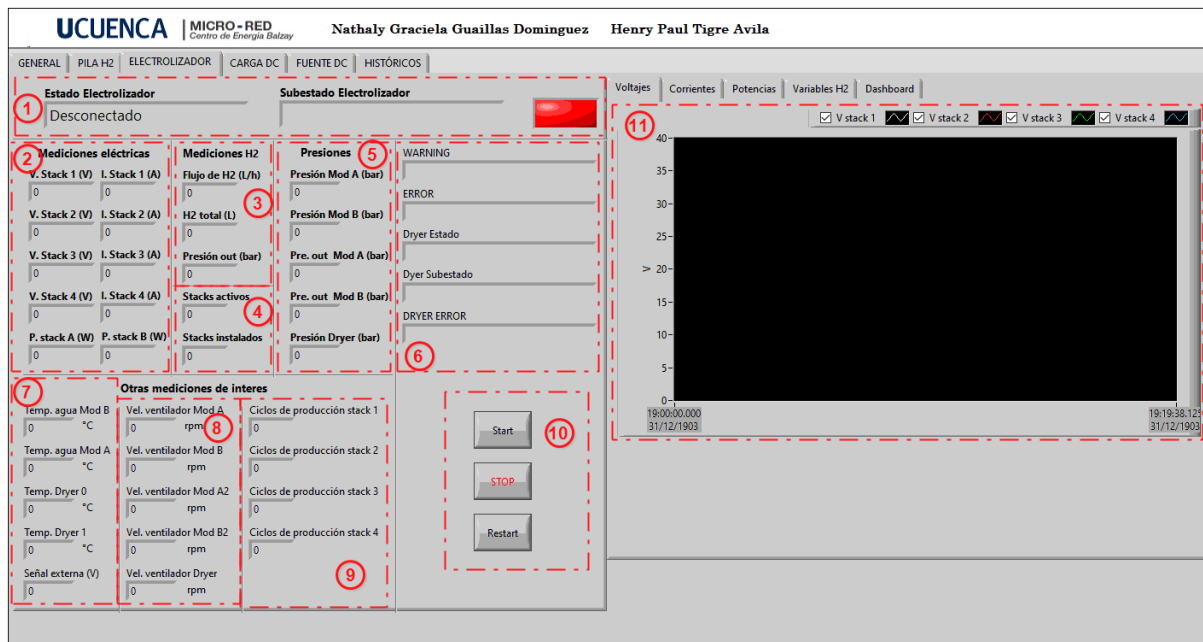


Figura 3.31: Panel del electrolizador en el sistema SCADA 1/2.

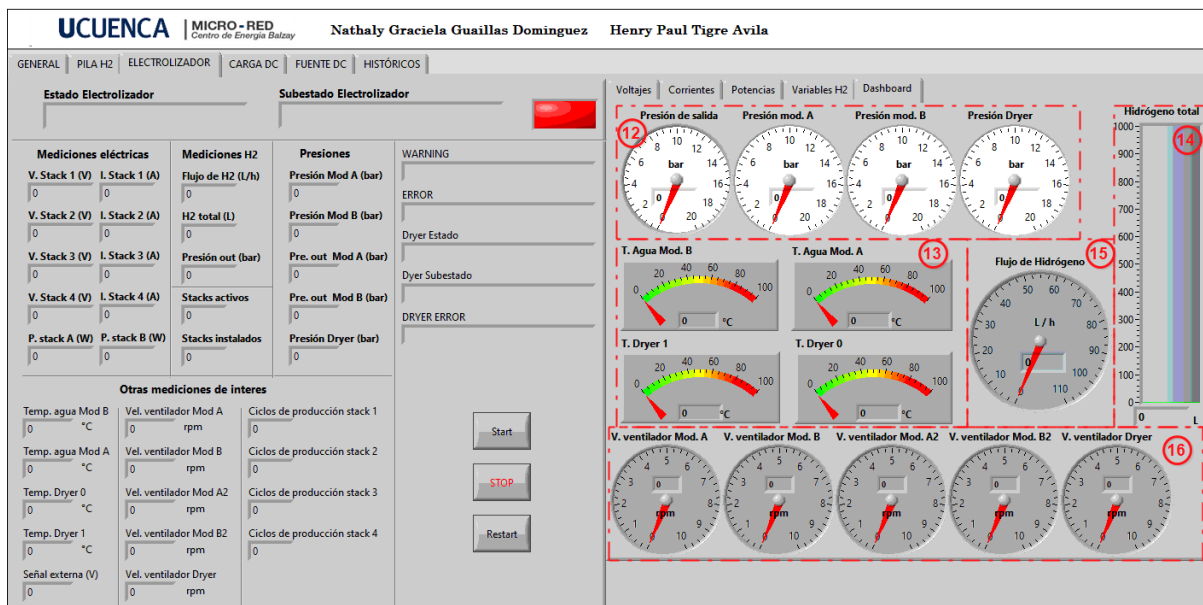


Figura 3.32: Panel del electrolizador en el sistema SCADA 2/2.

5. Valores de presiones de los módulos
6. Estado del dryer y detalla de errores si existen.
7. Valores de temperatura medidos en el equipo
8. Velocidades de los ventiladores de los módulos en el equipo

9. Número de ciclos de producción de cada uno de los stacks.
10. Botones de control del dispositivo; el primero permite iniciar la producción, el segundo botón detiene la producción y el tercero reinicia el equipo.
11. Las cuatro primeras pestañas que se encuentran sobre el área de visualización contienen variables que se grafican en tiempo real. De forma general, incluyen el comportamiento del voltaje de los stacks en el tiempo; comportamiento de las corrientes, potencias y variables de hidrógeno.
12. Indicadores de valores de presión
13. Indicadores de los valores de temperatura
14. Indicador del total de hidrógeno
15. Indicador del flujo total de hidrógeno por hora
16. Tacómetros de la velocidad de los ventiladores del equipo.

3.4.3.4. Carga programable

La interfaz de la carga programable DC consta de información del estado del equipo, mediciones realizadas y parámetros de configuración.

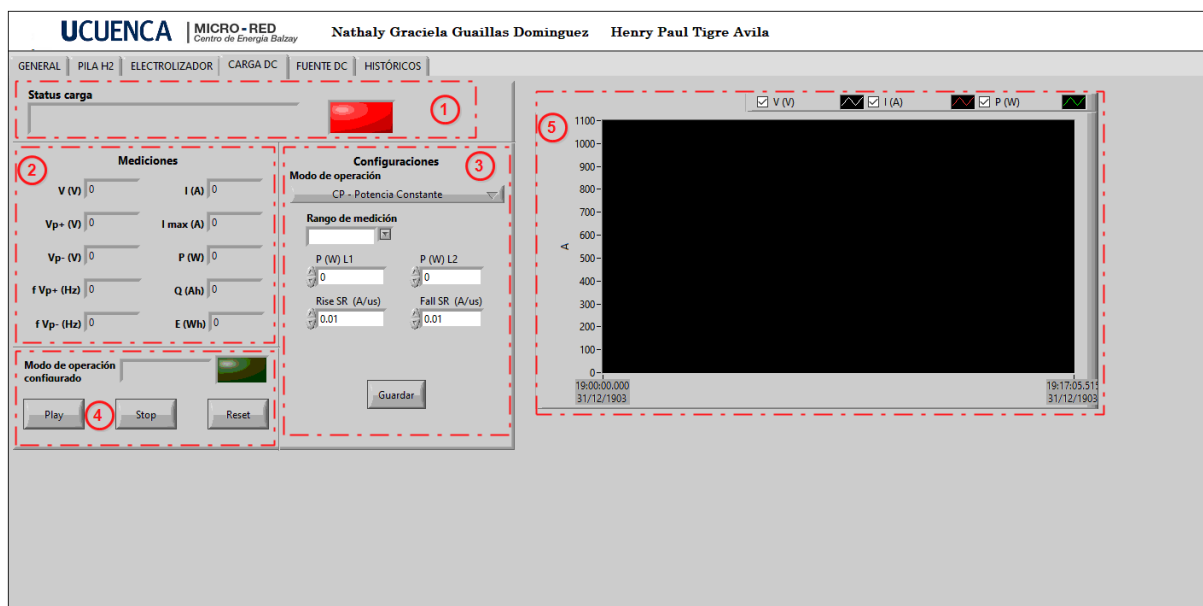


Figura 3.33: Panel de la carga programable en el sistema SCADA.

En la Figura 3.33 se observan los 5 bloques que conforman la ventana y se detallan a continuación:

1. Estado de la carga e indicador led que si hay funcionamiento correcto estará en verde, caso contrario estará en rojo.
2. Variables medidas en tiempo real del equipo, primero se presentan valores de corriente y voltaje mientras que luego se colocan valores complementarios que ayudan al monitoreo del dispositivo.
3. Campos para el ingreso de los valores para la configuración de los distintos modos de operación descritos en el apartado 3.2.3; estos se ocultaran o se harán visibles según el modo de operación elegido.
4. Indicadores del modo de operación en ejecución y los botones para iniciar, parar y reiniciar la operación del equipo.
5. Comportamiento en el tiempo de las tres principales variables eléctricas medidas dentro del equipo (voltaje, corriente, potencia)

3.4.3.5. Fuente programable

La fuente programable al tener el mismo fabricante que la carga tiene similitud en los procesos que maneja; por lo tanto se ha planteado un interfaz similar a la carga.

En la Figura 3.34 se muestran los cinco bloques que conforman la ventana y se describen a continuación:

- Campo que describe el estado de la fuente e indicador led que complementa la información del estado, en donde verde denotará normal funcionamiento y rojo errores.
- Variables medidas en tiempo real del equipo, primero se ubican valores de corriente/voltaje y después se colocan valores complementarios de límites de funcionamiento. Esto proporciona una noción clara de los rangos normales de operación.
- Bloque de configuraciones para los distintos modos de operación y subprogra-

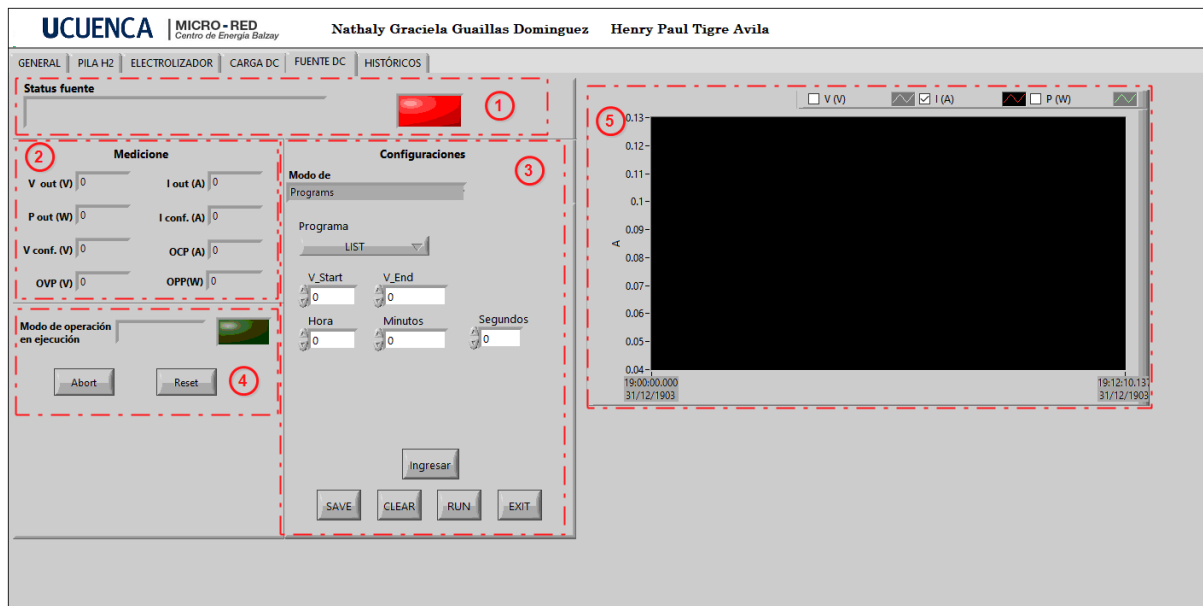


Figura 3.34: Panel de la fuente programable en el sistema SCADA.

mas descritos en el apartado 3.2.4; en la parte superior se elige el modo de operación y luego el subprograma con sus debidos parámetros que se ocultan y se hacen visibles acorde al subprograma y modo de operación seleccionado.

- Indicadores del modo de operación en ejecución y los botones para iniciar, parar y reiniciar la ejecución del equipo.
- Representación gráfica del comportamiento en el tiempo de las tres principales variables eléctricas medidas dentro del equipo.

Resultados

La corroboración del correcto funcionamiento del sistema desarrollado se lo aborda en distintas secciones, con pruebas tanto objetivas como subjetivas, que demuestran el correcto funcionamiento del sistema SCADA en sus distintos niveles. El presente capítulo presenta en la sección 4.1 las imágenes de las pruebas realizadas en cada uno de los equipos, tanto en supervisión como en configuración de modos de operación, en el caso de ser posible. En la sección 4.2 se muestra los intervalos de confianza del tiempo de procesamiento de cada bucle dedicado a cada equipo, tanto en el PAC como en el HMI. Finalmente en la sección 4.3 se muestran los resultados de la encuesta realizada a los estudiantes de los últimos niveles de la Facultad de Ingeniería, quienes validan subjetivamente el sistema en base a un vídeo demostrativo.

4.1. Pruebas de funcionamiento del sistema SCADA

En esta sección se evalúa el funcionamiento del sistema frente a diferentes escenarios de operación para cada uno de los equipos, y así demostrar el correcto desempeño del SCADA. Las pruebas de desempeño realizadas se detallan en las siguientes subsecciones, las cuales se nombraron en función a las pestañas que conforman la interfaz del sistema.

4.1.1. Sinóptico General

Para validar los cambios de estado de conexión y operación dentro de la pestaña General, se conectó en conjunto la pila de hidrógeno (Eq.1) con el electrolizador (Eq.2) y la carga en DC(Eq.4), mientras que la fuente en DC (Eq.3) se conectó con los terminales de salida sin carga.

Las pruebas se realizaron bajo los escenarios descritos en la Tabla 4.1 en base a lo descrito en el apartado 3.4.3.1. El detalle se presenta a continuación:

- En la Figura 4.1 se visualiza que todos los equipos están conectados (led de estado en verde). Por otra parte, la pila de hidrógeno, electrolizador y la carga programable en DC están en ejecución (led de ejecución en verde), mientras que

Tabla 4.1: Escenarios de prueba para estados de funcionamiento y conexión.

		Escenario											
		1				2				3			
		Equipos				Equipos				Equipos			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Estado	Conectado	x	x	x	x	x		x	x		x		
	Desconectado									x		x	x
	Error						x						
Operación	Operativo	x	x		x	x			x				
	No operativo			x			x	x		x	x	x	x

la fuente programable en DC no se ejecutó. Del mismo modo, a la derecha de cada ícono se presenta la información de las principales magnitudes eléctricas respectivas.

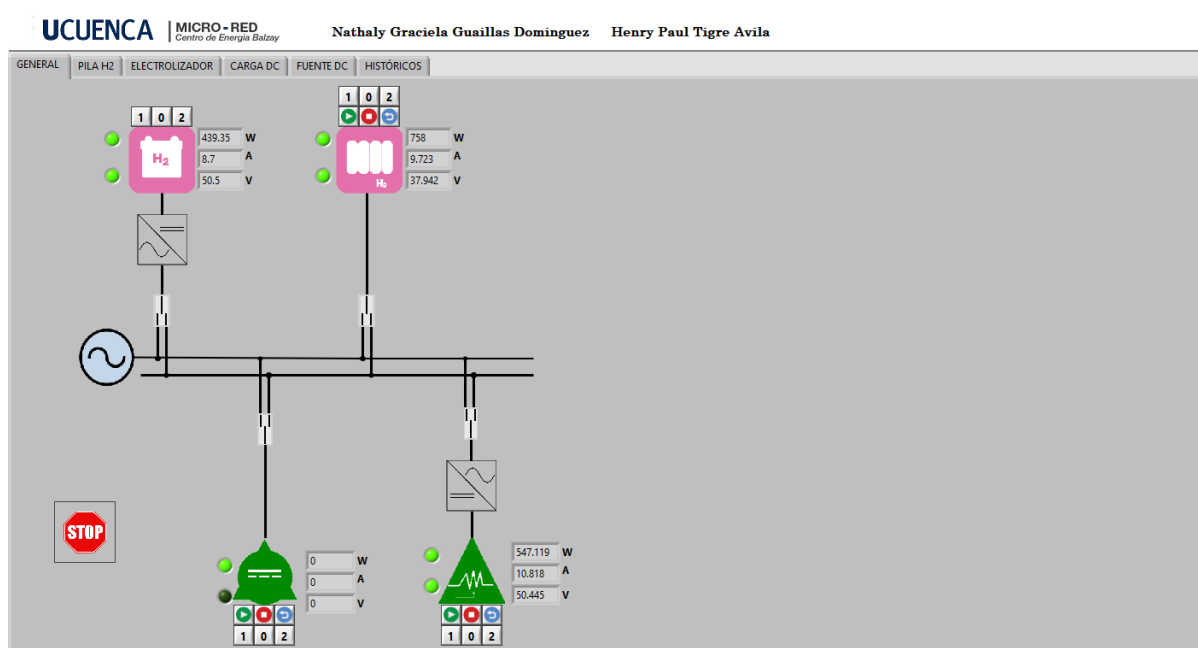


Figura 4.1: Panel general en el sistema SCADA, con todo conectado.

- En la Figura 4.2 se observa el estado anormal dentro del electrolizador (led de estado en rojo) por la alteración del sensor de presión, esto detiene la generación de hidrógeno y mantiene el estado de error hasta reiniciar el electrolizador.
- En la Figura 4.3 se observa que el electrolizador se encuentra conectado pero inoperativo, mientras que los demás equipos están desconectados. Del mismo modo, en el campo de error de la placa se indica que no se puede tener acceso

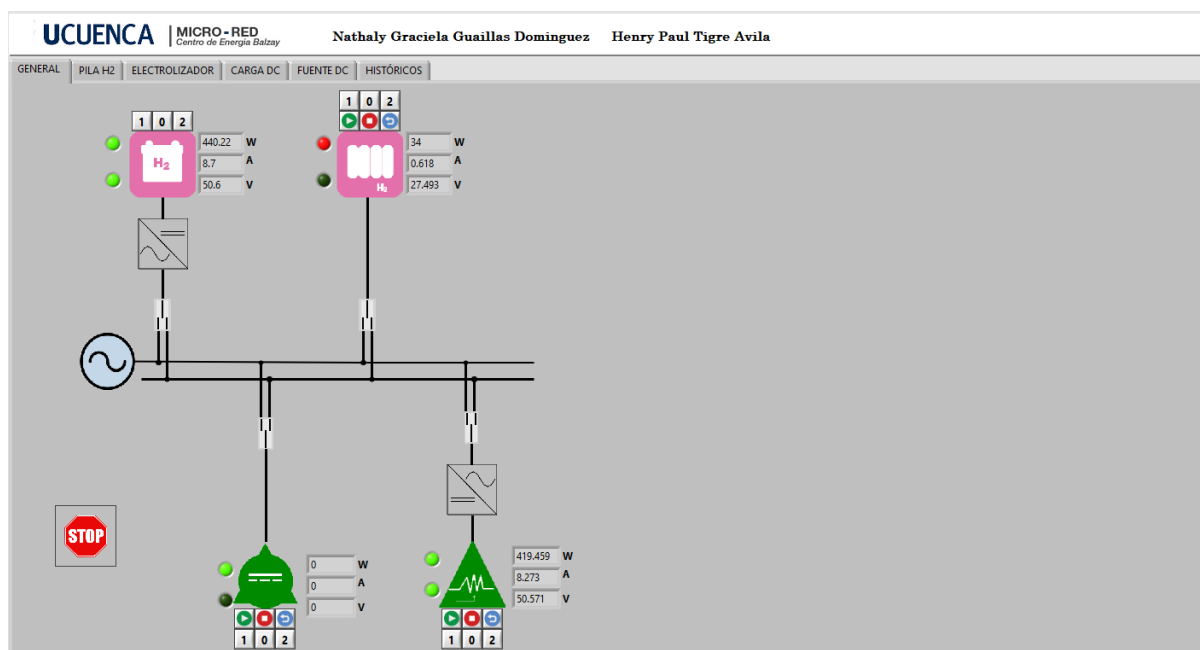


Figura 4.2: Panel general en el sistema SCADA, con electrolizador en error.

a determinados equipos.

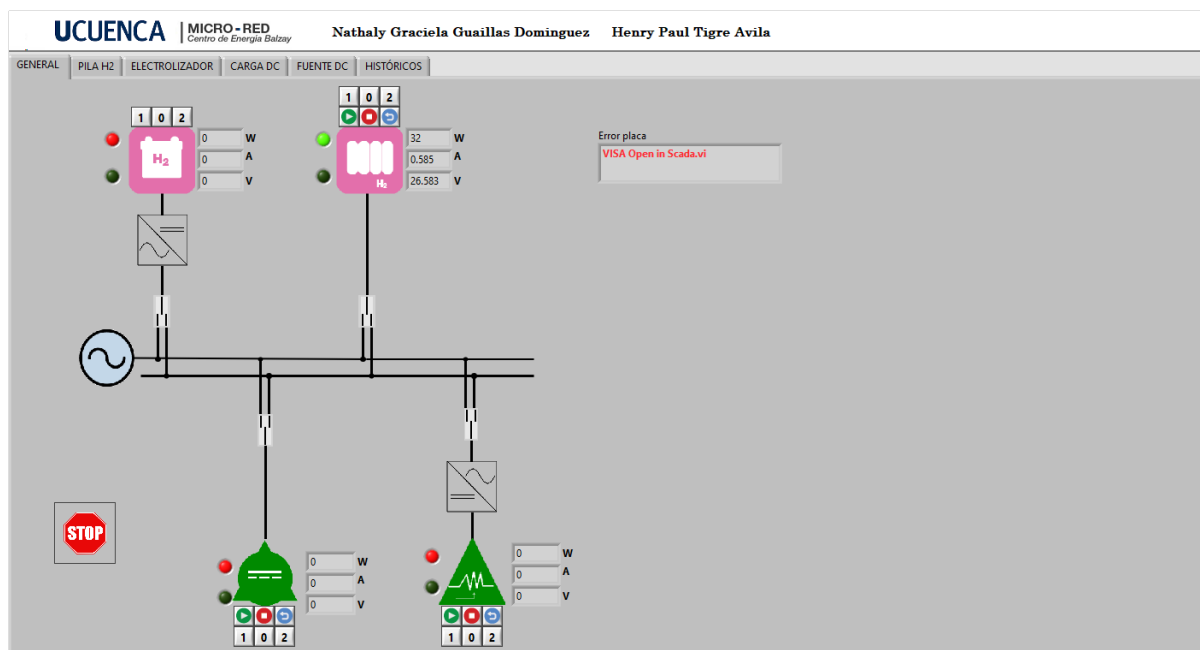


Figura 4.3: Panel general en el sistema SCADA, solo con el electrolizador conectado.

4.1.2. Pila de hidrógeno

Se realizó la monitorización de datos relevantes y la visualización de curvas de interés. Dentro del panel se emplean distintos campos agrupados en función del tipo de variable.

