

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL PARA  
UNA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA KLORMAN ALIMENTADA POR  
ENERGIA FOTOVOLTAICA.**



**ANYI ALEJANDRA RIVERA SANCHEZ  
SEBASTIÁN ANTONIO PALACIOS MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2019**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL PARA  
UNA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA KLORMAN ALIMENTADA POR  
ENERGÍA FOTOVOLTAICA.**

**ANYI ALEJANDRA RIVERA SANCHEZ  
SEBASTIÁN ANTONIO PALACIOS MUÑOZ**

**Trabajo en modalidad de proyecto de investigación presentado como  
requisito para optar al título de Ingeniero Físico**

**Director**

**Ph.D. Rubiel Vargas Cañas**

**Co-Director**

**MsC. Rodrigo Montaña Fuentes**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2019**

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Definición del problema . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	3
1.4. Objetivos . . . . .	3
1.4.1. Objetivo general . . . . .	3
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
2.1. Marco conceptual . . . . .	4
2.1.1. Potabilización de agua . . . . .	4
2.1.2. Procesos de potabilización de agua . . . . .	4
2.1.3. Energía fotovoltaica . . . . .	9
2.1.4. Sistema de supervisión y control . . . . .	14
2.2. Marco referencial . . . . .	15
2.2.1. Referencia internacional . . . . .	15
2.2.2. Referencia nacional . . . . .	16
2.2.3. Referencia regional . . . . .	19
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>21</b>
3.1. Reconocimiento del equipo . . . . .	22
3.2. Caracterización eléctrica del equipo y componentes del sistema . . . . .	24
3.2.1. Cargas . . . . .	24
3.2.2. Sensores y actuadores . . . . .	26
3.2.3. Sensores . . . . .	26
3.3. Implementación del sistema fotovoltaico de prueba . . . . .	30
3.4. Cálculo del calibre del cable . . . . .	31
3.5. Caracterización de sensores . . . . .	32
3.6. Ajustes . . . . .	36
3.7. Diseño e implementación del sistema se control . . . . .	41
3.8. Interfaz . . . . .	43
3.8.1. Pantalla principal . . . . .	44
3.8.2. Gestión energética . . . . .	44
3.8.3. Estado de los componentes eléctricos y alertas . . . . .	44
3.9. Evaluación . . . . .	44

<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>45</b>
4.1. Dimensionado de las cargas, sensores y actuadores . . . . .	45
4.1.1. Caracterización de la carga (Bomba sumergible) . . . . .	45
4.1.2. Caracterización y calibración de sensores y actuadores . . . . .	46
4.1.3. Implementación del sistema de sensado de variables . . . . .	49
4.2. Implementación del sistema fotovoltaico . . . . .	49
4.3. Diseño e implementación del sistema de control . . . . .	54
4.3.1. Casos de control eléctrico . . . . .	54
4.3.2. Casos de control de agua . . . . .	59
4.4. Interfaz gráfica . . . . .	65
4.4.1. Pantalla principal . . . . .	65
4.4.2. Pantalla gestión energética . . . . .	65
4.4.3. Pantalla control eléctrico y alarmas . . . . .	66
4.4.4. Pantalla control de agua y alertas . . . . .	66
4.5. Evaluación . . . . .	67
<b>Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>69</b>
<b>Anexos</b>	<b>72</b>