4.1.2.1. Estados de operación y comportamiento en el tiempo

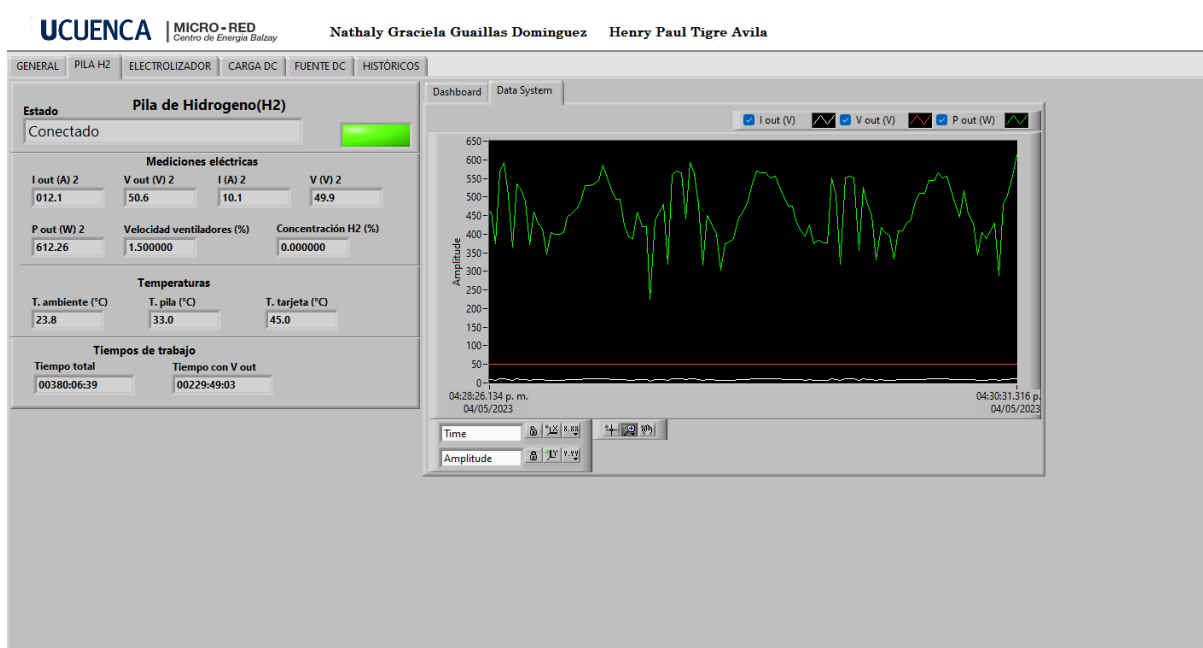


Figura 4.4: Panel de la pila de hidrógeno con comportamiento normal.

La Figura 4.4 presenta la supervisión de la pila de hidrógeno en tiempo real. En la parte izquierda del panel se monitoriza los valores eléctricos y de temperatura instantáneos, mientras que a la derecha del panel se presenta el comportamiento en el tiempo de las variables eléctricas. En la Figura 4.5, dentro del estado del equipo se muestra que existe error en la presión del equipo, por lo tanto el led cambia a rojo; sin embargo, se sigue obteniendo información de las variables, pero no se podrá obtener potencia del equipo hasta que se solucione el error.



Figura 4.5: Panel de la pila de hidrógeno con error en su operación



Figura 4.6: Panel de dashboard de la pila de hidrógeno.

4.1.2.2. Dashboard

Los valores en tiempo real de la temperatura, velocidad de ventiladores y concentración de hidrógeno se pueden ver mediante tacómetros en el dashboard de las Figuras 4.6 y 4.5; estos permiten al supervisor tener una visión clara de los diferentes límites

de operación de la pila. Por ejemplo, en la Figura 4.6 se muestra que la pila opera dentro de los rangos normales, por lo que no se debe hacer ningún cambio relevante en la configuración del equipo.

4.1.3. Electrolizador

El electrolizador entrega los datos mediante registros Modbus y permite el uso de coils para controlar al equipo. Por lo tanto, se usan botones que al ser pulsados envían las órdenes respectivas al equipo.

4.1.3.1. Estados de operación y comportamiento en el tiempo

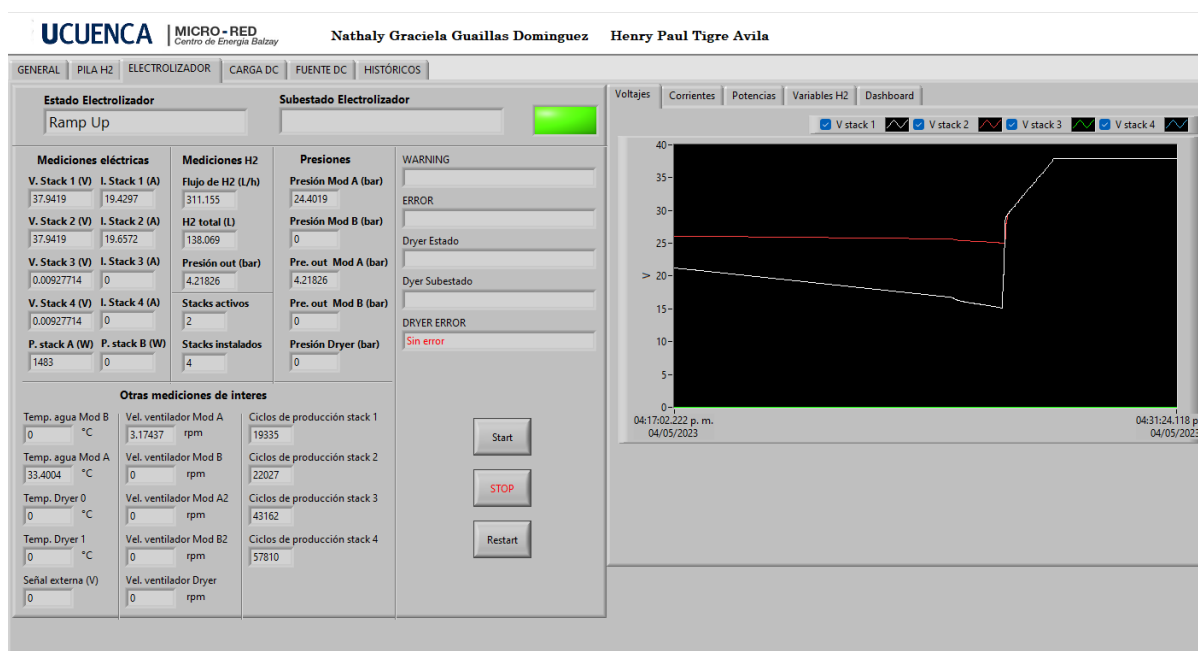


Figura 4.7: Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de voltaje respecto al tiempo.

Desde la Figura 4.7 hasta la Figura 4.10, a la izquierda se tiene el comportamiento en tiempo real de distintas variables del electrolizador, agrupadas según el tipo y función de las mismas; a la derecha en las distintas pestañas se observa el comportamiento de voltaje, corriente y potencia de los stacks respecto al tiempo; como complemento se observan las distintas variables de supervisión de hidrógeno como flujo, presión e hidrógeno total. Mientras que en la Figura 4.11 en el campo de estatus se indica que

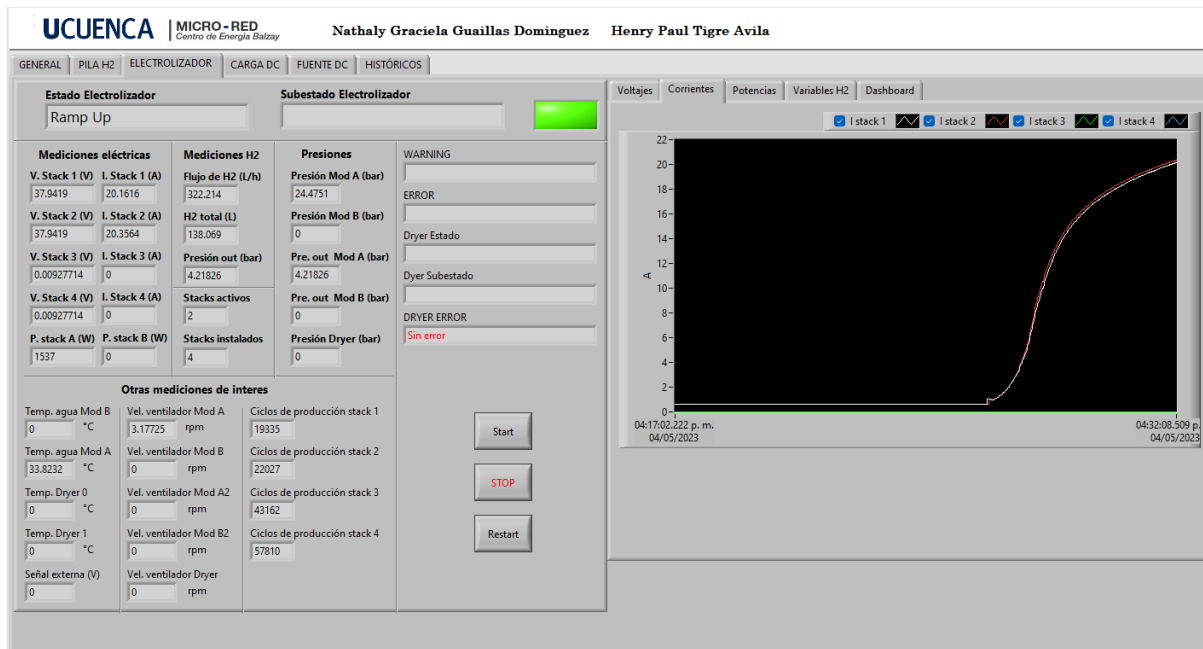


Figura 4.8: Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de corriente respecto al tiempo.

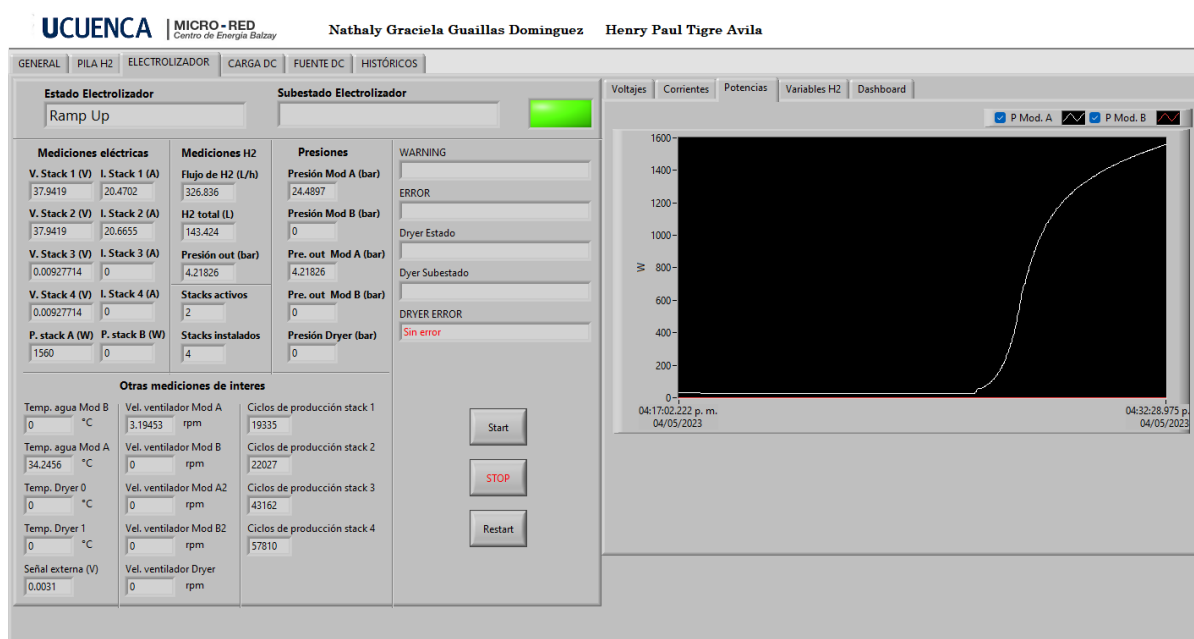


Figura 4.9: Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de potencia respecto al tiempo.

el equipo presenta un error, el led cambia a rojo y el espacio respectivo describe el error. En la gráfica de potencia de la Figura 4.11 se puede ver que el equipo detuvo inmediatamente la producción hasta solucionar dicho error.

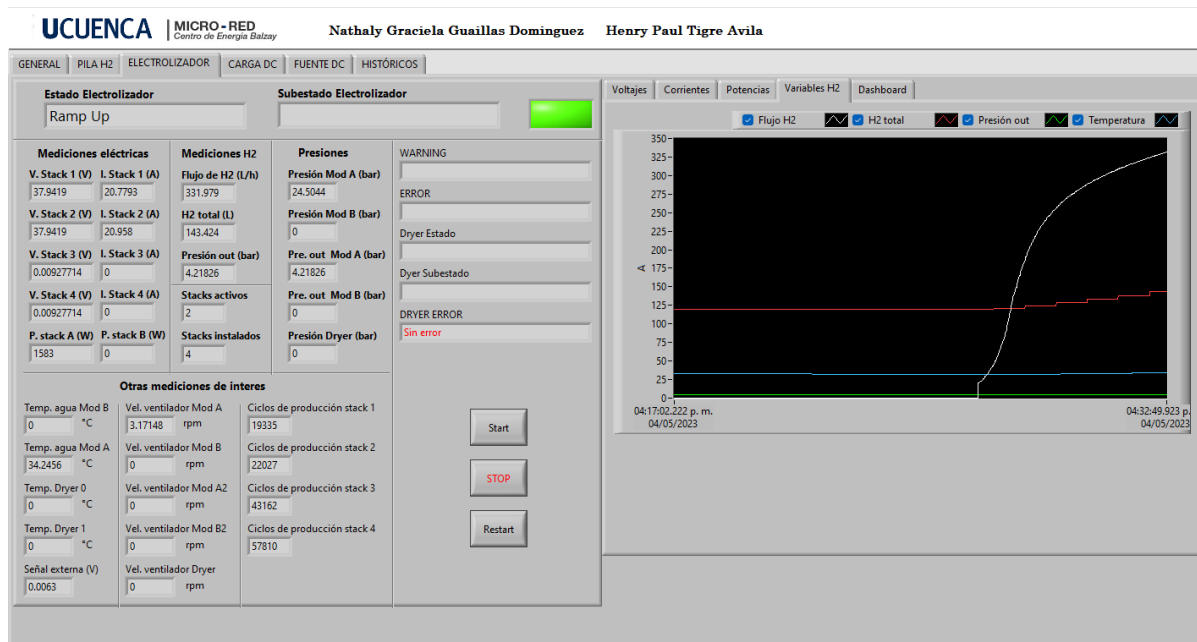


Figura 4.10: Panel del electrolizador en funcionamiento normal y comportamiento de las variables del hidrógeno respecto al tiempo.

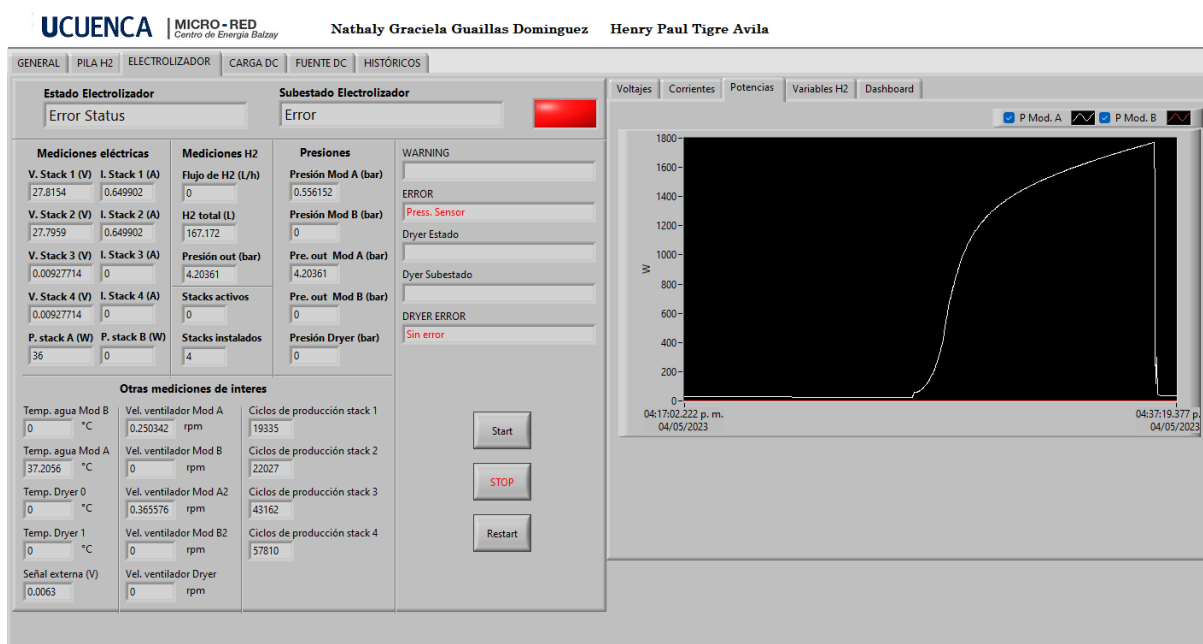


Figura 4.11: Panel del electrolizador con error en su funcionamiento.

4.1.3.2. Dashboard

En la Figura 4.12 se presenta, los mismos datos medidos en tiempo real vistos en la sección anterior pero a través de tacómetros e indicadores para una visualización interactiva de los límites normales de operación, así como estados irregulares del

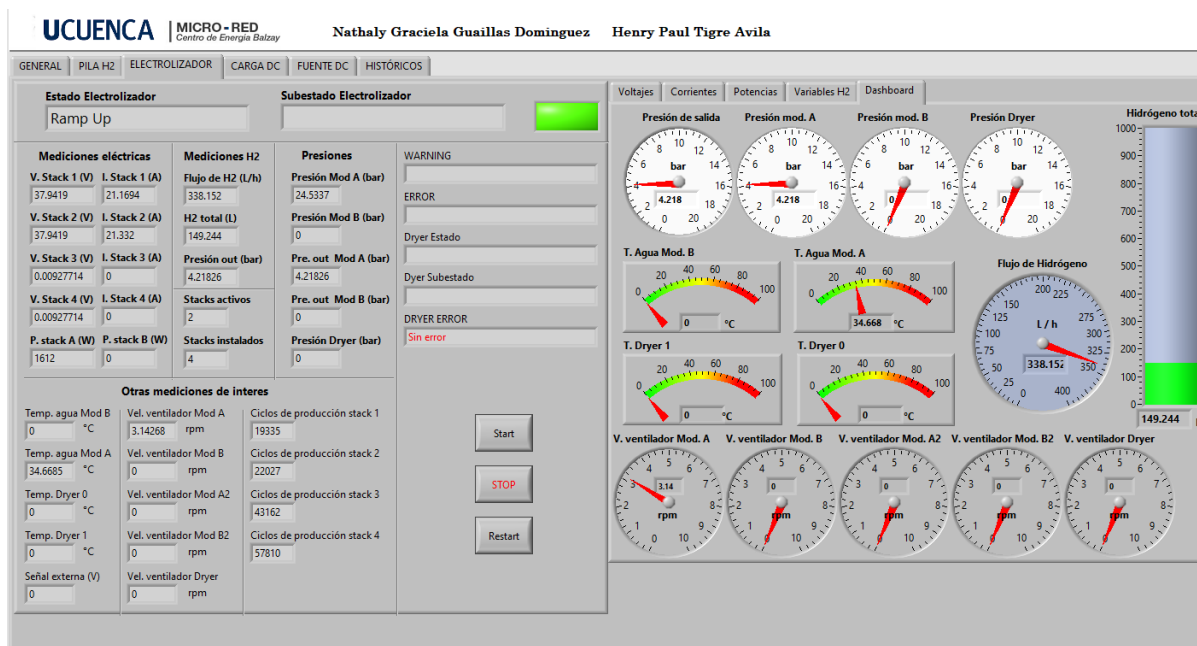


Figura 4.12: Dashboard del electrolizador.

electrolizador.

4.1.4. Carga programable DC

La carga programable en DC permite supervisión y control de forma remota, los resultados se enfocan en la monitorización y configuración del equipo. Los escenarios de prueba para la carga son:

- Modo CR, CV y CC: Conexión directa del equipo a la fuente programable DC.
- Modo CRD, CCD, SWD: Conexión directa del equipo a la pila de hidrógeno en paralelo con una configuración de baterías en serie para adaptar el flujo de corriente acorde a la carga.

4.1.4.1. Pruebas de configuración de modos de operación

La Figura 4.13 muestra que se realizó una configuración previa a la ejecución del sistema de monitoreo, por lo cual se presenta las mediciones en tiempo real de las variables eléctricas y el modo de operación configurado. A la derecha de la imagen se puede ver el comportamiento en el tiempo de las variables eléctricas, viendo que

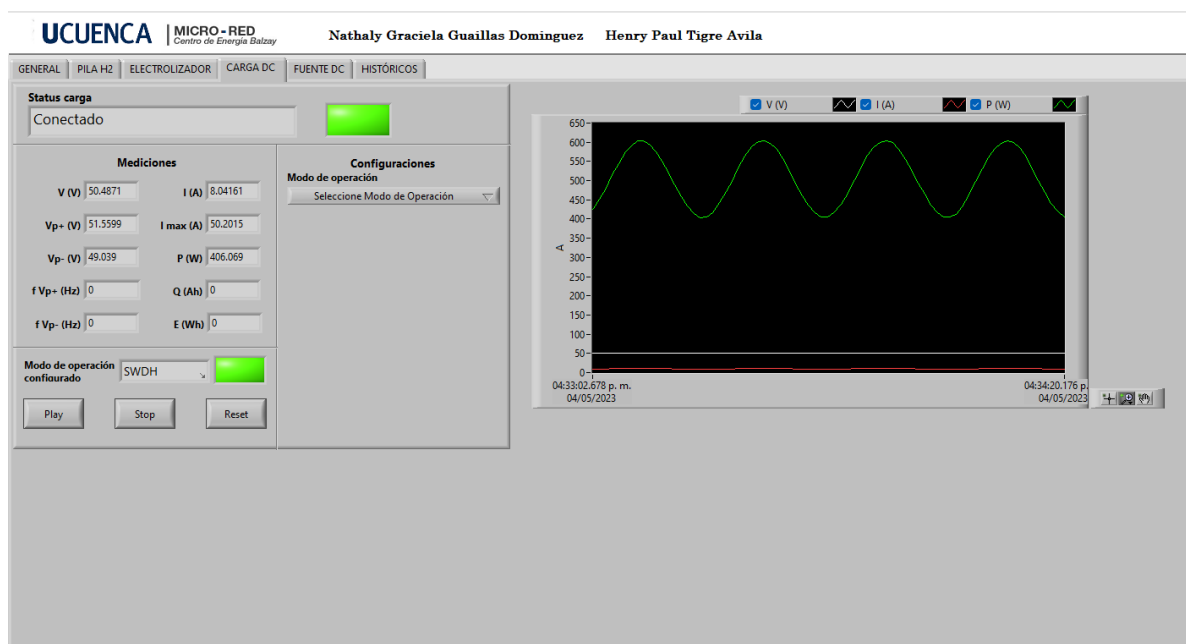


Figura 4.13: Panel de la carga programable de supervisión del modo SWD.

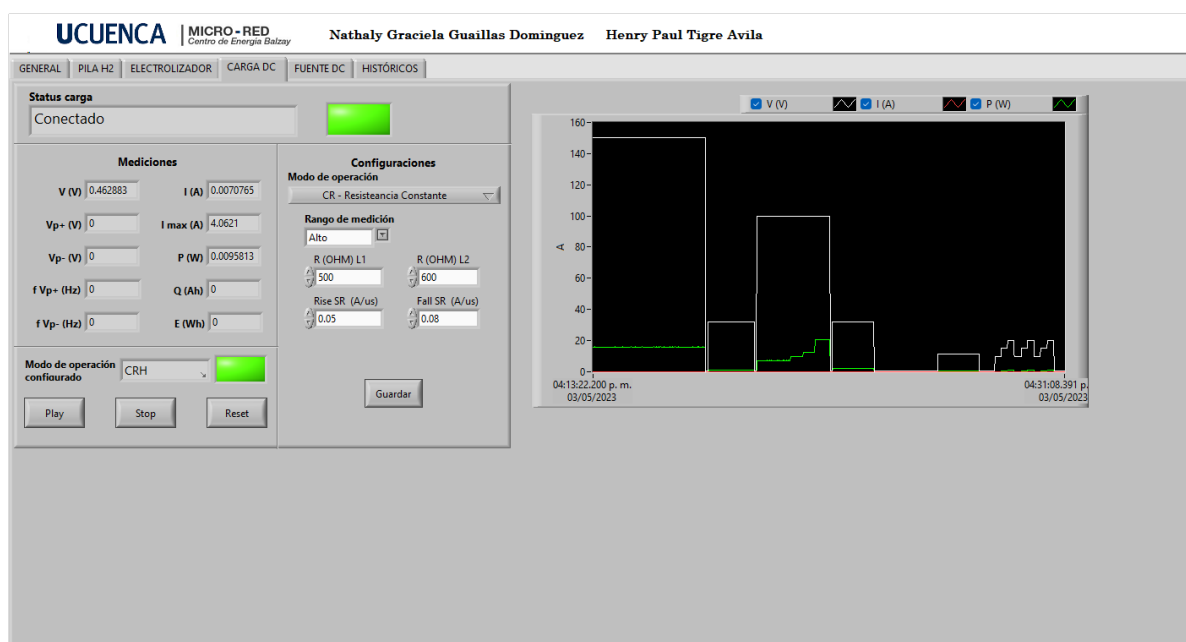


Figura 4.14: Panel de la carga programable en supervisión del modo CR.

perfectamente se dibuja una señal senoidal. En la Figura 4.14 se configuró a la carga como una resistencia constante para pruebas en conjunto con la fuente programable DC, por lo que la potencia, voltaje y corriente varían en función al modo de configuración de la fuente.

Desde la Figura 4.15 hasta la Figura 4.18 se presentan los modos de operación configurados, las mediciones en tiempo real concuerdan con los datos ingre-

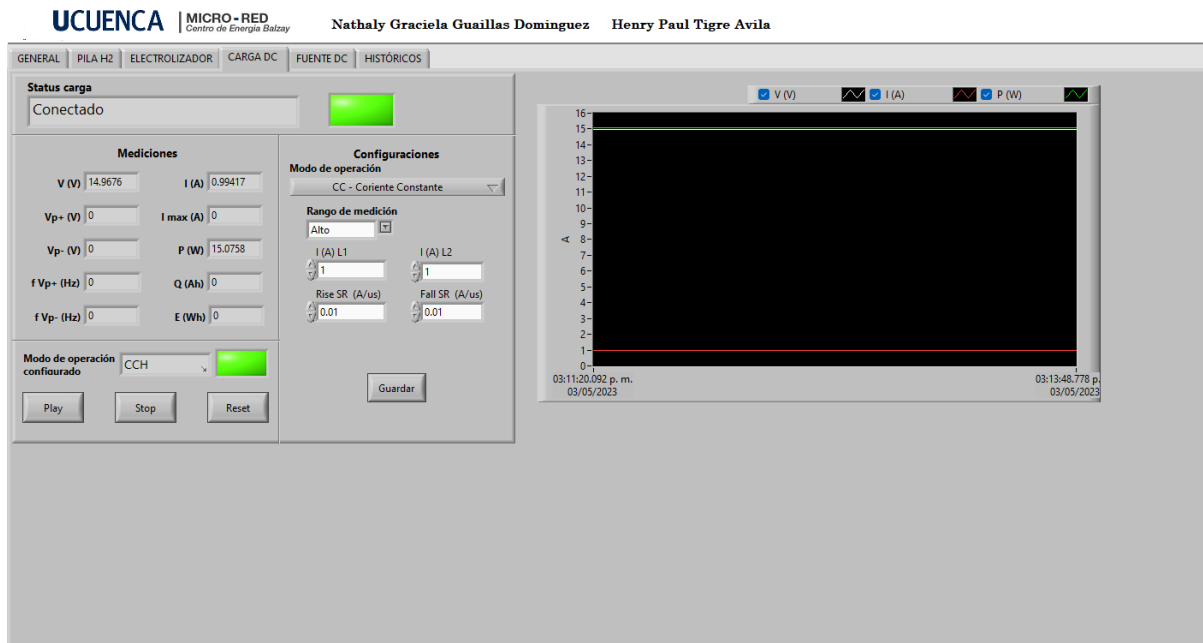


Figura 4.15: Panel de la carga programable en configuración del modo CC.

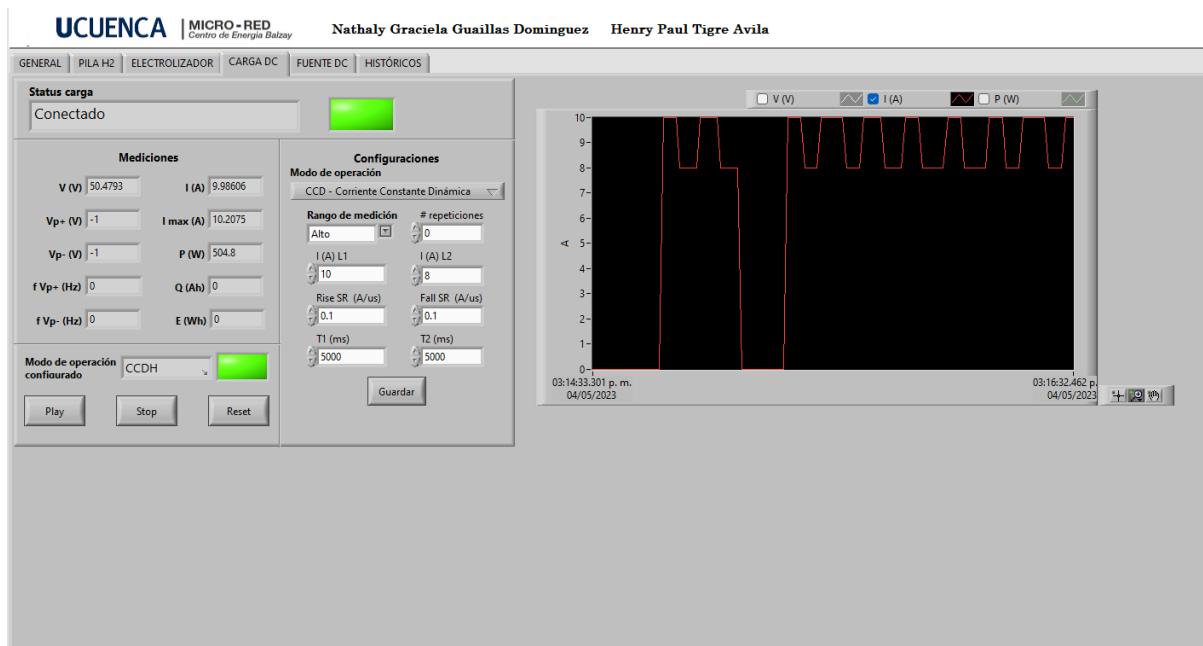


Figura 4.16: Panel de la carga programable en configuración del modo CCD.

sados. Cabe mencionar que el campo del modo de operación en ejecución concuerda con el modo ingresado desde el HMI.

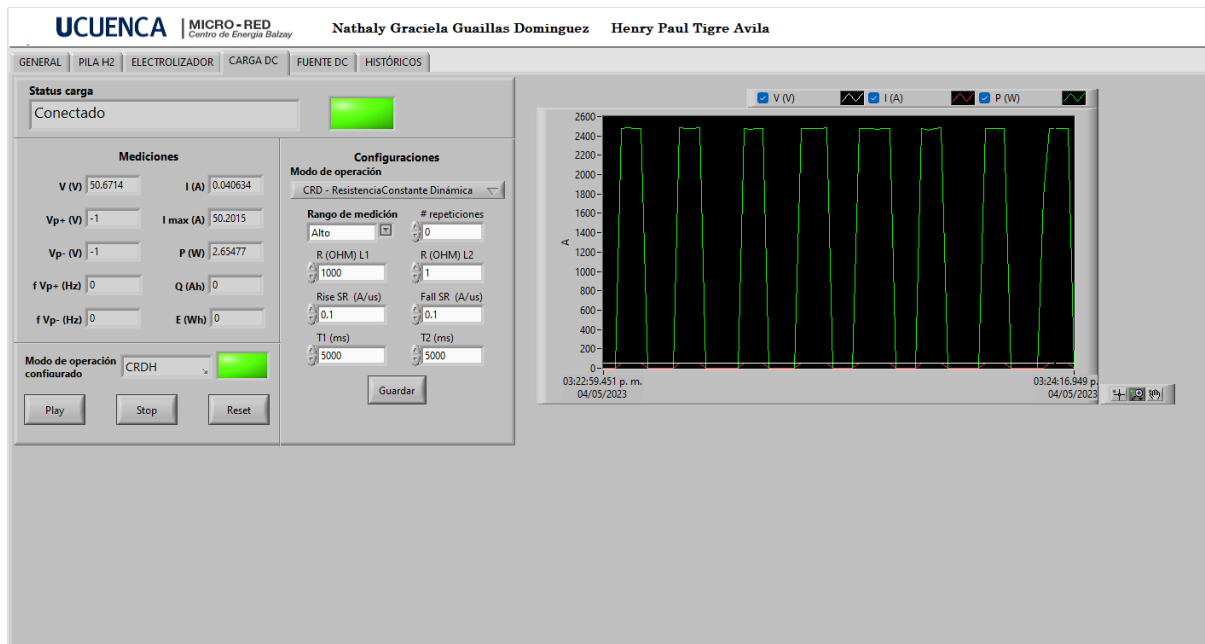


Figura 4.17: Panel de la carga programable en configuración del modo CRD.

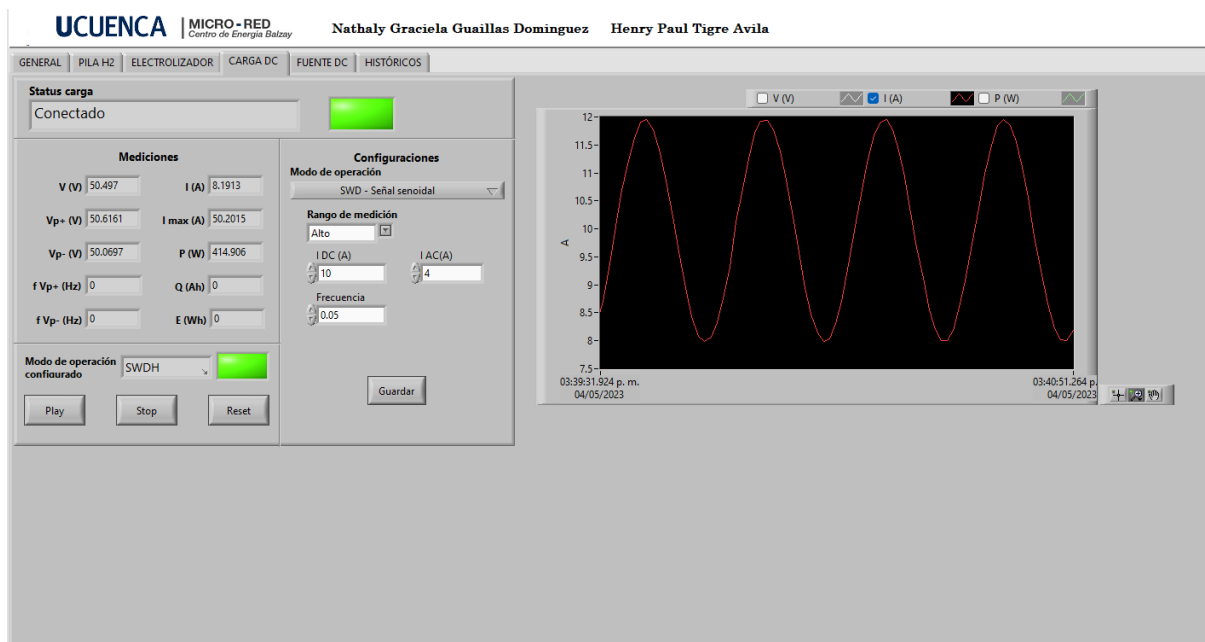


Figura 4.18: Panel de la carga programable en configuración del modo SWD.

4.1.5. Fuente programable DC

Para el caso de la fuente programable en DC se realizaron pruebas bajo los siguientes escenarios:

- Programa en modo Lista y modo Step: Configuración del equipo sin conexión externa a los terminales de salida.
- Modo de salida SANDIA y Tabla: Configuración del equipo con conexión externa de los terminales de salida a la Carga Programable en DC operando en modo de resistencia constante.

4.1.5.1. Pruebas de configuración para modos de operación

En la Figura 4.19 se observa la configuración y visualización de curvas en modo Lista según los datos de la Tabla 4.2. De manera gráfica se visualiza la variación de voltaje, corriente y potencia respecto al tiempo para el programa con las secuencias configuradas.

Tabla 4.2: Parámetros ingresados en Modo List.

Programa	Estructura	Parámetro		Ajuste	
List Mode	Programa	Trig Pull		Low	
		Repeticiones		Infinito(0)	
		N°	1	2	3
	Secuencias	Tipo	Auto	Auto	Auto
		Tiempo	15s	15s	15s
		V	10V	15V	20V
		V S.R	0.01 V/s	0.01 V/s	0.01 V/s
		I	2A	2A	2A
		I S.R	0.003 A/s	0.003 A/s	0.003 A/s

Para validar que los voltajes ingresados en las secuencias del programa mantienen la duración configurada se procedió a analizar una repetición del programa, obteniendo los datos de la Tabla 4.3. Como resultado:

- Secuencia 3: el voltaje de inicio es de 15,0284 V perteneciente al último valor de la repetición anterior del programa en el tiempo 15:21:56.5 permaneciendo 14.7s en 20V con un rango de variación despreciable.
- Secuencia 1: el voltaje de inicio es de 20,035 V perteneciente al último valor de la secuencia anterior en el tiempo 15:22:11.2 permaneciendo 14.8s en 15V con un rango de variación despreciable.
- Secuencia 3: el voltaje de inicio es de 10,0316 V perteneciente al último valor de

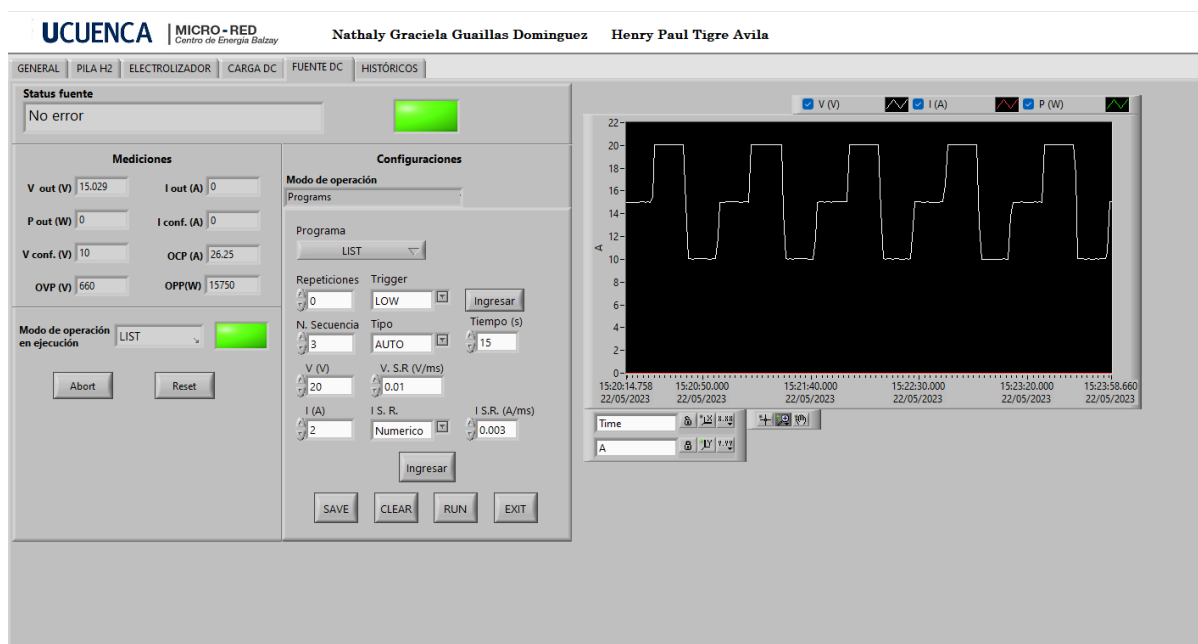


Figura 4.19: Modo de salida: Modo List.

la secuencia anterior en el tiempo 15:22:26.0 permaneciendo 14.9s en 10V con un rango de variación despreciable.

Tabla 4.3: Voltajes y Marcas de tiempo en Modo List.

Secuencias					
3		1		2	
Marca (mm:ss)	Voltaje (V)	Marca (mm:ss)	Voltaje (V)	Marca (mm:ss)	Voltaje (V)
21:56.5	15,0284	22:11.2	20,0350	22:26.0	10,0316
21:57.6	20,0373	22:12.3	14,3110	22:27.0	12,8886
21:58.7	20,0364	22:13.3	10,0310	22:28.0	15,0281
21:59.8	20,0358	22:14.4	10,0305	22:29.1	15,0284
22:00.8	20,0361	22:15.5	10,0307	22:30.2	15,0273
22:01.8	20,0364	22:16.5	10,0307	22:31.2	15,0267
22:02.9	20,0370	22:17.6	10,0290	22:32.4	15,0270
22:04.0	20,0361	22:18.8	10,0310	22:33.8	15,0284
22:05.0	20,0350	22:19.8	10,0313	22:34.8	15,0264
22:06.1	20,0373	22:20.8	10,0290	22:35.8	15,0261
22:07.2	20,0361	22:21.9	10,0299	22:36.8	15,0264
22:08.2	20,0361	22:22.9	10,0302	22:37.8	15,0270
22:09.2	20,0361	22:23.9	10,0307	22:38.8	15,0259
22:10.2	20,0353	22:24.9	10,0305	22:39.8	15,0279
22:11.2	20,0350	22:26.0	10,0316	22:40.9	15,0284

En el caso del programa en modo STEP se observa en la Figura 4.20 la configuración

realizada con un voltaje inicial en 0 y final en 15 V, con duración de 15 segundos. Finalizada la ejecución, el modo cambia a CV/CC para mantener la salida en 15 V. En el panel de gráficos, se puede observar la variación del voltaje en función del tiempo, mientras que la corriente y la potencia permanecen en cero durante todo el proceso debido a que no se ha configurado ningún valor de corriente.

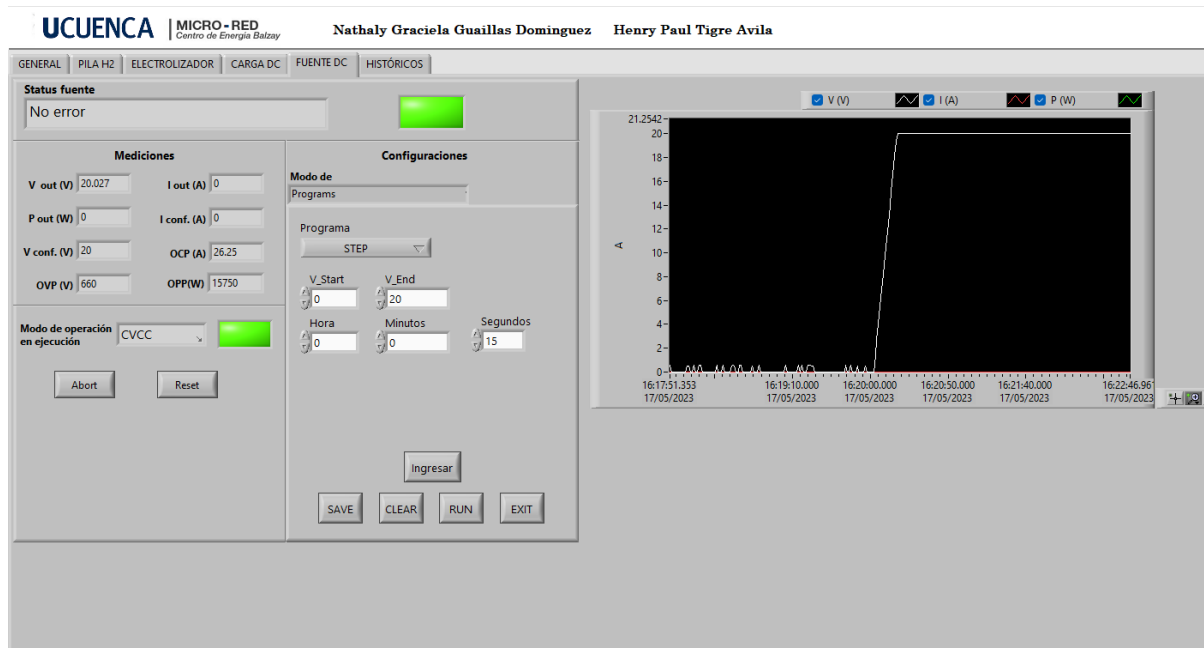


Figura 4.20: Modo de programa: Modo STEP.

Para validar la variación de voltaje en el tiempo configurado, se procedió a analizar las marcas de tiempo y voltajes respectivos, obteniendo los datos de la Tabla 4.4. De esta forma, se verifica que la duración fue de 15.5 segundos, por lo cual en el tiempo de respuesta se tiene una variación de 500 ms.

En la Figura 4.21 se observa el modo de salida SANDIA, en donde al ejecutar la configuración realizada, el voltaje de salida resultante es 11.546 V y la salida de corriente se ajusta a 0.033 A. De forma gráfica se observa la salida respectiva de voltaje, corriente y potencia respecto al tiempo, en donde se destaca que las salidas se mantienen constantes en los valores calculados hasta que se ingrese otro modo o se detenga la ejecución.

En el modo de salida Tabla de la Figura 4.22 se observa los valores de voltaje y corriente ingresados, como resultado la salida de voltaje es igual al último valor de voltaje

Tabla 4.4: Marcas de tiempo para voltajes de salida en Modo STEP.

Marca (mm:ss)	Voltaje (V)
20:02.2	0
20:03.2	1,39492
20:04.2	2,7138
20:05.2	4,04299
20:06.4	5,54243
20:07.4	6,88077
20:08.4	8,21826
20:09.5	9,78867
20:10.5	11,1651
20:11.6	12,4923
20:12.6	13,8821
20:13.6	15,2133
20:14.6	16,5868
20:15.7	18,1383
20:16.7	19,3654
20:17.7	20,0284

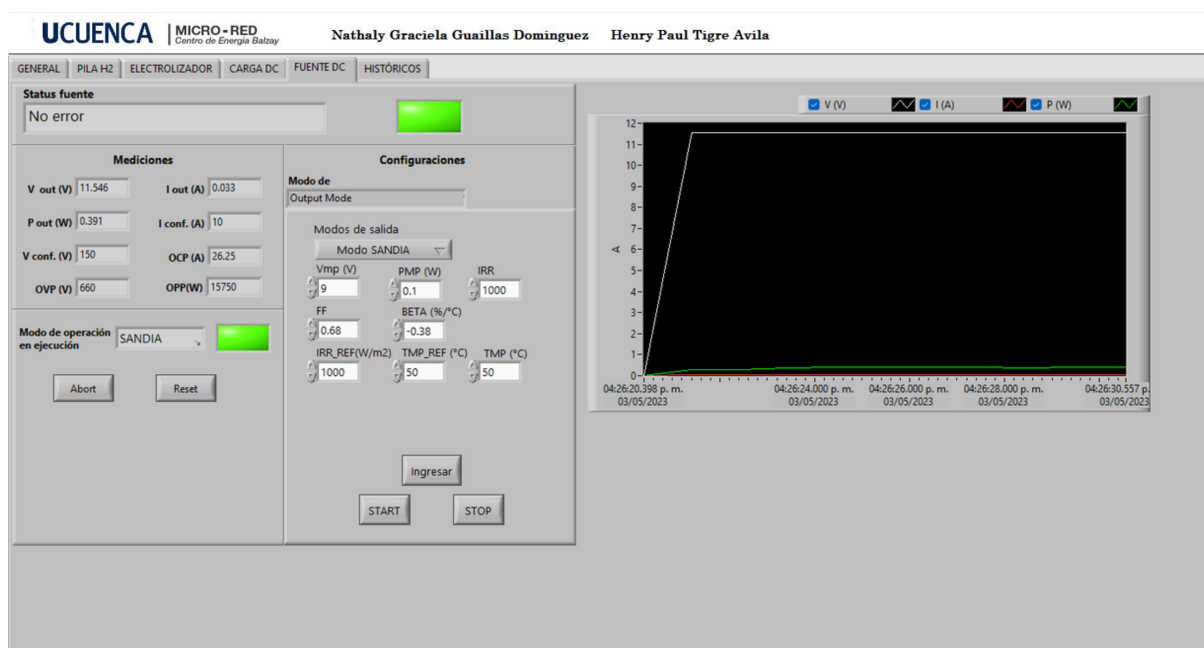


Figura 4.21: Modo de salida: SANDIA.

ingresado que corresponde al voltaje en circuito abierto, del mismo modo la salida de corriente es igual al primer valor de corriente ingresado (corriente en cortocircuito).