# Índice de figuras

2.1. Procesos de potabilización de agua . . . . .	5
2.2. Proceso de potabilización planta convencional . . . . .	5
2.3. Proceso de potabilización por filtración directa . . . . .	8
2.4. Filtración lenta en arena [35] . . . . .	8
2.5. Planta compacta [36] . . . . .	9
2.6. Sistema fotovoltaico [37] . . . . .	10
2.7. Modelo eléctrico de una célula solar . . . . .	10
2.8. Componentes de una batería ácido-plomo[38]. . . . .	12
2.9. Modelo eléctrico de una batería[17] . . . . .	13
2.10. Esquema eléctrico de un regulador de carga[18]. . . . .	14
2.11. Esquema general sistema de supervisión y control . . . . .	15
3.1. Desarrollo metodológico . . . . .	21
3.2. Planta potabilizadora Klorman 2015 . . . . .	23
3.3. Sistema de filtración[13]. . . . .	23
3.4. Sistema de refinación[13]. . . . .	24
3.5. Sistema de cloración . . . . .	24
3.6. Bomba sumergible[14] . . . . .	25
3.7. Electroválvulas normalmente abierta (gris) y normalmente cerrada (negra) . . . . .	25
3.8. Arduino Mega 2560 . . . . .	26
3.9. Sensor FZ0430 . . . . .	27
3.10. Sensor ACS712 . . . . .	27
3.11. Sensor de flujo YF-S201 . . . . .	28
3.12. Sensor de pH 4502C . . . . .	28
3.13. Sensor de turbidez SEN0189 . . . . .	29
3.14. Tarjeta de relés de 8 canales . . . . .	29
3.15. Sistema fotovoltaico de prueba [33]. . . . .	30
3.16. Batería 12V/35Ah. . . . .	31
3.17. Regulador de carga MPPT. . . . .	31
3.18. Instrumentos caracterización . . . . .	33
3.19. Caracterización sensor de corriente. . . . .	33
3.20. Caracterización sensor de flujo [33]. . . . .	34
3.21. Caracterización sensores de pH . . . . .	34
3.22. Preparación soluciones tampón . . . . .	35
3.23. Caracterización sensor de turbidez . . . . .	35
3.24. Reductor de voltaje DC-DC . . . . .	36

3.25. Sistema fotovoltaico ajustado [33]. . . . .	39
3.26. Divisor de tensión . . . . .	40
3.27. Caracterización divisores de tensión . . . . .	40
3.28. Diagrama de control del sistema . . . . .	41
3.29. Diagrama de flujo sistema fotovoltaico . . . . .	42
3.30. Diagrama de control planta de tratamiento de agua . . . . .	43
3.31. Ventanas de visualización en la interfaz gráfica . . . . .	44
4.1. Curva característica bomba sumergible . . . . .	45
4.2. Curvas características divisor de tensión . . . . .	46
4.3. Curvas características sensor de corriente . . . . .	47
4.4. Curva característica sensor de flujo . . . . .	48
4.5. Curvas características sensor de pH . . . . .	48
4.6. implementación del sistema de sensado de variables. . . . .	49
4.7. Sistema fotovoltaico inicial . . . . .	50
4.8. Sistema implementado después del ajuste . . . . .	50
4.9. Prueba 26 de agosto 2019 . . . . .	51
4.10. Prueba 29 de agosto de 2019 . . . . .	52
4.11. Control eléctrico caso 0 . . . . .	55
4.12. Caso 1 eléctrico . . . . .	55
4.13. Caso 2 eléctrico . . . . .	56
4.14. Caso 3 eléctrico . . . . .	56
4.15. Caso 4 eléctrico . . . . .	57
4.16. Caso 5 eléctrico . . . . .	58
4.17. Caso 6 eléctrico . . . . .	58
4.18. Caso 0 control agua . . . . .	60
4.19. Caso 1 control agua . . . . .	60
4.20. Caso 2 control agua . . . . .	61
4.21. Caso 3 control agua . . . . .	62
4.22. Caso 4 control agua . . . . .	62
4.23. Caso 5 control agua . . . . .	63
4.24. Caso 6 control agua . . . . .	64
4.25. Caso 7 control agua . . . . .	64
4.26. Pantalla principal . . . . .	65
4.27. Pantalla gestión energética . . . . .	66
4.28. Pantalla control eléctrico y alarmas . . . . .	66
4.29. Pantalla control de agua y alarmas . . . . .	67
4.30. Sistema de supervisión y control . . . . .	67
4.31. Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 200 V nominales y 60C a 90C. . . . .	72