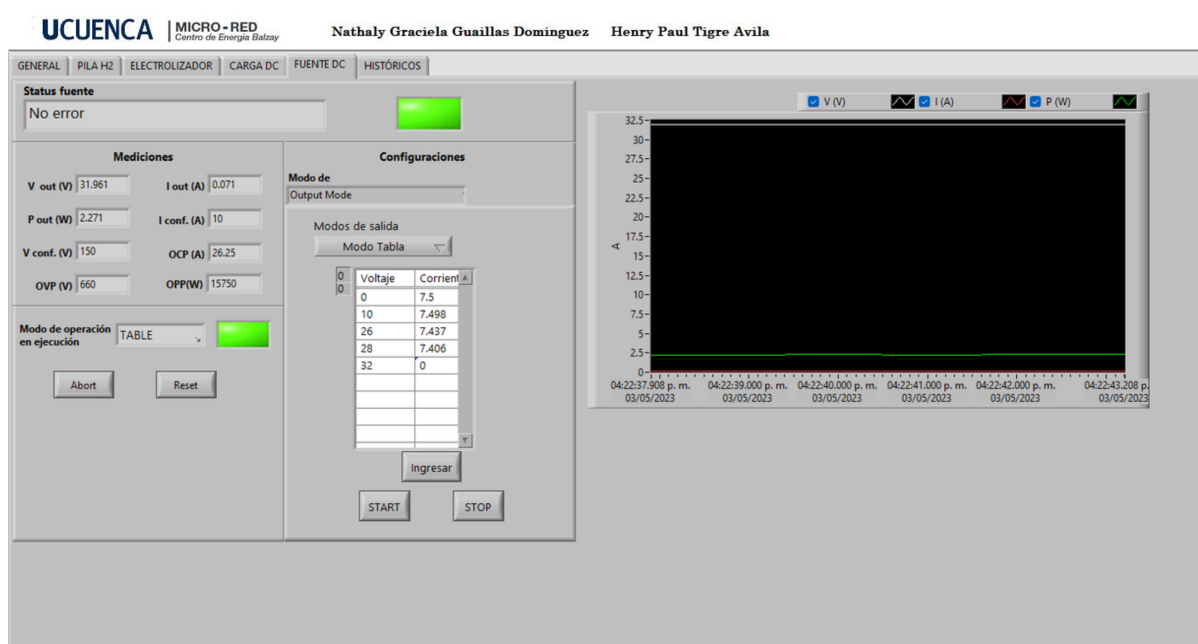


Figura 4.22: Modo de salida: Modo Table.

4.2. Tiempo de procesamiento en los equipos de control

Las pruebas se realizaron en el programa del HMI y del PAC por cada equipo. El cálculo de los tiempos de procesamiento de cada uno de los procesos de supervisión y monitoreo de los equipos se ejecutó con el uso de marcas de tiempo para determinar el intervalo de espera hasta volver a ejecutar cada bucle While. Los escenarios de prueba fueron:

- Monitorización sin intervención en los equipos
- Monitorización, configuración y control de los equipos

Con los datos almacenados se presentan las gráficas obtenidas con los respectivos intervalos de confianza.

4.2.1. PAC

Dentro del controlador, el electrolizador cuenta únicamente con la declaración del servidor Modbus y las variables compartidas respectivas; por lo tanto, se realizó el cálculo de los intervalos de confianza de los otros tres equipos que cuentan con bucles dedi-

cados a paralelizar cada uno de los procesos en el controlador.

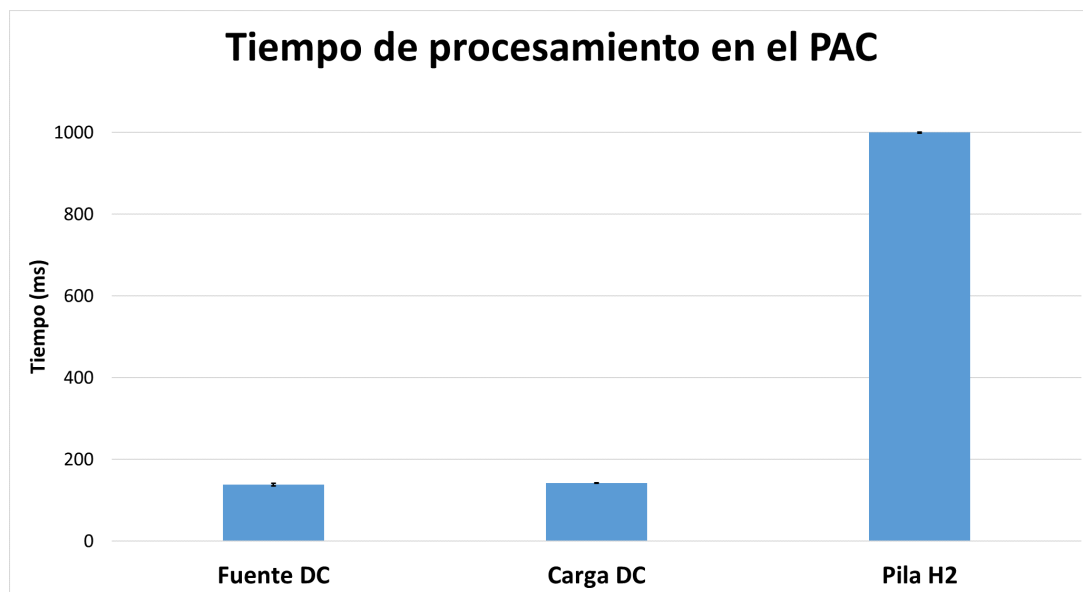


Figura 4.23: Intervalos de confianza de los tiempos de procesamiento de cada proceso de supervisión en el PAC.

En la Figura 4.23 se observa que el mayor tiempo de espera hasta que se vuelva a ejecutar el bucle es de un segundo en la pila, esto se debe al procesamiento de todas las variables del equipo al mismo tiempo. En cuanto a los intervalos de variación, se observa que son muy pequeños por lo que se puede estimar que el PAC siempre usa el mismo periodo de ejecución en cada uno de los equipos; así mismo destina tiempo de ejecución al manejo del servidor Modbus, tareas de escritura y lectura de las variables compartidas.

4.2.2. HMI

Dentro del HMI se procedió de manera similar al del PAC; dado que se tiene un bucle dedicado para cada uno de los equipos, obteniendo los siguientes resultados.

La Figura 4.24 muestra los intervalos de confianza del intervalo de ejecución de cada bucle dentro del HMI, se observa que los tiempos promedio de los procesos de cada equipo son iguales, apenas por encima de un segundo. En el caso del electrolizador se observa un intervalo de confianza significativo debido a que el bucle del equipo se ejecutó en diferentes duraciones de tiempos, pues los procesadores del computador se compartieron con otras actividades. A pesar de esto, la variación no es muy

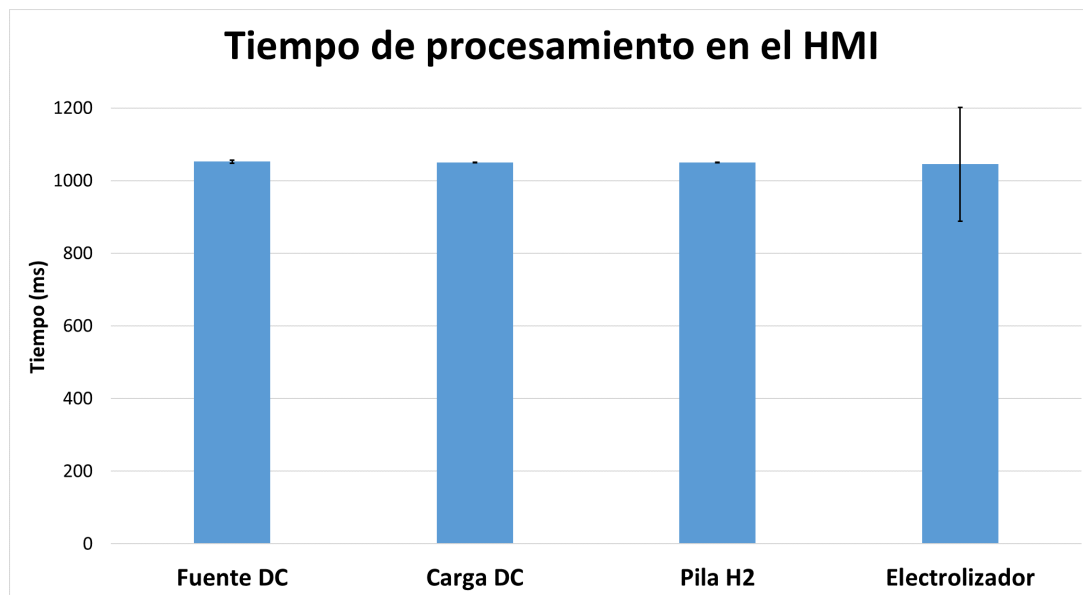


Figura 4.24: Intervalos de confianza de los tiempos de procesamiento de cada proceso de supervisión en el HMI.

significativa, por lo que para el operador pasará desapercibido dicho cambio.

4.3. Evaluación subjetiva a la interfaz del sistema SCADA

Conocer la opinión de un grupo de posibles interesados en el uso de los equipos es importante, porque se podrá conocer cual es la percepción de terceros de la velocidad de respuesta, utilidad, sencillez y cumplimiento de estándares.

4.3.1. Población de interés en el uso del sistema SCADA

Para evaluar la interfaz del sistema SCADA se realizó una encuesta a los operarios y los estudiantes de los últimos ciclos de las carreras de eléctrica, telecomunicaciones y computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. La población seleccionada se relaciona con posibles interesados en el uso de los equipos de estudio en el desarrollo del trabajo de titulación o trabajos de las asignaturas que cursan.

Para la estimación de la población total se uso como base el dato proporcionado por la facultad, en donde se evidenció que hay una población total de 114 estudiantes, esto sumado a que existen cuatro operarios constantes de la microrred, dan una población

total de 118 personas base.

4.3.1.1. Muestra

El cálculo de la muestra se realizó en función a los factores de confiabilidad y margen de error típicos para estos procesos, con un nivel de confianza del 90 % y un margen de error del 10 %. Como resultado se consideró una muestra de 44 personas del total de la población considerada.

4.3.2. Preguntas aplicadas en la encuesta

Los encuestados se validaron por sus correos institucionales y mediante campos destinados a verificar los requisitos planteados. Para la encuesta se presentó un vídeo corto que demuestra el funcionamiento del sistema SCADA, proporcionando información para que el estudiante responda preguntas basadas en la escala de Likert para una adecuada evaluación (video demostrativo disponible en [57]).

1. En su opinión, ¿cómo evalúa el sistema SCADA desarrollado como herramienta para la supervisión y monitoreo de los equipos?

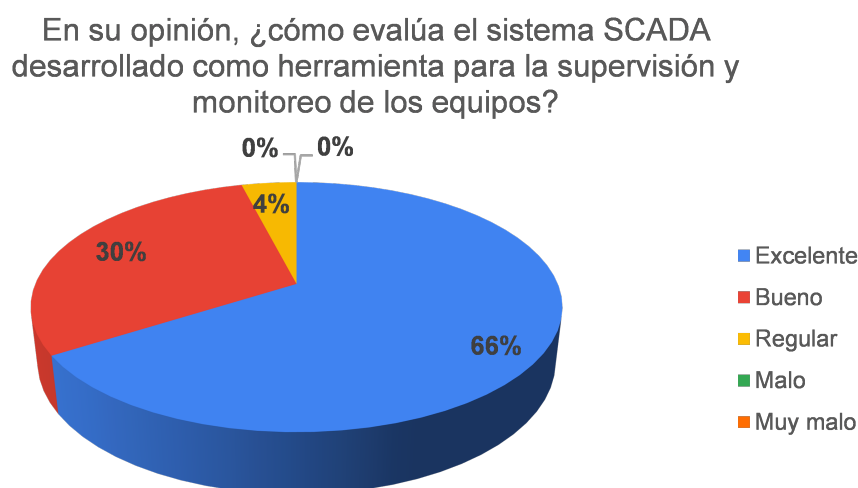


Figura 4.25: Diagrama sectorial de la pregunta 1.

2. Desde su perspectiva, ¿cómo calificaría la velocidad del sistema SCADA en términos de tiempo de respuesta?



Figura 4.26: Diagrama sectorial de la pregunta 2.

3. A su parecer, ¿qué tan amigable (fácil de usar, administrar y navegar) es la interfaz con el usuario?

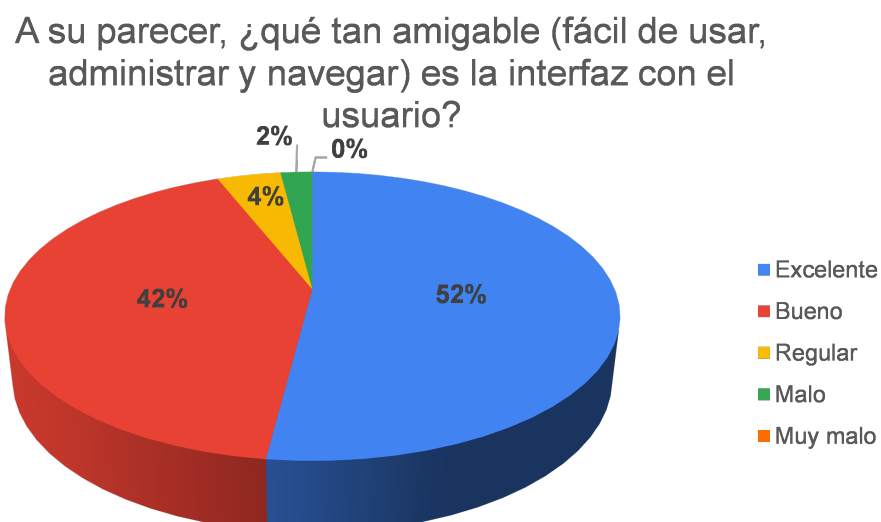


Figura 4.27: Diagrama sectorial de la pregunta 3.

4. En su opinión, ¿el sistema SCADA cubre las variables necesarias (por ejemplo, eléctricas, físicas, termodinámicas, etc.) de los equipos monitoreados?

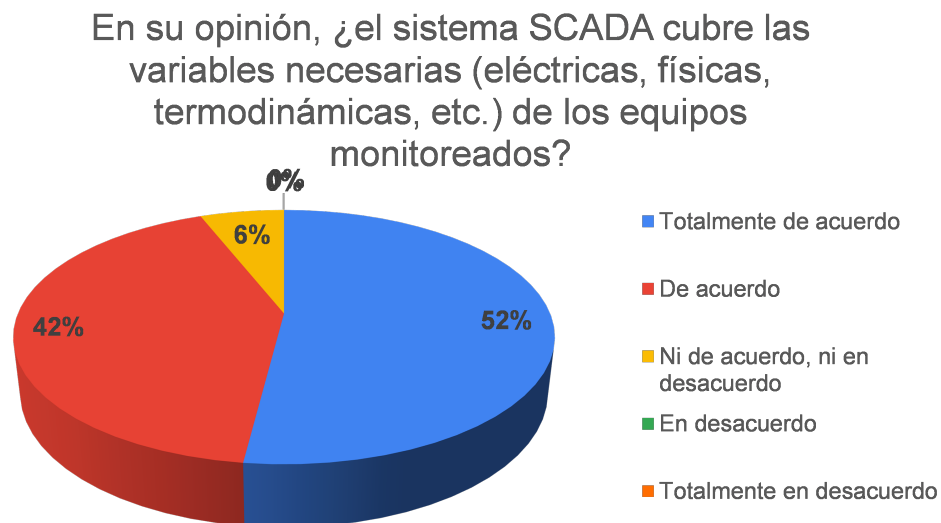


Figura 4.28: Diagrama sectorial de la pregunta 4.

5. ¿Los datos fueron agrupados adecuadamente en cada pestaña para una correcta visualización?

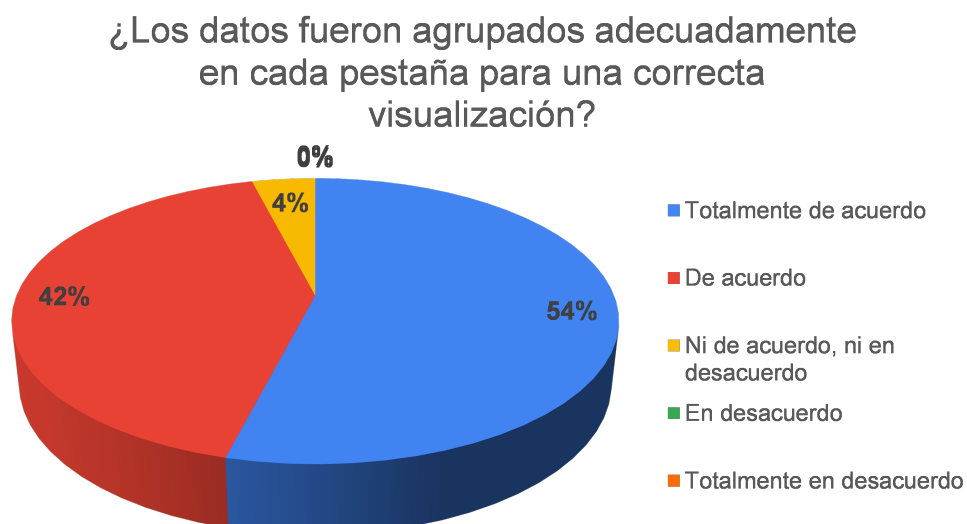


Figura 4.29: Diagrama sectorial de la pregunta 5.

6. A su criterio, ¿el sistema SCADA ofrece información precisa y detallada para el análisis, comprensión y toma de decisiones del supervisor del sistema?

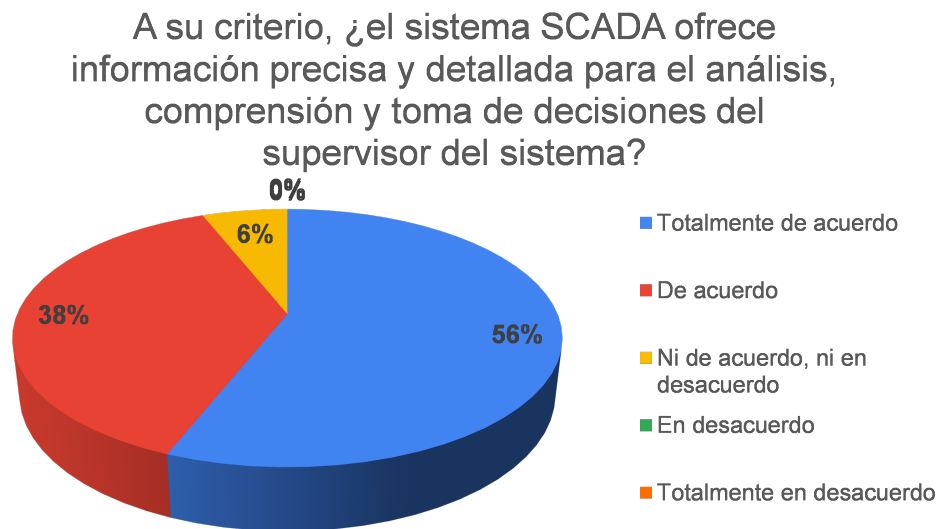


Figura 4.30: Diagrama sectorial de la pregunta 6.

7. ¿Con qué nivel de facilidad cree usted que se pueden integrar nuevos equipos al sistema SCADA para adaptarse a las condiciones cambiantes de la microrred?



Figura 4.31: Diagrama sectorial de la pregunta 7.

8. En su opinión, ¿El sistema SCADA cumple con los requisitos técnicos y de calidad adecuados para ser utilizado en aplicaciones industriales?

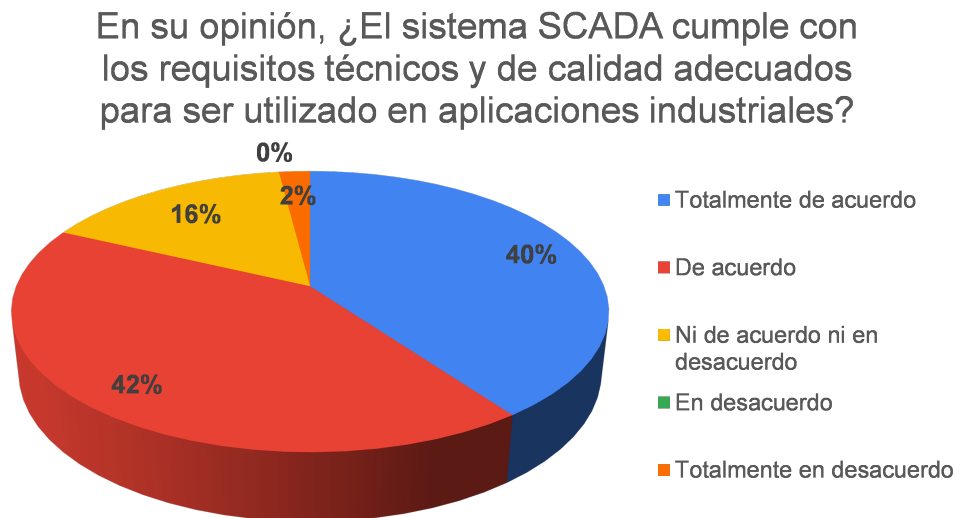


Figura 4.32: Diagrama sectorial de la pregunta 8.

9. ¿Qué tan probable es que usted recomiende este sistema SCADA a otros ingenieros para su uso en aplicaciones similares?

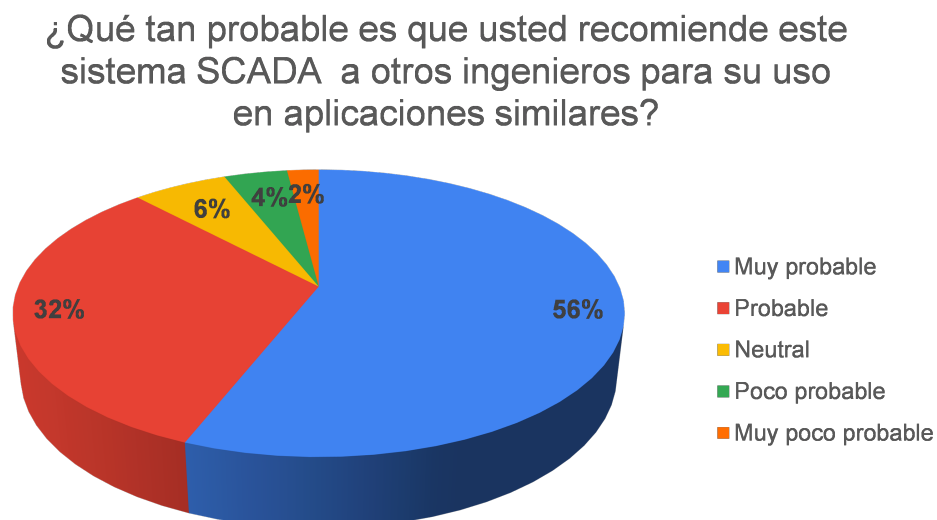


Figura 4.33: Diagrama sectorial de la pregunta 9.

En base a los resultados obtenidos, la confiabilidad del sistema según la gran mayoría de encuestados es muy aceptable porque entienden y establecen que la interfaz cumple con tiempos de respuesta adecuados, la interfaz es intuitiva y se ha cumplido con agrupar de forma correcta cada una de las variables que se tienen dentro de los equipos acorde al tipo de dato. En consecuencia, acorde a los encuestados la información brindada en la interfaz es suficiente y útil para la toma de decisiones por parte de un operario sobre el funcionamiento y configuración de los equipos. De esta forma, se cumple con los requisitos técnicos de la microrred para el manejo dentro de entornos industriales.

En el mismo contexto, la mayoría de encuestados tienen conocimiento de las características y funcionalidades que tiene un sistema SCADA dentro de la supervisión y monitoreo de sistemas; por lo que este sistema será de gran ayuda para el estudio de nuevos requerimientos que pueda tener el laboratorio en el desarrollo y expansión de la red. Además, según las respuestas de los encuestados el sistema puede ser usado para trabajos, prácticas o investigaciones futuras, por su capacidad de configuración y tratamiento de variables.

Conclusiones y recomendaciones

El capítulo final del trabajo de titulación, en la sección 5.1 muestra las conclusiones a las que se han llegado en base a los resultados del capítulo 4 y a los objetivos definidos en el capítulo 1. En la sección 5.2 se describen algunas recomendaciones que se deben tomar en cuenta al trabajar con estos equipos, o en su defecto usar el mismo entorno de desarrollo en aplicaciones similares. Finalmente, en el apartado 5.3 se enumeran propuestas de trabajos de investigación en lo cuales se pueden continuar trabajando para complementar el sistema SCADA desarrollado.

5.1. Conclusiones

La interoperabilidad que ofrece el IIoT ha permitido que los procesos de automatización y control se expandan hacia nuevos horizontes, incluyendo al sector industrial. No obstante, este sector presenta un gran desafío en términos de comunicaciones y funcionamiento en tiempo real. Por ende, para desarrollar una aplicación dentro de este ámbito se debe cumplir con requisitos de despliegue y desempeño para evitar errores o malfuncionamientos.

Conocer y tener un registro de todas las conexiones en un diagrama de red es vital para mantener la escalabilidad del medio; esto ofrece grandes ventajas cuando se trata de ingresar nuevos elementos a la microrred porque reduce los tiempos de implementación al condensar la información en un solo gráfico, evitando visitas innecesarias a campo para conocer el tipo de conexión y los protocolos que se manejan. Además, mediante el estudio de la arquitectura de la microrred se ha obtenido una visión más clara de las características del protocolo Modbus, el cual es predominante en la microrred. Esto permite gestionar los registros pertinentes para la obtención de datos y control del electrolizador de manera efectiva.

Los controladores programables, ya sea PLCs o PACs, son un complemento de gran ayuda en la gestión de equipos de campo, permitiendo cambios de configuración para incorporar equipos adicionales. La capacidad de escalar el sistema permite agregar dispositivos por medio de protocolos de comunicación como Modbus TCP/IP. En este contexto, en el trabajo de titulación se optó por la placa sbRIO-9642, debido a que, al

tratarse de un FPGA, la configuración se basa en compuertas lógicas. Esto resulta en la disminución de tiempo de procesamiento y optimización en la toma de decisiones en comparación a otros controladores tradicionales.

El sistema SCADA implementado interconecta los equipos bajo Ethernet, ofreciendo confiabilidad y tolerancia al ruido. Con el desarrollo del sistema de supervisión y monitoreo de la celda de hidrógeno, carga y fuente programable en DC se logró interconectar los dispositivos a la red privada del laboratorio, que ahora puede estar disponibles para pruebas, proyectos y ensayos futuros; pues estos se encontraban disponibles únicamente para pruebas aisladas. En relación al área de comunicación, la pila de hidrógeno se conecta mediante el protocolo serial RS-232. Mientras que los demás dispositivos se comunican mediante el protocolo TCP/IP en la capa de red a través de Ethernet.

Como resultado principal de este trabajo se ha generado una interfaz amigable, ordenada e intuitiva para el operador, permitiendo la toma de decisiones efectiva y adecuada con los equipos. El HMI ofrece diversas opciones de supervisión, que van desde un sinóptico general que proporciona un resumen completo de las variables eléctricas monitorizadas y los indicadores de estado, hasta pestañas dedicadas a cada equipo para el acceso a información complementaria y un análisis detallado del comportamiento respecto al tiempo. En el caso de la pila y el electrolizador la supervisión se realiza en tiempo real con campos dedicados y agrupados acorde al tipo de dato presentado, de igual forma se visualiza el comportamiento en el tiempo y un dashboard que presenta la información interactivamente. La fuente y carga programable se enfocan en el manejo de variables eléctricas en tiempo real para su respectivo análisis y configuración.

5.2. Recomendaciones

- Para el manejo de los equipos es importante revisar los respectivos manuales para una visión clara de la función y propósito de cada modo de operación configurado.
- En el caso del manejo de equipos con NI-VISA, para verificar que la sentencias

se utilizan adecuadamente se recomienda usar el *software* NI I/O Trace que ayuda a verificar las sentencia que se envían, el estado y la respuesta del equipo.

- Para la lectura de registros Modbus con LabVIEW se debe realizar el corrimiento de una posición de memoria debido a que el *software* inicia los registros desde la posición 1 y no desde 0, que es como generalmente se maneja.
- En el caso del electrolizador es importante revisar el estado de las válvulas de hidrógeno para mantener un flujo correcto y evitar accidentes.
- Al momento de realizar las distintas interconexiones de la carga con alguna fuente de alimentación es importante verificar la potencia máxima de trabajo; en el caso de que la fuente sea de mayor o igual potencia no hay problema, pero si la fuente es de menor potencia no se debe configurar la carga a una potencia mayor a la de la fuente de alimentación.

5.3. Trabajos futuros

- Desarrollar la segunda etapa de integración al sistema SCADA suplementario con el resto de equipos del segundo canje de deuda.
- Transferir a la plataforma ThingsBoard los datos de lectura del sistema SCADA complementario para un adecuado manejo de la base de datos del sistema.
- Integrar un sistema de seguridad al sistema SCADA para asegurar la integridad de la información.
- Integrar el SCADA principal y complementario en un solo sistema, para el control global de todos los equipos disponibles en el laboratorio.

Apéndice A

A.1. Configuración y actualización del PAC

En la Figura A.1 se presentan las características principales del PAC, visto desde el programa NI-MAX, se destacan las interfaces y sistemas remotos conectados en el equipo o disponibles en la red local.

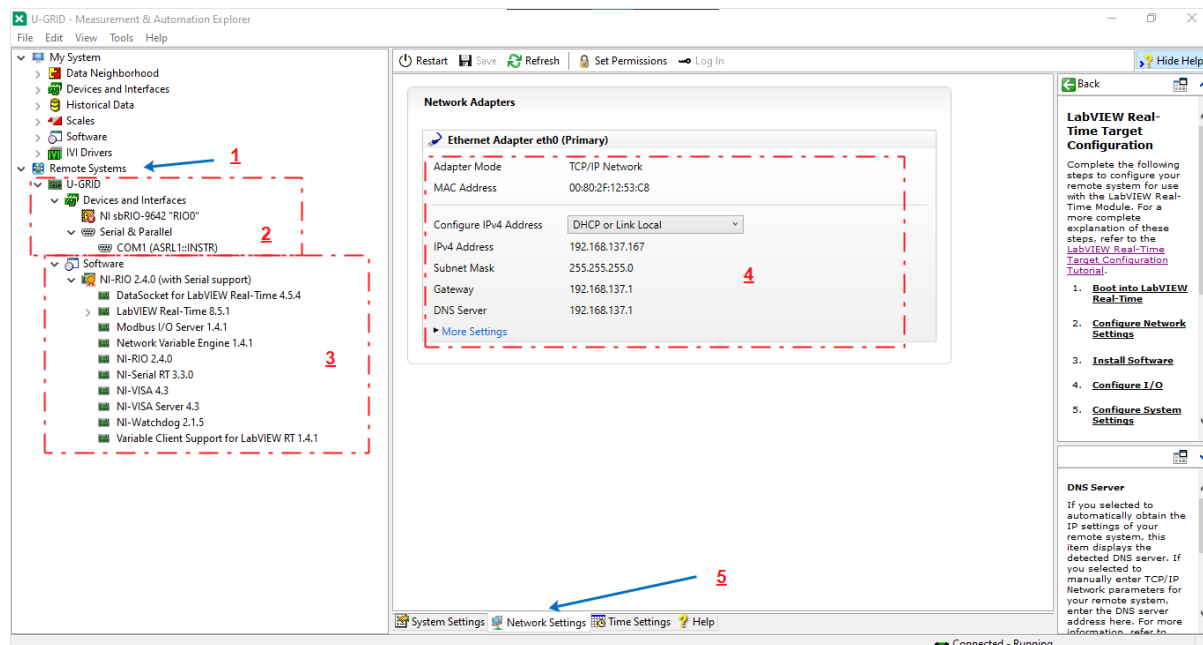


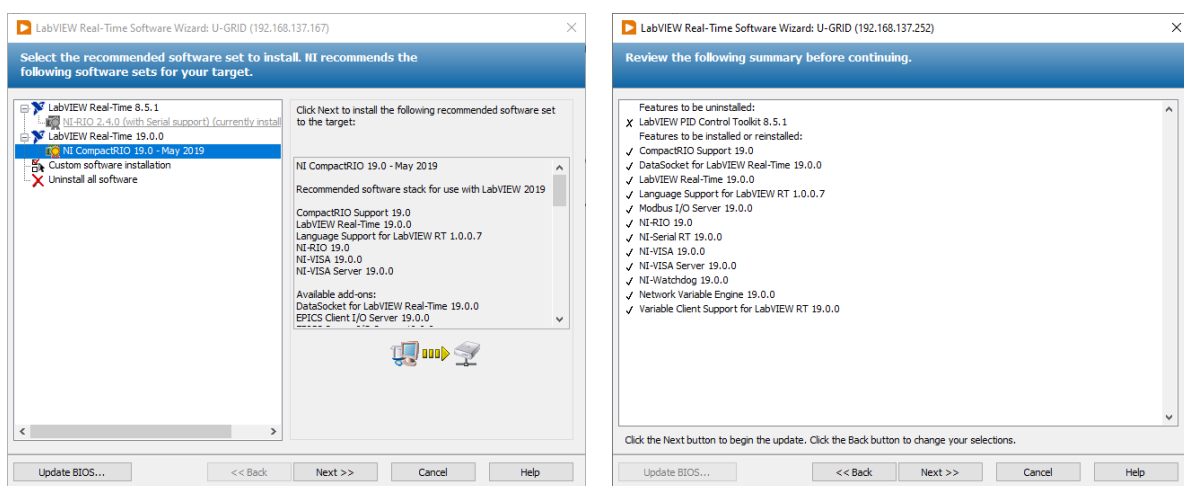
Figura A.1: Visualización de las características y software iniciales del PAC.

En la Figura A.1 se tienen los siguientes campos:

1. **Remote system:** Pestaña para visualizar los sistemas remotos conectados directamente al equipo o disponibles en la red. Una vez pulsado en este campo se realizará la búsqueda de los equipos e inmediatamente aparecerán los equipos con su dirección IP o el nombre del recurso.
2. **Dispositivos e interfaces:** Una vez finalizada la búsqueda y seleccionado el sistema remoto, se pueden ver las interfaces seriales y los dispositivos disponibles.
3. **Software del sistema remoto:** Descripción y enumeración de cada uno de los softwares instalados dentro del equipo remoto con su respectiva versión.

4. **Configuraciones de red:** Campo destinado a las configuraciones de red como dirección IP, tipo de dirección (dirección IP estática o DHCP), máscara de red, puerta de enlace y servidor DNS. Cuando se coloca la opción DHCP, todos estos campos serán llenados de forma automática por el servidor DHCP de la red local; caso contrario cuando se elige el direccionamiento estático, todos estos deben ser configurados por el administrador del equipo y /o red.
5. **Pestañas de configuraciones:** Pestañas donde se puede cambiar y observar las características del equipo, capacidades de almacenamiento, procesamiento y zona horaria que maneja el equipo.

Para actualizar se deberá pulsar con el botón secundario sobre el campo software y seleccionar la opción de adicionar o remover software. Seguido se presentan las ventanas mostradas en la Figura A.2.

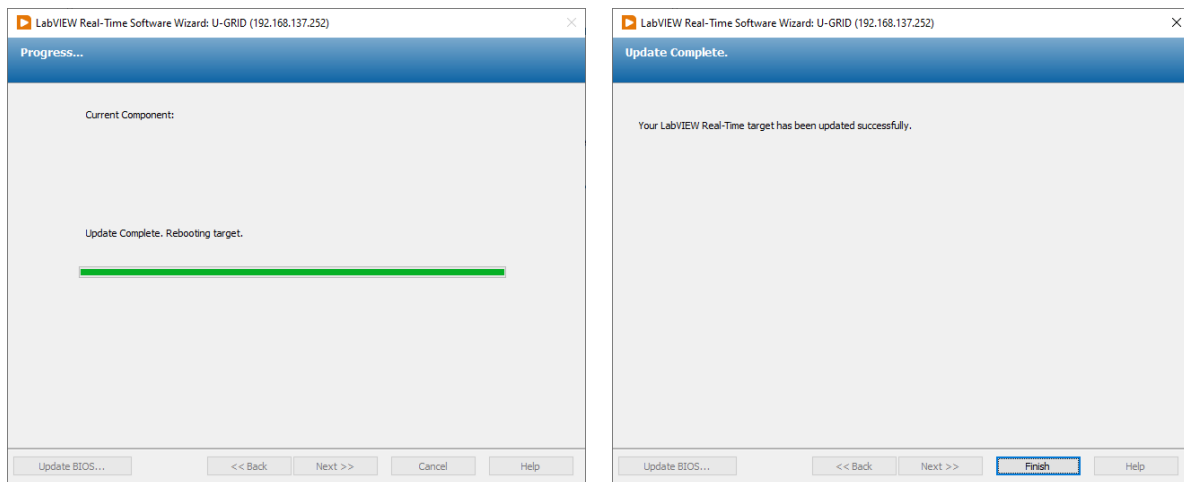


(a) Búsqueda y selección de software recomenda- (b) Revisión y confirmación de las funcionalidades.
do.

Figura A.2: Selección del software a instalar y/o actualizar dentro del PAC.

La Figura A.2(a) muestra la ventana que se despliega luego de seleccionar la opción de adicionar software, en este se muestran las versiones de software que se recomienda instalar; la primera opción hace referencia al software que se tiene instalada y la segunda opción en este caso es la versión de NI CompactRIO en su versión 19, que es la última versión que acepta la sbRIO-9642, por temas de soporte y servicio técnico por parte de NI. Posteriormente, se presenta la ventana mostrada en la Figura A.2(b) donde se presenta un resumen de las características y funcionalidades que el

usuario ha seleccionado para instalar y/o actualizar.



(a) Progreso de instalación del nuevo software. (b) Mensaje final de instalación del nuevo software.

Figura A.3: Ventanas del progreso de instalación del nuevo software.

Por consiguiente, se inicia con la instalación del nuevo software; aquí se tiene una barra que muestra el avance de la instalación y una breve descripción del software que se está instalando, esto se muestra en la Figura A.3(a). Una vez terminada la instalación se deberá reiniciar el equipo desde la ventana mostrada en la Figura A.3(b).

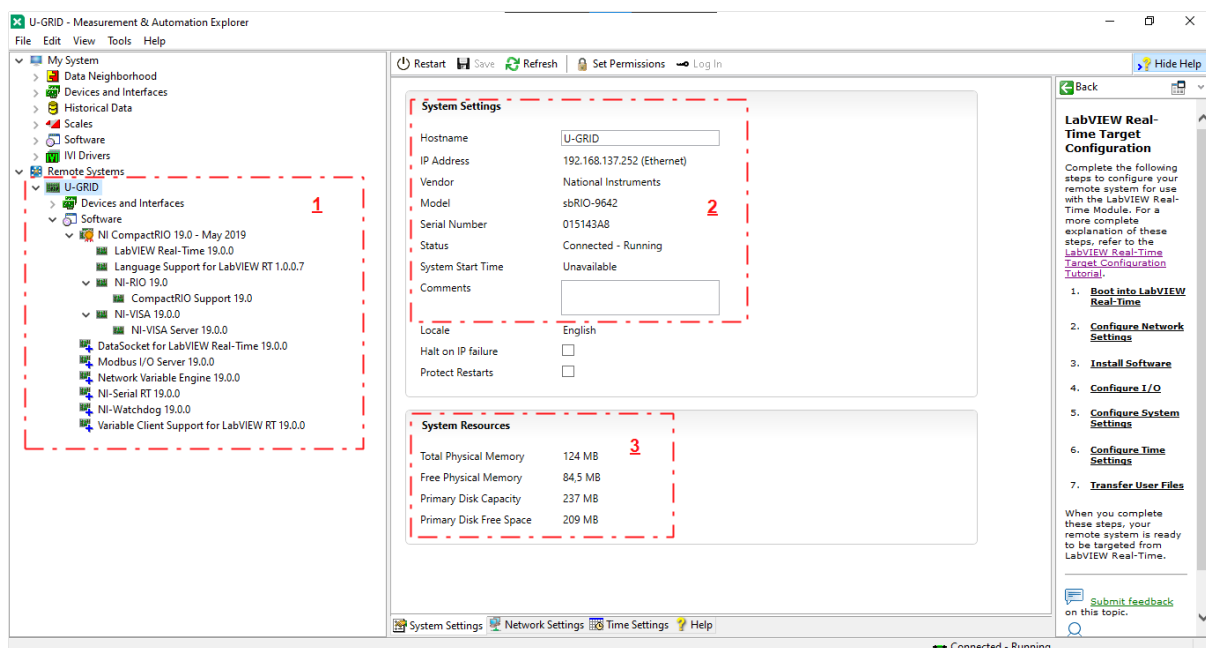


Figura A.4: Software Actualizado en el PAC.

Cuando se ha reiniciado el equipo, se vuelve a la página de NI-MAX inicial. En la sec-

ción de software se puede ver que se ha instalado una nueva versión de los distintos programas. Los campos presentados en la Figura A.4 son:

1. **Software del equipo remoto:** Esta sección muestra que la versión instalada en el dispositivo es la 19; con esto se advierte que el administrador del equipo debe manejar las versión 19 de LabVIEW y software de NI para no generar errores de compatibilidad.
2. **Características del equipo:** Muestra el estado del equipo, nombre, modelo y serie de equipo remoto.
3. **Capacidades del equipo:** Enumeración de las capacidades de almacenamiento y capacidades de procesamiento que posee y esta ocupado en el equipo.

A.2. Creación de un proyecto con el controlador dentro LabVIEW

Para la creación de un nuevo proyecto se debe seguir el proceso mostrado en cada una de las figuras:

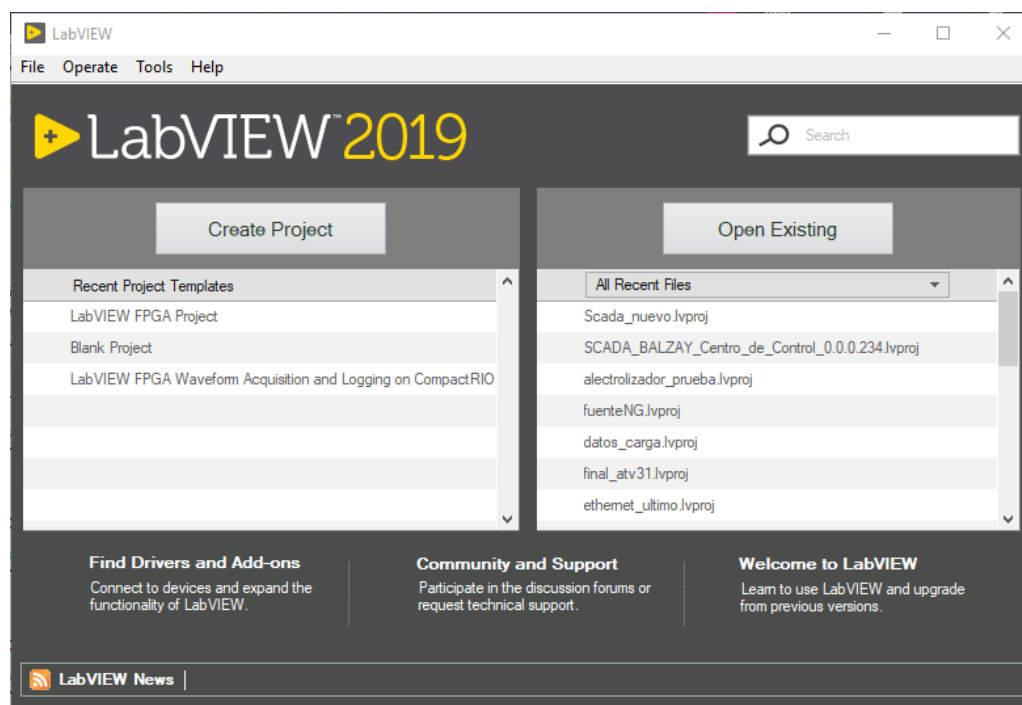


Figura A.5: Página de inicio de LabVIEW: elección de crear de nuevo proyecto.

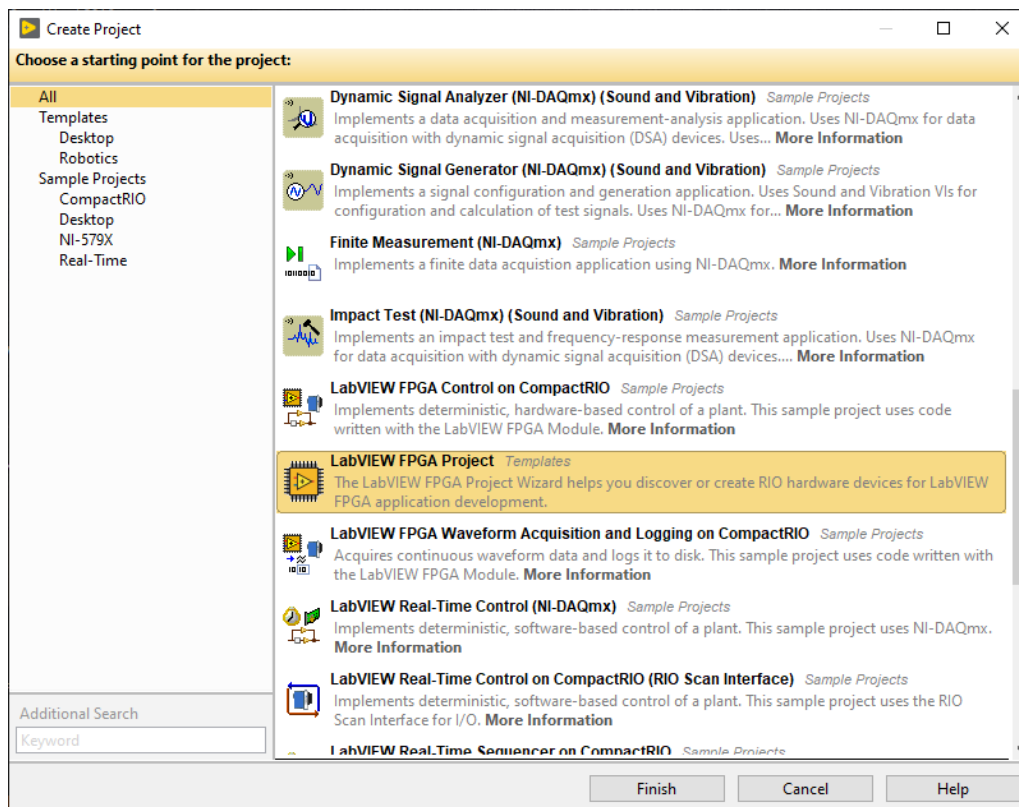


Figura A.6: Selección de la opción LabVIEW FPGA project.