# Índice de tablas

2.1. Asignación del nivel de complejidad . . . . .	6
2.2. Periodo de diseño máximo . . . . .	6
2.3. Asignación del nivel de complejidad . . . . .	6
2.4. Comparación con los proyectos del marco de referencia . . . . .	19
3.1. Especificaciones bomba sumergible . . . . .	25
3.2. Especificaciones electroválvula . . . . .	26
3.3. Especificaciones arduino mega 2560 . . . . .	26
3.4. Especificaciones sensor FZ0430 . . . . .	27
3.5. Especificaciones sensor ACS712 . . . . .	27
3.6. Especificaciones sensor YF-S201 . . . . .	28
3.7. Especificaciones sensor pH . . . . .	28
3.8. Especificaciones sensor SEN0189 . . . . .	29
3.9. Especificaciones relés optoacoplados . . . . .	29
3.10. Especificaciones panel 24V . . . . .	30
3.11. Especificaciones regulador de carga MPPT . . . . .	31
3.12. Parámetros cálculo del calibre . . . . .	32
3.13. Caracterización sensor de turbidez . . . . .	35
3.14. Caso 1 diseño SFV . . . . .	37
3.15. Caso 2 diseño SFV . . . . .	38
3.16. Caso 3 diseño SFV . . . . .	38
3.17. Especificaciones Panel 12V . . . . .	38
3.18. Especificaciones Baterías 12V/20Ah . . . . .	39
4.1. Conversión de signos. . . . .	52
4.2. Casos de control eléctrico. . . . .	54
4.3. Caso 0 eléctrico. . . . .	54
4.4. Caso 1 eléctrico. . . . .	55
4.5. Caso 2 eléctrico. . . . .	56
4.6. Caso 3 eléctrico. . . . .	56
4.7. Caso 4 eléctrico. . . . .	57
4.8. Caso 5 eléctrico. . . . .	57
4.9. Caso 6 eléctrico. . . . .	58
4.10. Casos eléctricos de control. . . . .	58
4.11. Notación control de agua. . . . .	59
4.12. Caso 0 control agua. . . . .	59
4.13. Caso 1 control agua. . . . .	60
4.14. Caso 2 control agua. . . . .	61

4.15. Caso 3 control agua. . . . .	61
4.16. Caso 4 control agua. . . . .	62
4.17. Caso 5 control agua. . . . .	63
4.18. Caso 6 control agua. . . . .	64
4.19. Caso 7 control agua. . . . .	64

Resumen— Según la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos, sin embargo en Colombia el 28 % de la población rural carece de acueducto, por lo que se ven expuestos a contraer enfermedades ya que su fuente de agua son ríos y pozos[1]. Sumado a lo anterior, es necesario contar con fuentes eléctricas para garantizar el suministro del recurso en todas las regiones. Para esto es necesario contar con sistemas que garanticen el buen funcionamiento de dichas fuentes energéticas y el suministro del agua pueda ser continuo [2]. Este proyecto expone el desarrollo de un sistema de supervisión y control para una planta de tratamiento de agua compacta, para lo cual se midieron variables eléctricas y algunas variables del agua, con el fin de obtener el estado de los componentes eléctricos del sistema energético y conocer las condiciones del agua después del proceso de potabilización. Además del monitoreo continuo del sistema por medio de una interfaz usuario, que permite conocer el estado de todo el sistema, además de entregar alarmas, evitando daños en la planta y en el sistema energético.

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Contexto

El agua en condiciones no aptas para el consumo, puede transmitir enfermedades de alto riesgo para la salud como: El cólera, Hepatitis A, Dengue, Malaria, entre otras. Estas enfermedades pueden ser prevenidas fácilmente mediante la desinfección del agua. En este sentido todas las acciones para mejorar el acceso al agua potable, el saneamiento, y la gestión de los recursos hídricos, tiene un alto impacto en la prevención de enfermedades [3].