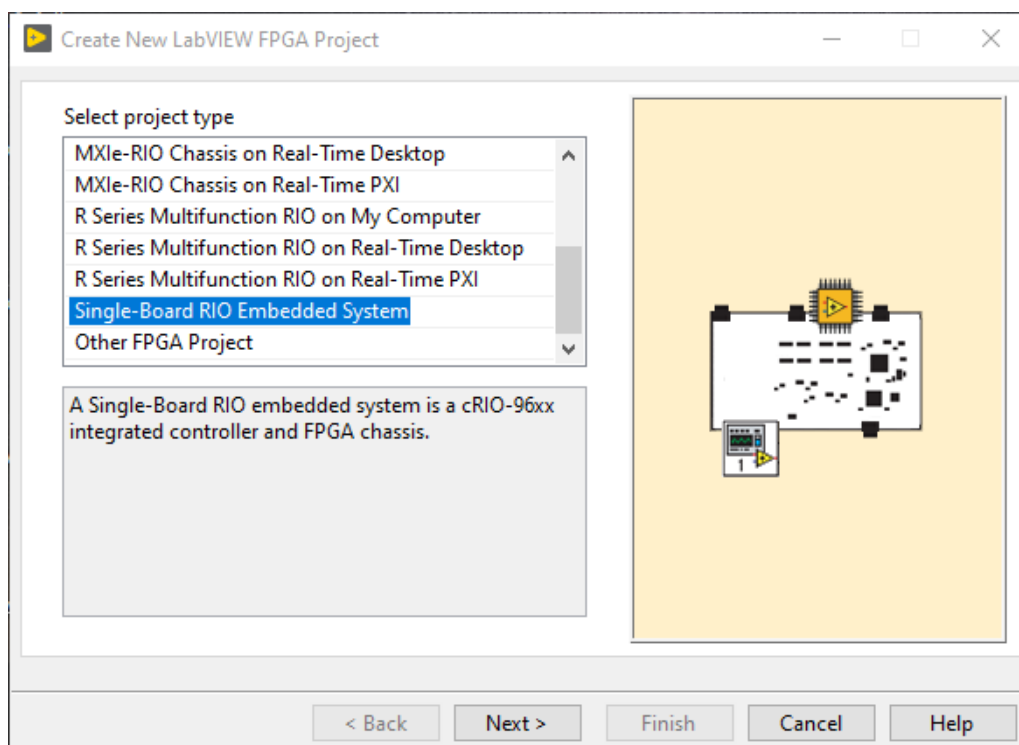


Figura A.7: Selección del tipo de placa a usar, en este caso sbRIO.

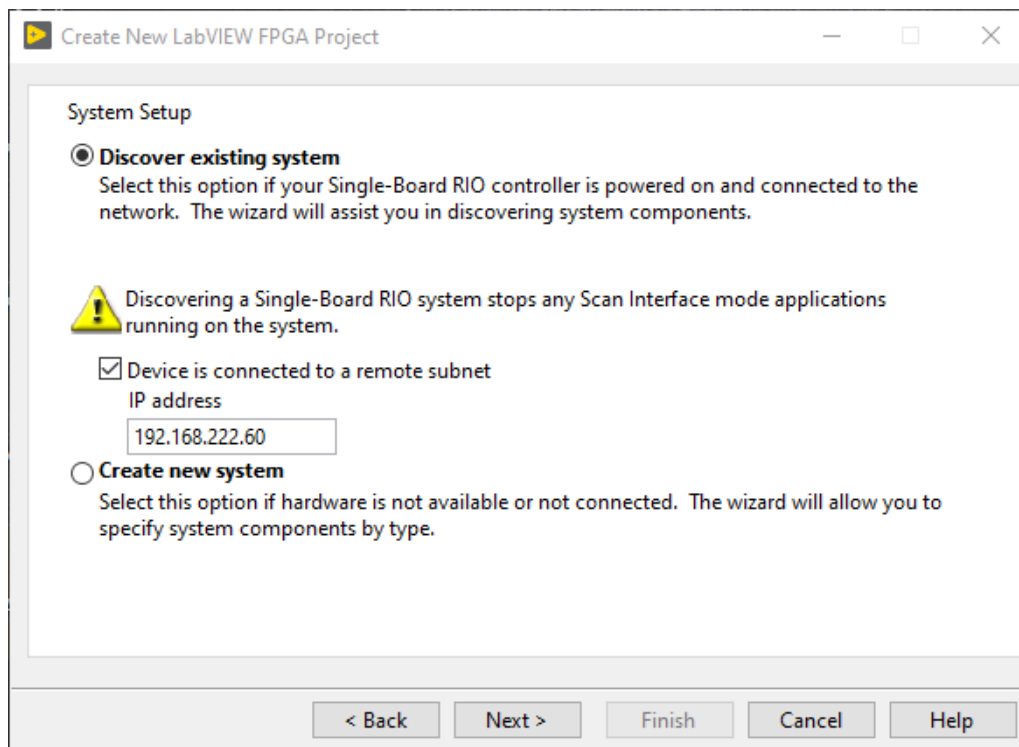


Figura A.8: Búsqueda automática del tipo de dispositivos conectados.

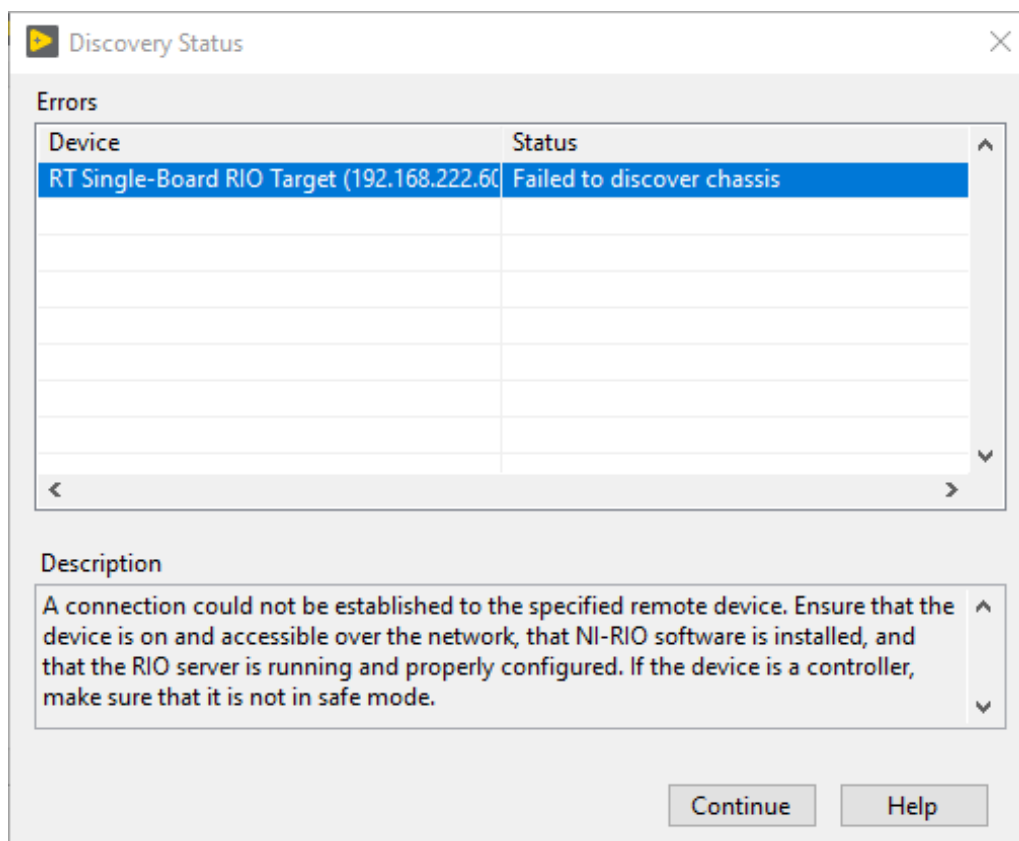


Figura A.9: Descripción de equipos desconectados, pero se tiene dispositivos previos con los que se trabajo.

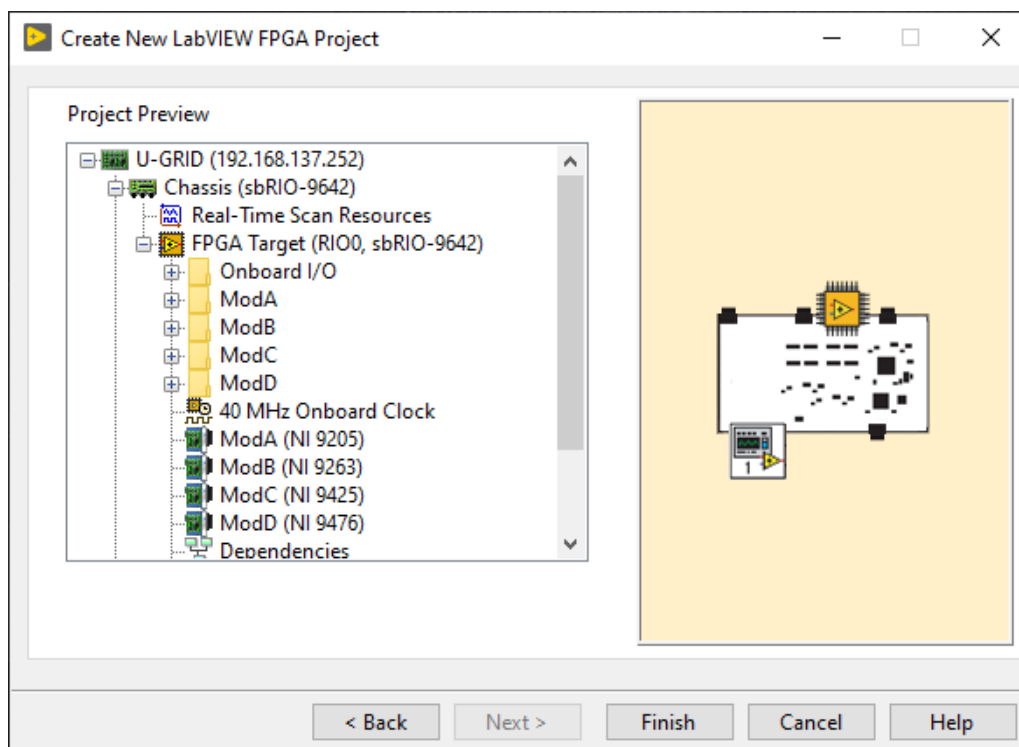


Figura A.10: Previsualización de las características el equipo dentro del proyecto cuando está conectado el controlador.

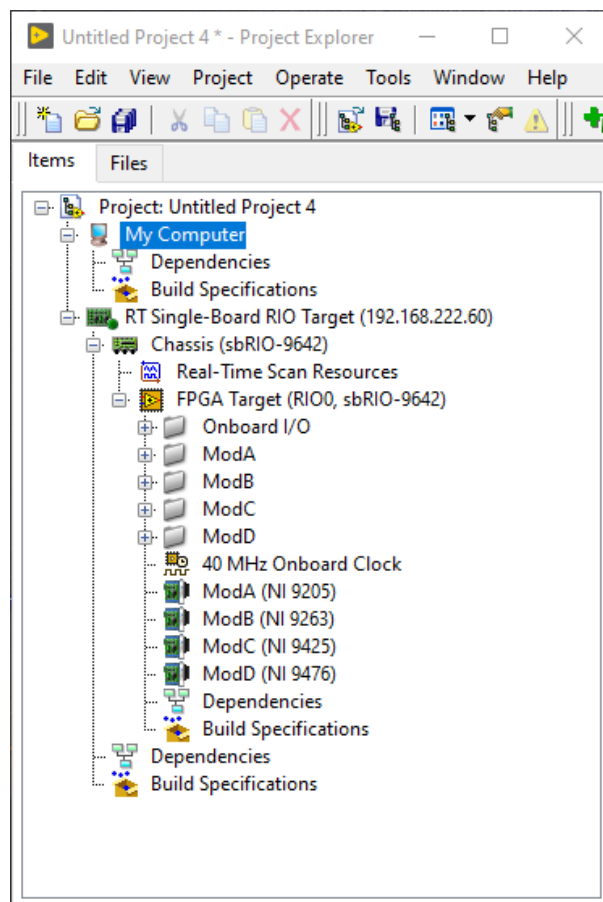


Figura A.11: Proyecto creado con el FPGA en LABVIEW.

Apéndice B

B.1. Variables compartidas de visualización de la pila de hidrógeno

Tabla B.1: Variables compartidas de visualización de la pila de hidrógeno.

Variable	Tipo	Descripción
Concentración Hidrógeno	String	Concentración de hidrogeno
Error pila		Código de error (Ver apéndice D)
FT. trabajando_pila		Tiempo total de actividad
FT.voltaje_pila		Tiempo total de actividad con voltaje de salida
I_out_pila		Corriente medida en los terminales de salida
I_pila		Corriente de la pila
T_Amb_pila		Temperatura ambiente medida
T_Pila		Temperatura interna de la pila
T_tarjeta_pila		Temperatura de la tarjeta de la pila
V_out_pila		Voltaje medido en los terminales de salida
V_pila		Voltaje de la pila
Vel. ventiladores		Velocidad de los ventiladores
Warning_pila		Código de alertas

B.2. Variables compartidas de visualización de la carga programable

Tabla B.2: Variables compartidas de visualización para la carga programable DC.

Variable	Tipo	Descripción
Carga	Double	Carga eléctrica
Corriente		Corriente en tiempo real
Energía		Energía consumida por la carga
f Vp+		Frecuencia del voltaje pico positivo
f Vp-		Frecuencia del voltaje pico negativo
I max_medido		Corriente máxima medida en los terminales
Potencia		Potencia en tiempo real
Voltaje		Voltaje en tiempo real
Vp+		Voltaje pico positivo
Vp-		Voltaje pico negativo

B.3. Variables compartidas de visualización de la fuente programable

Tabla B.3: Variables compartidas de visualización de la fuente programable DC.

Variable	Tipo	Descripción
I_fuente conf	Double	Corriente configurado en la fuente
I_medido		Corriente medida en tiempo real
OCP (A)		Corriente límite de protección
OPP (W)		Potencia límite de protección
OVP (V)		Voltaje límite de protección
P_medido		Potencia medida en tiempo real
V_fuente conf		Voltaje configurado en la fuente
V_medido		Voltaje medido en tiempo real

B.4. Variables compartidas de visualización del electrolizador

Tabla B.4: Variables compartidas de visualización del Electrolizador.

Variable	Tipo	Descripción
300129	Uint16	Código de estado actual
300134		Código de error actual
300135		Código de alarma actual
300150		Número de ciclos de producción stack 1
300151		Número de ciclos de producción stack 2
300152		Número de ciclos de producción stack 3
300153		Número de ciclos de producción stack 4
300198		Número de stacks instalados
300213		Número de stacks activos
300218		Potencia del módulo A
300219		Potencia del módulo B
300220		Código de estado del dryer
300221		Código de error del dryer
D300136	Uint32	Temperatura dryer 0
D300138		Temperatura dryer 1
D300140		Tasa de flujo de hidrógeno
D300154		Temperatura agua modulo A
D300156		Temperatura agua módulo B
D300160		Presión modulo A
D300162		Presión modulo B
D300164		Presión de salida módulo A
D300166		Presión de salida módulo B
D300168		Velocidad ventiladores módulo A
D300170		Velocidad ventiladores módulo B
D300172		Velocidad ventiladores módulo A2
D300174		Velocidad ventiladores módulo B2
D300176		Velocidad ventiladores dryer
D300178		Lectura de señal externa
D300180		Voltaje stack 1
D300182		Voltaje stack 2
D300184		Voltaje stack 3
D300186		Voltaje stack 4
D300188		Corriente stack 1
D300190		Corriente stack 2
D300192		Corriente stack 3
D300194		Corriente stack 4
D300196		Hidrógeno total
D300209		Presión de salida
D300211		Presión del dryer

Apéndice C

C.1. Variables compartidas de control de la carga programable

Tabla C.1: Variables compartidas de control para la carga programable DC.

Variable	Tipo	Descripción
# repeticiones	Double	Número de repeticiones para CCD y CRD
CL		Capacitancia paralela equivalente
Fall SR		Tasa de cambio(velocidad) de caída
Frecuencia		Frecuencia de la señal senoidal para el modo SWD
I AC		Corriente AC pico pico para el modo SWD
I DC		Corriente DC de polarización en el modo SWD
I L1		Corriente constante para la carga L1
I L2		Corriente constante para la carga L2
I_set		Corriente constante para el modo CVCC y CRCC
Imax_ingreso		Corriente máxima para el modo CV
LS		Inductancia en serie equivalente
P L1		Potencia constante para la carga L1
P L2		Potencia constante para la carga L2
R L1		Resistencia constante para la carga L1
R L2		Resistencia constante para la carga L2
R_set		Resistencia constante para el modo CVCR y CRCC
Respuesta		Velocidad de respuesta de la carga
Rise SR		Tasa de cambio (velocidad) de subida
RL		Resistencia equivalente paralela
RS		Resistencia equivalente en serie
T1		Tiempo de duración para la carga L1
T2		Tiempo de duración para la carga L2
V L1		Voltaje constante para la carga L1
V L2		Voltaje constante para la carga L2
V_set		Voltaje constante para el modo CVCR y CVCC
Corriendo	Boolean	Indicador de ejecución de alguna configuración
Guardar		Habilita el cambio de una nueva configuración
Play		Ejecuta la configuración cargada
Reset_carga		Reinicia la carga
Stop	Boolean	Detiene la ejecución de cualquier configuración
Modo de operación		Elección del modo de operación
Modo conf		Indicador del modo de operación configurado
Rango de medición		Rango de medición de los distintos modos
status_carga	String	Código de error

C.2. Variables compartidas de control de la fuente programable

Tabla C.2: Variables compartidas de control de la fuente programable DC.

Variable	Tipo	Descripción
BETA	Double	Número de repeticiones para CCD y CRD
Corriente_cvcc		Corriente para el modo de salida constante
Corriente_list		Corriente en el subprograma list del modo programas
FFS		FF del modo SANDIA
I SlewRate		Tasa de cambio de la corriente
Imp		Corriente máxima
IRR		Corriente
IRR_REF		Corriente de
Isc		Corriente de cortocircuito
PMP		Corriente máxima para el modo CV
Tiempo		Inductancia en serie equivalente
TMP		Potencia constante para la carga L1
TMP_REF		Potencia constante para la carga L2
V SlewRate		Tasa de cambio del voltaje
V_END		Voltaje final del subprograma step
V_START		Voltaje inicial del subprograma step
Vmp		Voltaje máximo
Voc		Voltaje en cortocircuito
Voltaje_cvcc		Voltaje para el modo de salida constante
Voltaje_list		Voltaje para el subprograma list del modo programas
array mandado	Array	Array para el subprograma program VI
Table control	Table	Tabla de ingreso para dicho subprograma
ABORT	Boolean	Cancela la ejecución de cualquier modo de operación
CLEAR		Elimina todos los programa almacenados
ejec_fuente		Indicador de si la fuente esta en ejecución
ingresar		Habilita el cambio de configuración
OFF		Apaga la salidas en el modo salida constante
ON		Enciende la salida en el modo salida constante
reset_fuente		Reinicia la fuente
SAVE		Guarda el estado actual de la fuente
START		Inicia a correr un programa
STOP		Detiene la ejecución de un programa
Tiempo	Uint16	Tiempo de duración del subprograma step
Modos de salida		Subprograma a ejecutar en el modo salida constante
N. Secuencia		Número de secuencia a configurar en list
PROGRAMA		Subprograma a ejecutar en el modo programas
Repeticiones		Número de repeticiones en list
FF	String	Indicador del modo de operación configurado
Modo fuente		Modo de operación de la fuente
modo ope_fue		Modo de operación configurado o ejecutando
status fuente		Código de error de la fuente
Tipo		Tipo de secuencia en el subprograma list
Trigger		Trigger en el subprograma list

C.3. Variables compartidas de control del electrolizador

Tabla C.3: Variables compartidas de control del Electrolizador.

Variable	Tipo	Descripción
000033	Boolean	Iniciar la producción de hidrógeno
000034		Detener la producción de hidrógeno
000035		Reiniciar Electrolizador

Apéndice D

D.1. Tabla de errores para fuente programable en DC

Tabla D.1: Tabla de errores para fuente programable en DC.

Code	Error Message	Code	Error Message
0	"No error"	-101	"Invalid character"
-102	"Syntax error"	-103	"Invalid separator"
-104	"Data type error"	-105	"GET not allowed"
-106	"Illegal parameter value"	-108	"Parameter not allowed"
-109	"Missing parameter"	-112	"Program mnemonic too long"
-113	"Undefined header"	-121	"Invalid character in number"
-123	"Numeric overflow"	-124	"Too many digits"
-131	"Invalid suffix"	-141	"Invalid character data"
-148	"Character data not allowed"	-151	"Invalid string data"
-158	"String data not allowed"	-202	"Setting conflict"
-203	"Data out of range"	-204	"Too much data"
-211	"Data stale"	-224	"Self-test failed"
-225	"Too many errors"	-226	"INTERRUPTED"
-227	"UNTERMINATED"	-228	"DEADLOCKED"
-229	"MEASURE ERROR"	-230	"Sequence overflow"
-231	"Sequence selected error"		

D.2. Tabla de errores para carga programable en DC

Tabla D.2: Tabla de errores para carga programable en DC.

Code	Error Message	Code	Error Message
0	"No error"	3	"Command Error"
1	"Data Format Error"	4	"Execution Error"
2	"Data Range Error"	5	"Too Many Errors"

D.3. Tabla de errores para Pila de hidrógeno

Tabla D.3: Tabla de errores para pila de hidrógeno.

Code	Error Message
00	No error
01	EEPROM memory failed
02	FC voltage too low
03	FC current too high
05	FC temperature too high
22	External battery voltage too low
30	Output voltage too high
32	Output short circuit
34	Set voltage fail
35	Set current fail
43	H2 leakage
48	H2 pressure too low

D.4. Tablas de errores para Electrolizador

Tabla D.4: States and Substate Map of the EL register 128 (LSB = substate, MSB = state).

Hexadecimal	State	Hexadecimal	Substate
0x10	Power On	0x10	_____
0x11	Stand By	0x10	Wait start command
		0x11	Wait power condition
		0x12	Restart with max pressure
		0x13	Delay for DC-DC
		0x14	Hydration
0x12	Ramp up	0x10	_____
0x13	Steady	0x10	_____
0x14	Ramp Down	0x10	Ramp Down phase 1
		0x11	Ramp Down phase 2
0x15	Purge	0x10	_____
0x16	Heating	0x10	_____
0x01	Error Status	0x10	Next substatus selection
		0x11	Error
		0x12	Alarm low water
		0x13	Alarm high temperature
		0x14	Alarm low temperature
		0x16	Alarm low battery

Tabla D.5: States and Substate Map of the Dryer Status register 219 (LSB = substate, MSB = state).

Hexadecimal	State	Hexadecimal	Substate
0x11	Stand By	0x10	Wait the output EL preasure to 0 bar
		0x11	Wait EL start command
0x12	Dryer 0	0x10	
0x13	Dryer 1	0x10	
0x14	Leak Test	0x10	EL leak test configuration
		0x11	Dryer leak test configuration

Tabla D.6: Dryer Error Word (register 220).

Address	Error	Valor registro	Valor decimal
220	Temp Sens 1	0000000000000001	1
	Temp Sens 2	0000000000000010	2
	Heater 1	0000000000000100	4
	Heater 2	0000000000001000	8
	Press. Switch 0	0000000000010000	16
	Press. Switch 1	0000000000100000	32
	Dr. Fan Error	0000000001000000	64

Tabla D.7: Error word (register 133).

Address	Error	Valor registro	Valor decimal
133	Flow Switch	0000000000000001	1
	Fan	0000000000000010	2
	Press. Switch	0000000000000100	4
	Water level sensor	0000000000001000	8
	Stack Current	0000000000010000	16
	Stack Voltage	0000000000100000	32
	Leak Stack	0000000010000000	128
	Refill	0000001000000000	512
	Press. Sensor	0000100000000000	2048
	Temperature Sensor	0001000000000000	4096
	Dryer	0010000000000000	8192
	Leak Dryer	0100000000000000	16384
	Water Purifier	1000000000000000	32768

Tabla D.8: Alarm word (register 134).

Address	Alarm	Valor registro	Valor decimal
134	High Temperature	0000000000000001	1
	Low Water	0000000000000010	2
	Low Temperature	0000000000000100	4
	Low Battery	0000000000001000	16
	No Modbus	0000000000010000	32

Apéndice E

E.1. Esquema de conexiones del Laboratorio Micro-Red

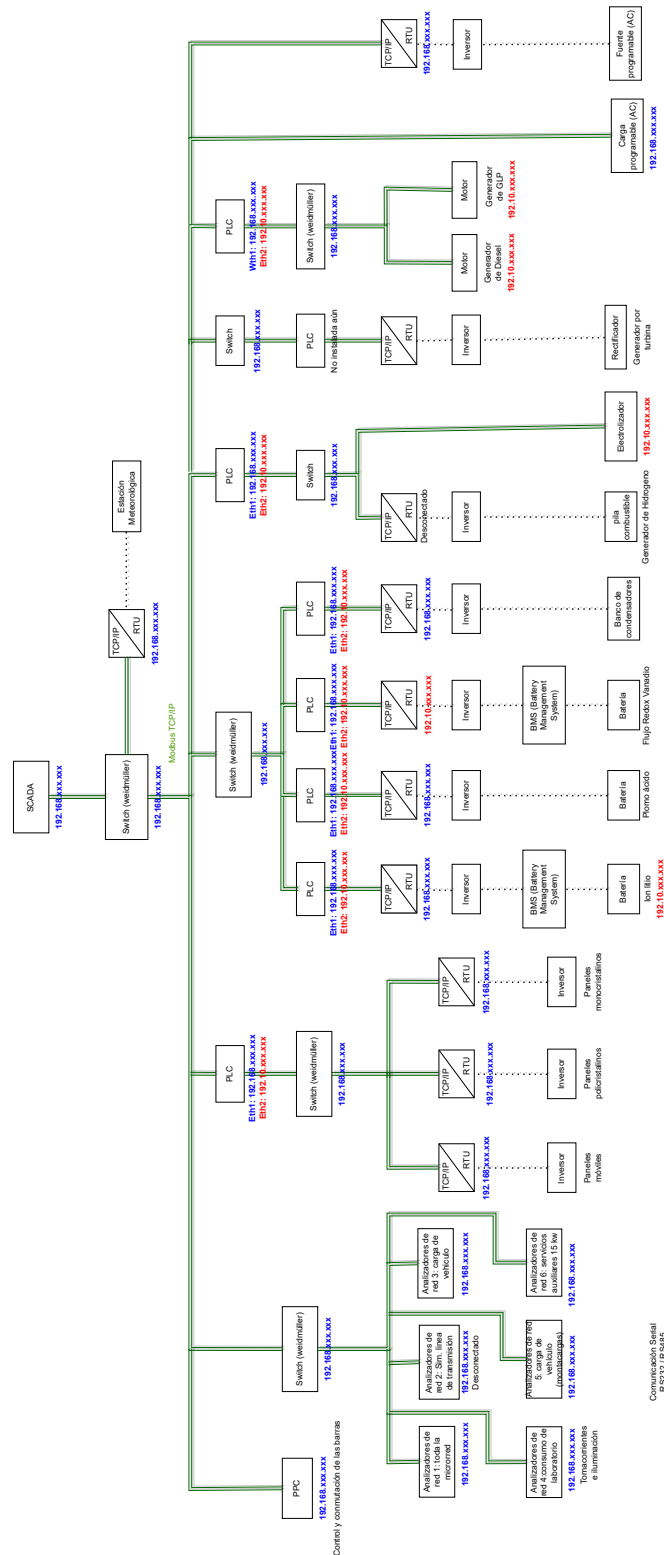


Figura E.1: Esquema Laboratorio Micro-Red.

E.2. Diagrama de procesos UML

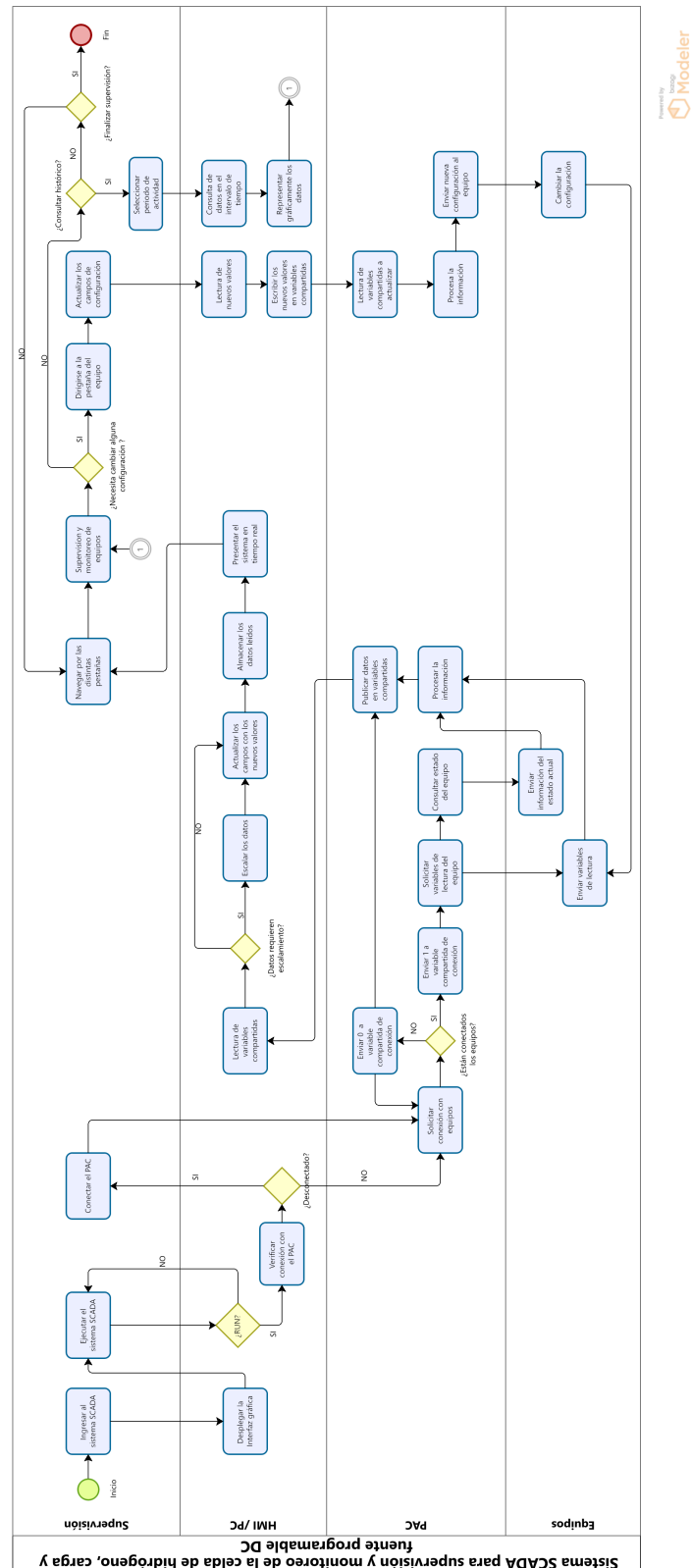


Figura E.2: Diagrama UML de procesos para sistema SCADA implementado.

Apéndice F

F.1. Acercamiento al lazo de establecimiento de conexión

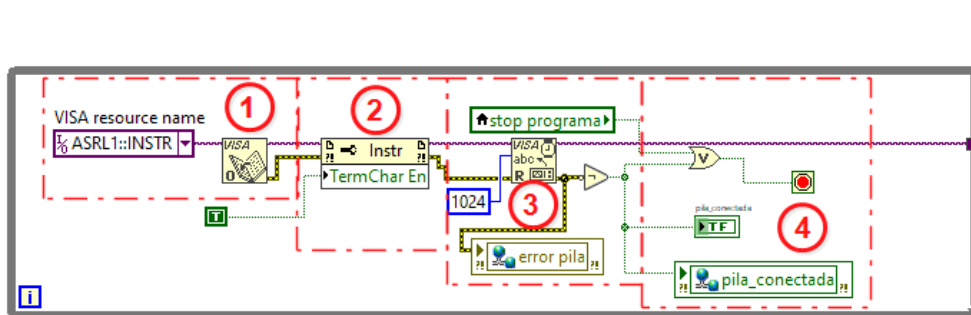


Figura F.1: Lazo de establecimiento de conexión.

F.2. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la pila de hidrógeno

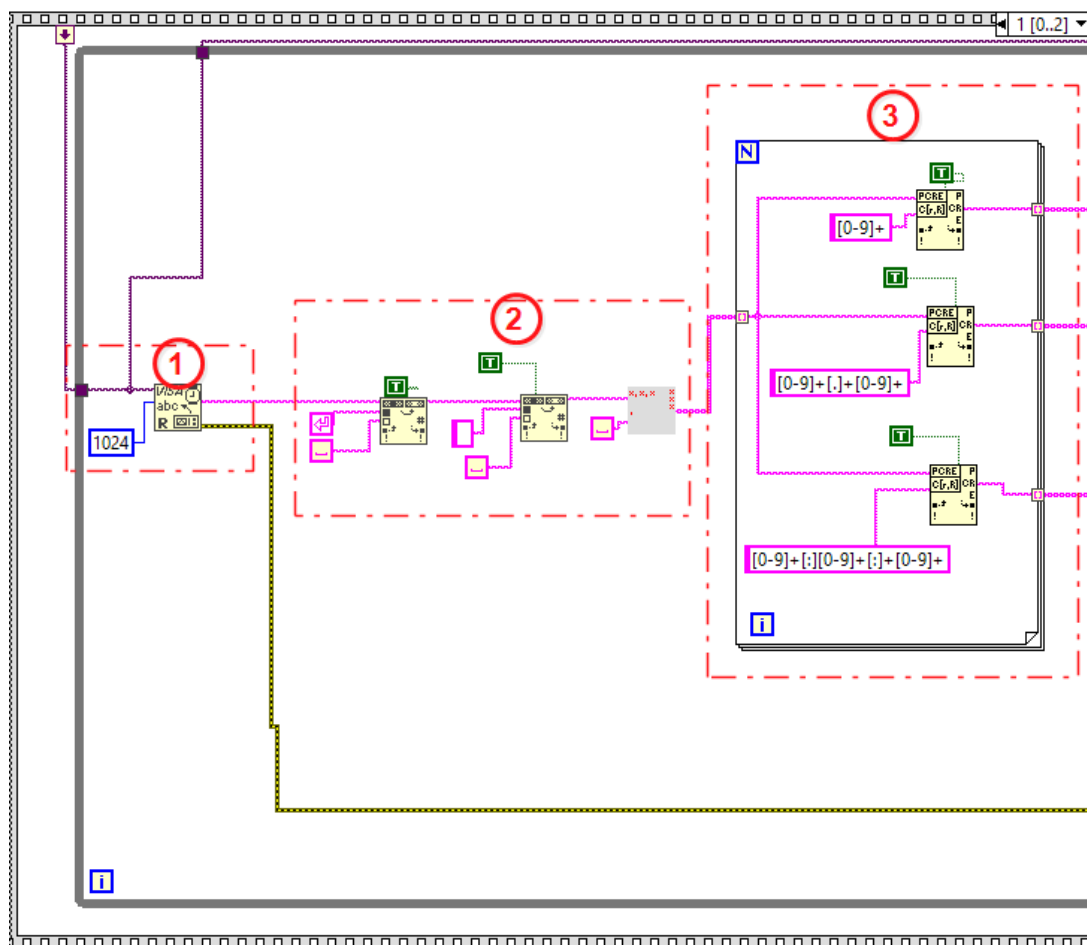


Figura F.2: Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno 1/2.

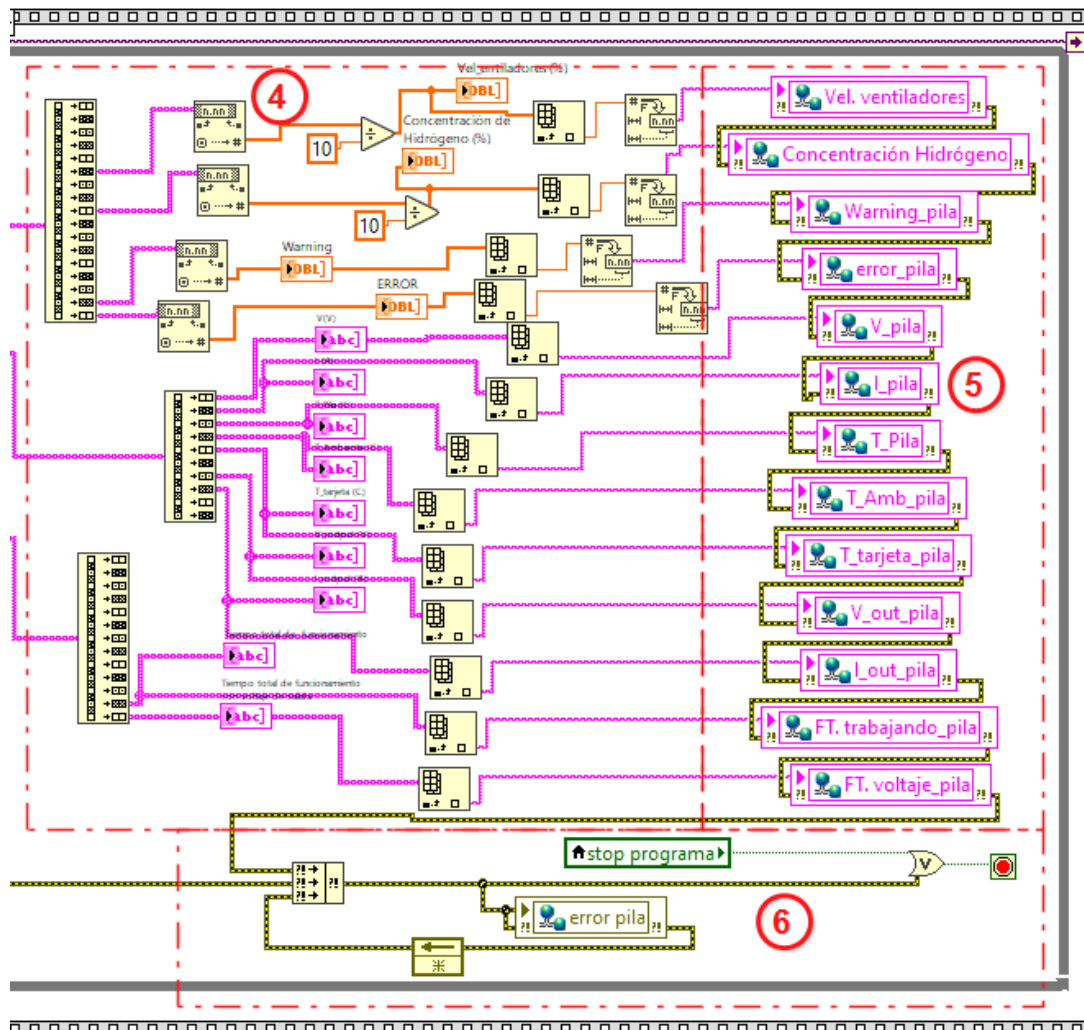


Figura F.3: Proceso de supervisión y monitoreo de la pila de hidrógeno 2/2.

Apéndice G

G.1. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la carga programable DC

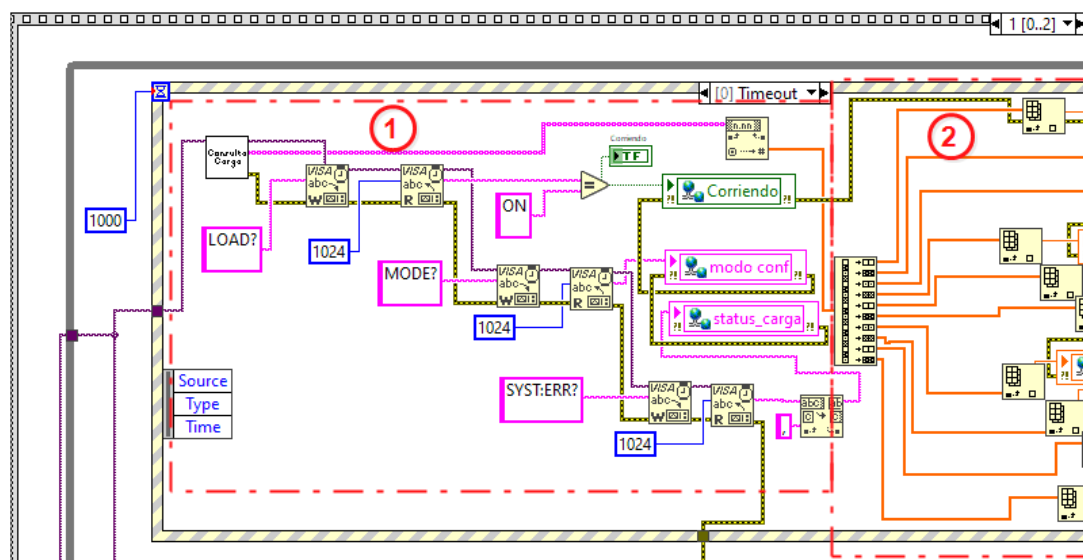


Figura G.1: Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 1/5.

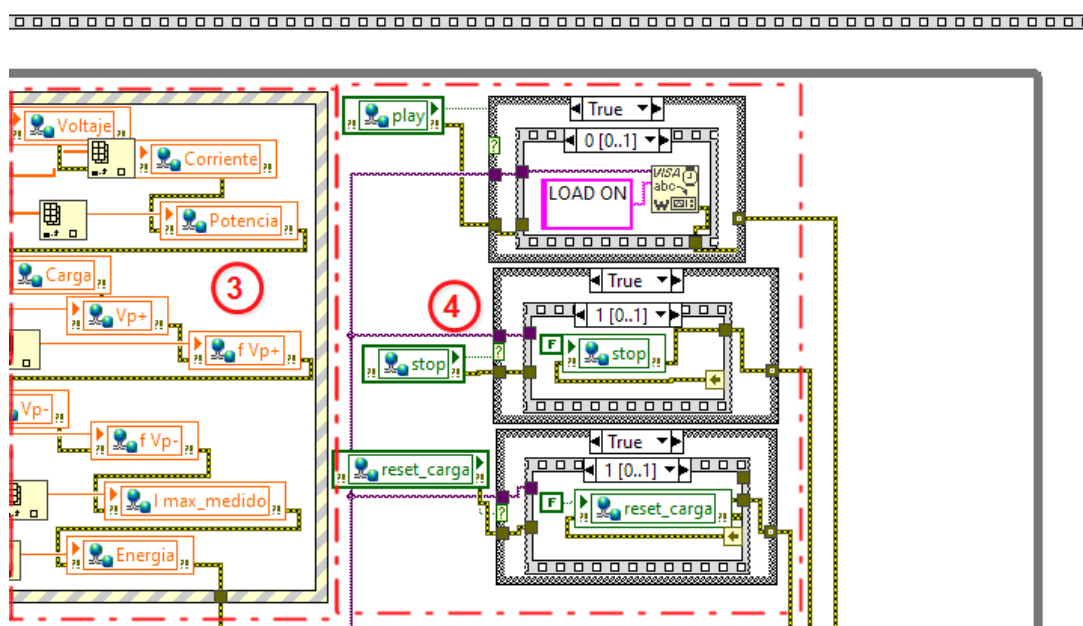


Figura G.2: Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 2/5.

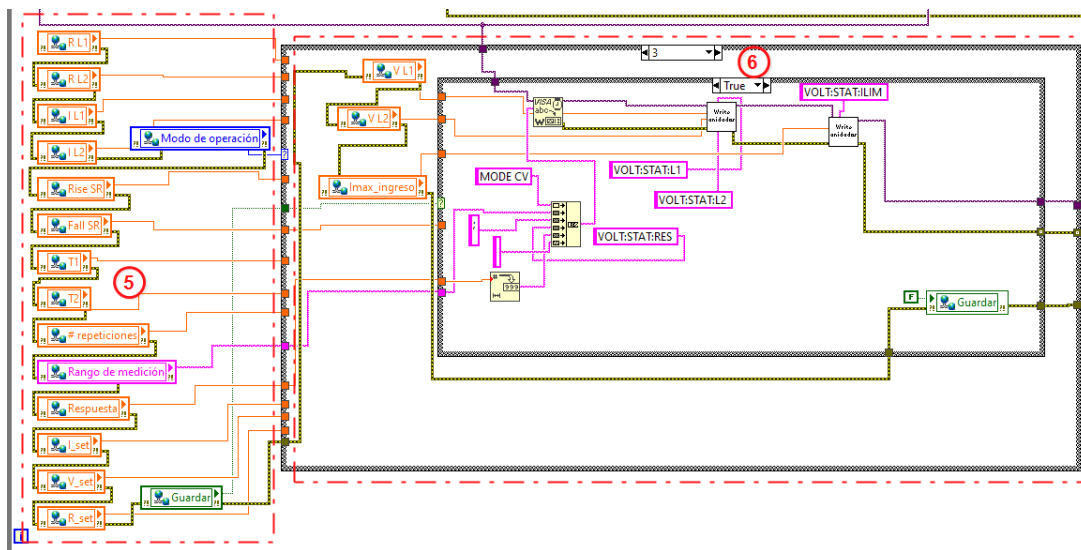


Figura G.3: Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 3/5.

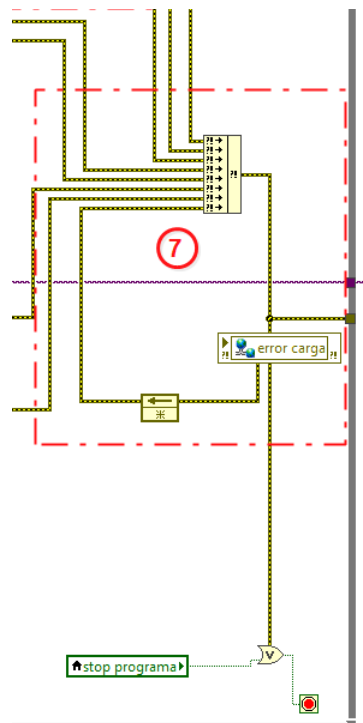


Figura G.4: Proceso de supervisión y monitoreo de la carga programable DC 4/5.

Apéndice H

H.1. Fragmentación del proceso de control y supervisión de la fuente programable DC

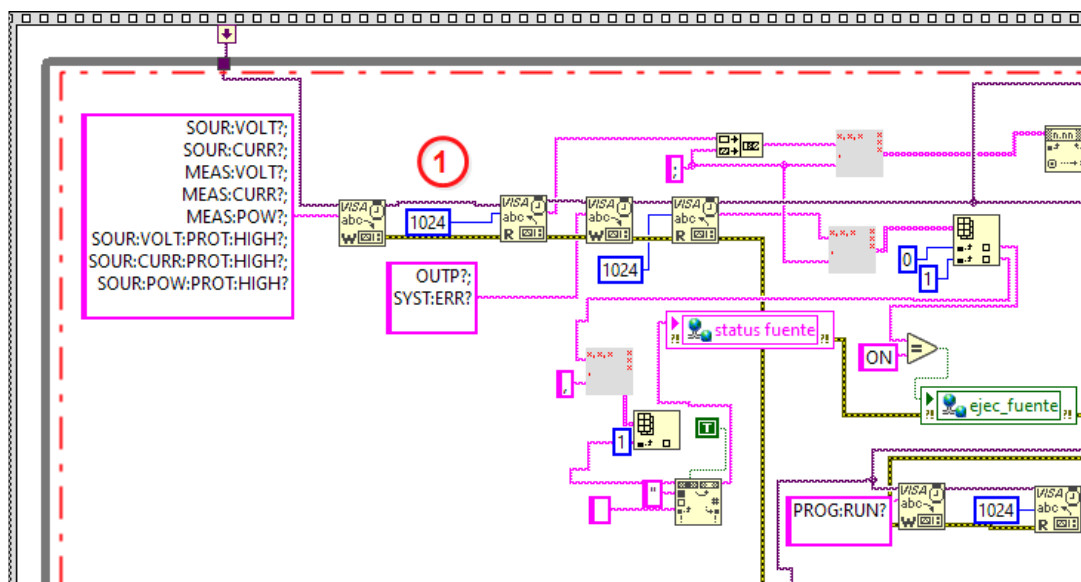


Figura H.1: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 1/5.

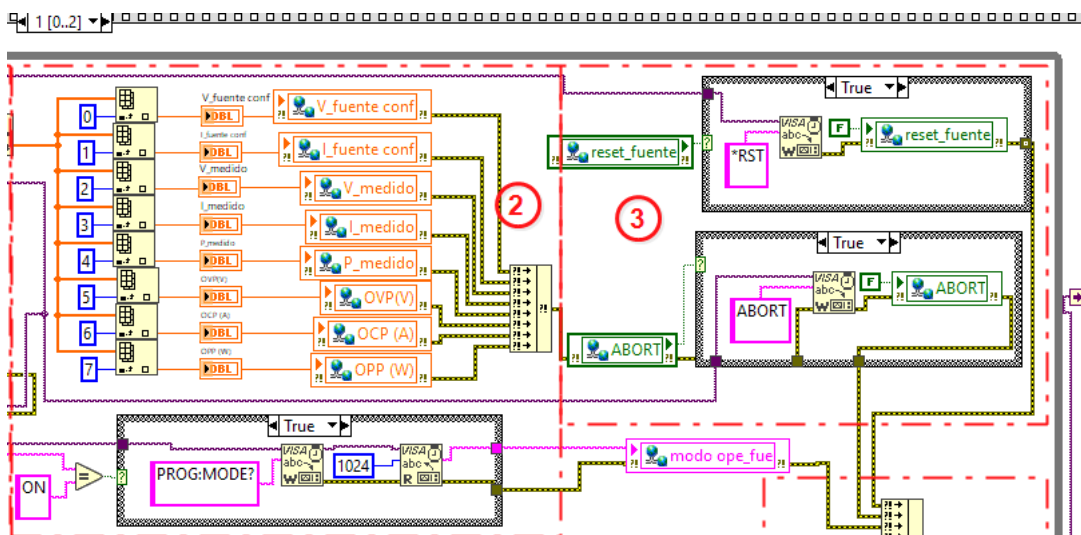


Figura H.2: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 2/5.

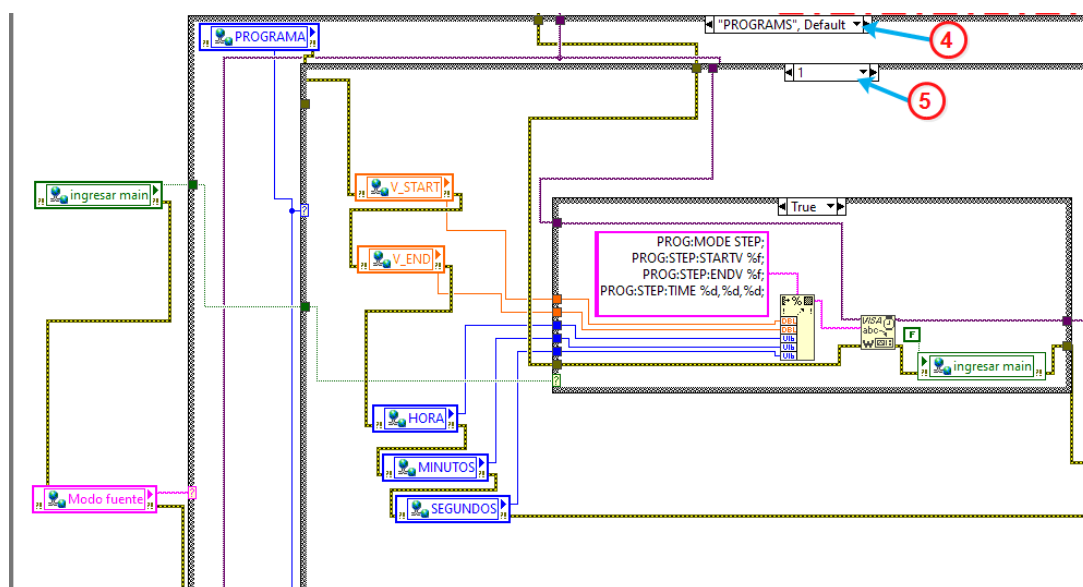


Figura H.3: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 3/5.

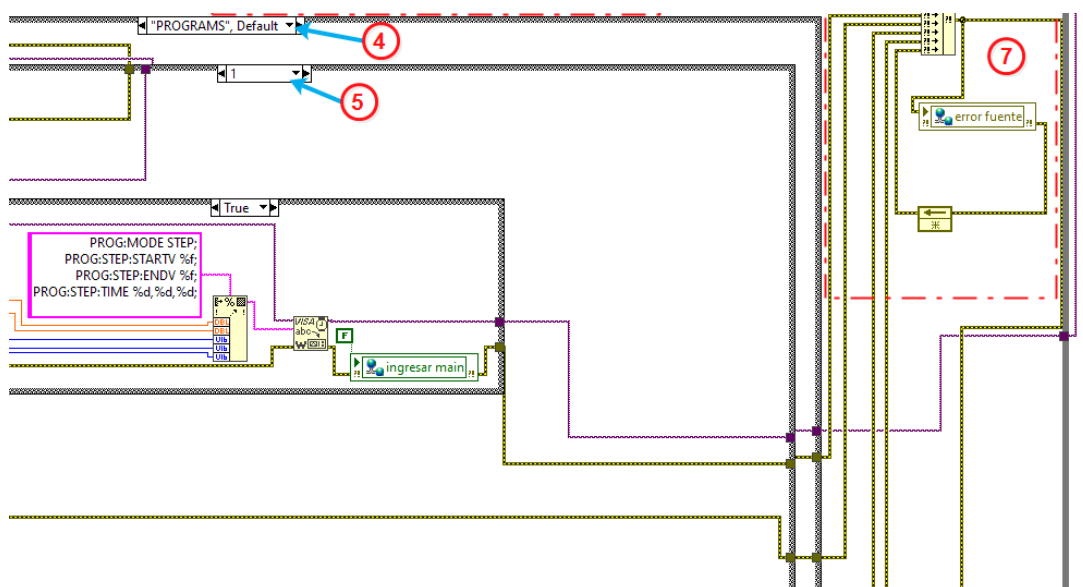


Figura H.4: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 4/5.

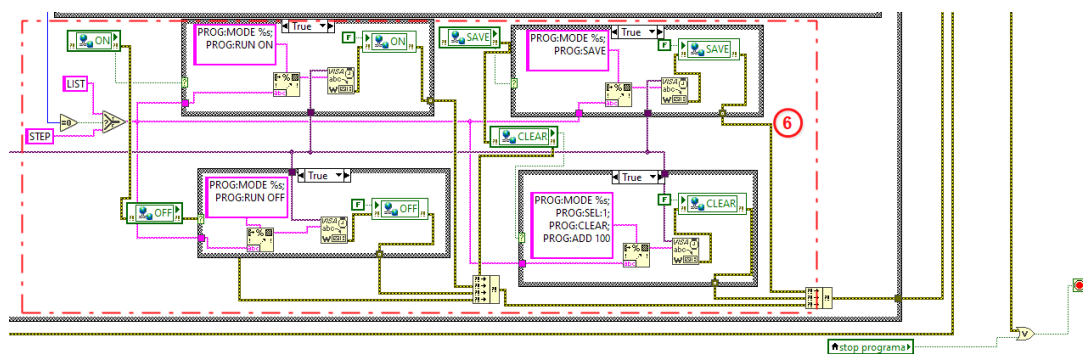


Figura H.5: Proceso de supervisión y monitoreo de la fuente programable DC 5/5.

Referencias

- [1] I. González, A. J. Calderón, y J. M. Portalo, “Innovative Multi-Layered Architecture for Heterogeneous Automation and Monitoring Systems: Application Case of a Photovoltaic Smart Microgrid,” *Sustainability*, vol. 13, num. 4, p. 2234, Ene. 2021, number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2234>
- [2] A. A. Jabbar, A. Elrayyah, M. Z. C. Wanik, A. P. Sanfilippo, y N. K. Singh, “Development of Hybrid AC/DC Laboratory-scale Smart Microgrid Testbed with Control & Monitoring System Implementation in LabVIEW,” in *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, Bangkok, Thailand, Mar. 2019, pp. 889–894. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8715942>
- [3] M. B. Nasir, A. Hussain, K. A. K. Niazi, y M. Nasir, “An Optimal Energy Management System (EMS) for Residential and Industrial Microgrids,” *Energies*, vol. 15, num. 17, p. 6266, Ene. 2022, number: 17 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6266>
- [4] S. Jaloudi, “Communication Protocols of an Industrial Internet of Things Environment: A Comparative Study,” *Future Internet*, vol. 11, num. 3, p. 66, Mar. 2019, number: 3 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/3/66>
- [5] A. Cagnano, H. H. R. Sherazi, y E. D. Tuglie, “Communication system architecture of an industrial-scale microgrid: A case study,” *Internet Technology Letters*, vol. 2, num. 6, p. e126, 2019, _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/itl2.126>. [En línea]. Disponible: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/itl2.126>
- [6] A. J. C. Godoy, I. G. Pérez, J. M. P. Calero, y M. C. Godoy, “Ethernet-based monitoring systems for renewable energy-hydrogen microgrids,” in *XLII Jornadas de Automática*. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2021, pp. 190–196, accepted: 2021-08-24T10:59:27Z Journal Abbreviation: Sistemas de

- monitorización basados en Ethernet para microgrids de energía renovable-hidrógeno. [En línea]. Disponible: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/28305>
- [7] S. Figueroa-Lorenzo, J. Añorga, y S. Arrizabalaga, “A Role-Based Access Control Model in Modbus SCADA Systems. A Centralized Model Approach,” *Sensors*, vol. 19, num. 20, p. 4455, Ene. 2019, number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/20/4455>
- [8] A. R. Penin, *Sistemas SCADA*, 3ra ed. España: Marcombo, Dic. 2011, google-Books-ID: cNQfjbBcUq8C. [En línea]. Disponible: https://books.google.es/books?id=cNQfjbBcUq8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbv_vpt_reviews#v=onepage&q&f=false
- [9] A. Daneels y W. Salter, “What is SCADA?” CERN, Switzerland, pp. 418–436, 1999. [En línea]. Disponible: <https://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf>
- [10] C. A. Vargas Salgado, J. Águila León, C. D. Chiñas Palacios, y D. Alfonso Solar, “Supervisory Control And Data Acquisition system applied to a researching purpose microgrid based on Renewable Energy,” *International Conference on Innovation, Documentation and Education*, Feb. 2021. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/161918>
- [11] E. J. S. Cabrera, S. Palaguachi, G. A. León-Paredes, P. L. Gallegos-Segovia, y O. G. Bravo-Quezada, “Industrial Communication Based on MQTT and Modbus Communication Applied in a Meteorological Network,” in *Advances in Emerging Trends and Technologies*, ser. Advances in Intelligent Systems and Computing, M. Botto-Tobar, O. S. Gómez, R. Rosero Miranda, y A. Díaz Cadena, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 29–41. [En línea]. Disponible: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-63665-4_3
- [12] N. Nadgauda, S. A. Muthukumaraswamy, y S. U. Prabha, “Smart Automated Processes for Bottle-Filling Industry Using PLC-SCADA System,” in *Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability*, ser. Smart Innovation, Systems and Technologies, A. Reddy, D. Marla, M. Simic, M. N. Favorskaya, y S. C.

- Satapathy, Eds. Singapore: Springer, 2020, pp. 693–702. [En línea]. Disponible: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1616-0_67
- [13] S.-I. Toc y A. Korodi, “Modbus-OPC UA Wrapper Using Node-RED and IoT-2040 with Application in the Water Industry,” in *2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. Subotica, Serbia: 978-1-5386-6841-2, Sep. 2018, pp. 000 099–000 104, iSSN: 1949-0488. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8524749>
- [14] M. Nicola, C. Nicola, M. Duță, y D. Sacerdotianu, “SCADA Systems Architecture Based on OPC and Web Servers and Integration of Applications for Industrial Process Control,” *International Journal of Control Science and Engineering* 2018, Ene. 2018. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/331589512_SCADA_Systems_Architecture_Based_on_OPC_and_Web_Servers_and_Integration_of_Applications_for_Industrial_Process_Control
- [15] K. Bagal, C. Kadu, B. Parvat, y P. Vikhe, “PLC Based Real Time Process Control Using SCADA and MATLAB,” in *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, Pune, India, Ago. 2018, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8697491>
- [16] M. Daneshvar, H. Eskandari, A. B. Sirous, y R. Esmailzadeh, “A novel techno-economic risk-averse strategy for optimal scheduling of renewable-based industrial microgrid,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 70, p. 102879, Jul. 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S210670721001694>
- [17] J.-S. Kim, S. M. So, J.-T. Kim, J.-W. Cho, H.-J. Park, F. H. Jufri, y J. Jung, “Microgrids platform: A design and implementation of common platform for seamless microgrids operation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 167, pp. 21–38, Feb. 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779618303377>
- [18] J. Águila León, C. A. Vargas Salgado, C. D. Chiñas Palacios, y E. J. Hurtado Pérez, “Design and Deployment of a Web SCADA for an Experimental

- Microgrid Base on Open Source Software,” in *Proceedings INNODOCT/20. International Conference on Innovation, Documentation and Education*. Valencia, Spain: Editorial Universitat Politècnica de València, Feb. 2021, pp. 165–173, accepted: 2021-02-19T12:43:34Z ISSN: 2695-8554. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/161917>
- [19] D. Thomas, “Evolution of edge control: Industrial automation’s future lies with edge controllers, which combine programmable logic controller/programmable automation controller functions and computing to deliver edge analytics and real-time reactions to insights.” *Control Engineering*, vol. 69, num. 1, pp. 17–20, Ene. 2022, publisher: CFE Media LLC. [En línea]. Disponible: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=00108049&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA696071714&sid=googleScholar&linkaccess=abs>
- [20] W. Guoqing, Y. E. Hong, Q. Jin, Y. Huaxin, y L. I. U. Chenghuan, “A Multi-core Heterogeneous Programmable Automation Controller System of Construction Machine,” *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, num. 12, pp. 7230–7234, Dic. 2013, number: 12. [En línea]. Disponible: <http://journal.esperg.com/index.php/tijee/article/view/2897>
- [21] A. C. V. Nascimento, H. A. Oliveira, J. G. De Matos, y L. A. De Souza Ribeiro, “Dispatchable power source control for battery bank charging through a bidirectional grid forming converter in isolated microgrid,” in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, Lima, Peru, Sep. 2021, pp. 1–5, iSSN: 2643-8798. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9543077>
- [22] M. Xu, J. M. David, S. H. Kim y otros, “The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges,” *International journal of financial research*, vol. 9, num. 2, pp. 90–95, 2018.
- [23] A. Stăncioiu, “The fourth industrial revolution ‘industry 4.0’,” *Fiabilitate Și Durabilitate*, vol. 1, num. 19, pp. 74–78, 2017.
- [24] V. S. Chakravarthi, *Internet of Things and M2M Communication Technologies: Ar-*

- chitecture and Practical Design Approach to IoT in Industry 4.0*, 1ra ed. Springer, 2021.
- [25] M. Cruz, P. Oliete, Morales, C. Christian; González, B. Cendón, y A. Hernández, *Las tecnologías IoT dentro de la industria conectada 4.0*, EOI y PWC, Eds. Madrid, Spain: EOI Escuela de Organización Industrial, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/78592/las-tecnologias-iot-dentro-de-la-industria-conectada-40>
- [26] I. Karabegović, R. Turmanidze, y P. Dašić, “Robotics and Automation as a Foundation of the Fourth Industrial Revolution - Industry 4.0,” in *Advanced Manufacturing Processes*, ser. Lecture Notes in Mechanical Engineering, V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, y P. Dasic, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 128–136.
- [27] R. Anandan, S. Gopalakrishnan, S. Pal, y N. Zaman, *The Industrial Internet of Things (IIoT): Intelligent Analytics for Predictive Maintenance*, ser. Advances in Learning Analytics for Intelligent Cloud-IoT Systems. Wiley-Scrivener, 2022.
- [28] G. S. e. Sam Goundar (editor), J. Avanija (editor), *Innovations in the Industrial Internet of Things (IIoT) and Smart Factory*, ser. Advances in Computer and Electrical Engineering. Engineering Science Reference, 2021.
- [29] W. Caesarendra, B. Pappachan, T. Wijaya, D. Lee, T. Tjahjowidodo, D. Then, y O. Manyar, “An AWS Machine Learning-Based Indirect Monitoring Method for Deburring in Aerospace Industries Towards Industry 4.0,” *Applied Sciences*, vol. 8, p. 2165, Nov. 2018.
- [30] “The new way of manufacturing: Introduction to IIoT - Sensolus: Asset tracking solution to streamline logistics processes,” Abr. 2022, section: IoT Academy. [En línea]. Disponible: <https://www.sensolus.com/industrial-internet-of-things/>
- [31] Z. Mahmood, *The Internet of Things in the Industrial Sector: Security and Device Connectivity, Smart Environments, and Industry 4.0*, 1ra ed., ser. Computer Communications and Networks. Springer International Publishing, 2019.

- [32] A. B. Herrero, Pablo San Segundo y Rebeca, “1.3 Automatización industrial | Introducción a la Automatización Industrial.” [En línea]. Disponible: https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/automatizacionindustrial.html
- [33] M. Rahman, A. Fentaye, V. Zaccaria, I. Aslanidou, E. Dahlquist, y K. Kyprianidis, “A Framework for Learning System for Complex Industrial Processes,” in *AI and Learning Systems-Industrial Applications and Future Directions*, Feb. 2021.
- [34] R. Cupek, M. Drewniak, A. Ziębiński, y M. Fojcik, ““Digital Twins” for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, Nov. 2019.
- [35] S. Vitturi, C. Zunino, y T. Sauter, “Industrial Communication Systems and Their Future Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, num. 6, pp. 944–961, Jun. 2019, conference Name: Proceedings of the IEEE.
- [36] T. Sauter, “The Three Generations of Field-Level Networks—Evolution and Compatibility Issues,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3585–3595, Dic. 2010.
- [37] J. D. I. Bogdan M. Wilamowski, *Industrial Communication Systems*, 2da ed., ser. The Industrial Electronics Handbook. CRC Press, 2011.
- [38] M. P. KTM Udayanga Hemapala, *Smart Microgrid Systems: Advanced Technologies*, 1ra ed. CRC Press, 2022.
- [39] E. Janaka, J. Nick, L. Kithsiri, W. Jianzhong, y a. Akihiko Yokoyam, *Smart Grid: Technology and Applications*, 1ra ed. John Wiley Sons, 2012.
- [40] Z. F. Li Fusheng, Li Ruisheng, *Microgrid Technology and Engineering Application*, 1ra ed. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2015.
- [41] M. S. T. J. D. Mcdonald, *Power system SCADA and smart grids*. CRC Press, 2015.
- [42] J. Payne, “How to choose the best controller for each application: Consider the features and typical applications for industrial controllers to understand what type

- of controller fits each application. Do you need a programmable logic controller (PLC), programmable automation controller (PAC), or industrial PC (IPC)? See comparison tables for PLCs, PACs, and IPCs,” *Control Engineering*, vol. 64, num. 1, pp. 28–31, Ene. 2017, publisher: CFE Media LLC. [En línea]. Disponible: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=00108049&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA489758078&sid=googleScholar&linkaccess=abs>
- [43] T. Walter y I. Bell, “Where others fear to tread [programmable automation controllers (PACs) and programmable logic controllers (PLCs)],” *Computing and Control Engineering*, vol. 17, num. 2, pp. 26–29, Abr. 2006, publisher: IET Digital Library. [En línea]. Disponible: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/cce_20060203
- [44] “sbRIO-9642.” [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.sbrio-9642.html>
- [45] D. Navarro Chamorro, “Gestión de energía para la microrred en Cuenca (Ecuador) usando control predictivo,” Ph.D. dissertation, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2020, accepted: 2021-03-19T17:50:57Z. [En línea]. Disponible: <https://idus.us.es/handle/11441/106370>
- [46] A. P. Chica Gallardo y J. A. Guamán Argudo, “Modelo de estado estacionario de la microrred del laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca,” bachelorThesis, Universidad de Cuenca, 2017, accepted: 2017-11-28T13:28:41Z. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28606>
- [47] J. L. Espinoza Abad, R. E. Sempertegui Alvarez, y L. G. Gonzalez Morales, *_ESMicro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador*. IEEE, 2018, accepted: 2018-07-13T13:23:07Z ISSN: 2573-0770 Journal Abbreviation: Micro red de laboratorio como una herramienta para la investigación sobre la no - convencionales de energía de fuentes en Ecuador Publication Title: 2017 IEEE international autumn meeting on power, electronics and computing (ROPEC). [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30708>

- [48] Heliocentris, “Electrolizador ELS500 User’s Manual,” Heliocentris Italy Srl, Italy, User’s Manual, Nov. 2015.
- [49] H. support, “ECOBIX-MR30S1 Reformer Integrated Fuel Cell UPS Solutions,” Horizon Fuel Cell Technologies, Los Angeles, User’s Manual, Ene. 2016.
- [50] —, “T-Series Fuel Cell System User Manual,” Horizon Fuel Cell Technologies, Los Angeles, User’s Manual, Ene. 2014.
- [51] clantecnologica, “T-SERIES 3,000W fuel cell system-TYPE T30S1,” clantecnologica, Sevilla, España, Tech. Rep., 2014.
- [52] C. support, “High Power Electronic Load 63200A Series Operation and Programming Manual,” Chroma ATE INC, Taiwan, User’s Manual, Abr. 2020.
- [53] “HighPowerDCElectronicLoad Model63200ASeries.” [En línea]. Disponible: https://www.chromaate.com/en/product/high_power_dc_electronic_load_63200a_1
- [54] C. support, “Programmable DC Power Supply (with Solar Array Simulation) 62000H Series Operating and Programming Manual,” Chroma ATE INC, Taiwan, User’s Manual, Mar. 2021.
- [55] —, “Solar Array Simulation Soft Panel 62000H Series User’s Manual,” Chroma ATE INC, Taiwan, User’s Manual, Ago. 2014.
- [56] “SolarArraySimulator Model62000H-SSeries.” [En línea]. Disponible: https://www.chromaate.com/en/product/solar_array_simulator_62000h_s_series_205
- [57] N. G. Guailas Dominguez y H. P. Tigre Avila, “Demostración de funcionamiento del sistema SCADA - Micro-red Balzay,” May 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=DoOPGnc32OM>