El problema no es solo el acceso al agua potable, también es de vital importancia que la población cuente con la cantidad mínima de agua potable al día. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), son necesarios entre 50L y 100L de agua por persona al día para cubrir sus necesidades básicas. Además, todas las personas tienen derecho a servicios de agua y saneamiento físicamente accesibles, éstos deben encontrarse dentro o cerca a su lugar de residencia, trabajo, las instituciones educativas o de salud, pues según la OMS, la fuente de agua debe encontrarse a menos de 1.000 metros del hogar y el tiempo de recogida no debe superar los 30 minutos [4]. Sumado a lo anterior, en zonas rurales, además de no contar con el servicio de acueducto y alcantarillado, el acceso al servicio eléctrico es limitado o carecen en su totalidad de este (zonas no interconectadas - ZNI), por lo que se busca usar fuentes no convencionales de energía, una de ellas, es la generación de energía por medio de paneles fotovoltaicos, estos elementos se convierten en una solución de fácil acceso e implementación, mejorando la calidad de vida de la población afectada, pero el uso de estas fuentes de energía no convencionales, requiere de sistemas de monitoreo con el fin de conocer el estado de sus componentes y tomar las acciones correctivas si se requiere, pero estos sistemas de monitoreo tienen un costo elevado, además, no integran métodos de control y garantizar el funcionamiento continuo de todos sus componentes.

## 1.2. Definición del problema

Teniendo en cuenta que Latinoamérica es el continente con la mayor cantidad de agua dulce en el mundo[1], es de esperar que este recurso llegue a toda su población, pero no es así, ya que en esta región se estima que 34 millones de personas no tienen acceso al agua potable[1]. Durante el periodo 2010-2015, aumentó el acceso a suministros de agua potable en un 3 %, y con esto se mejoran las condiciones de vida de ciudadanos que debían caminar durante largas jornadas para obtener el recurso o que tenían acceso a fuentes de agua no tratada. A pesar de estos avances, Colombia aún no logra asegurar agua potable para todos sus habitantes. Esto puede deberse al elevado costo para la implementación de acueducto y alcantarillado y el poco interés del estado en su gestión, según un estudio realizado por el Grupo Banco Mundial, el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) calcula que la ampliación de los servicios básicos de agua y saneamiento a las poblaciones desatendidas costaría 28.400 millones de dólares al año entre 2015 y 2030. Sumado a esto, es notoria la poca inversión en zonas rurales, por ejemplo, 74 de cada 100 personas pueden acceder a suministros de agua potable, mientras que en zonas urbanas, 97 de cada 100 cuentan con este suministro, cabe mencionar que en zonas rurales, y aún más, en aquellas de difícil acceso, no cuentan con un sistema adecuado de abastecimiento de agua, por lo que se ven obligados a tomar el recurso de ríos o pozos, sin conocer la calidad de la misma, aumentando en mayor medida el problema[5]. Además, el acceso a la energía es de gran importancia para la gestión y desarrollo de los recursos hídricos, ya que las infraestructuras del agua dependen del suministro energético para el bombeo de aguas subterráneas, su purificación, la gestión y el tratamiento de aguas residuales, sin embargo hasta el 2014, 1.300 millones de personas no tienen acceso a la electricidad o no disponen de un acceso fiable y continuo[34].

La falta de acceso a servicios básicos de agua y energía en zonas rurales, impide alcanzar mayores niveles de calidad de vida además de beneficiarse de oportunidades de desarrollo social y económico [34]. Partiendo de lo anterior, se identifican tres inconvenientes que afectan el buen funcionamiento del proceso de suministro de recursos hídricos. En primer lugar, el alto costo de sistemas de bombeo superficial continuo del agua. En segundo lugar, se encuentra la no prestación del servicio eléctrico en zonas no interconectadas (ZNI) a más de 20.453 usuarios en el departamento del Cauca[6] y la deficiencia en la prestación del servicio eléctrico en zonas rurales. Finalmente, la falta de sistemas de monitoreo que permita el buen funcionamiento de plantas compactas para el tratamiento de agua. ¿Cómo implementar un sistema piloto energéticamente autónomo que permita monitorear el proceso de potabilización de una planta compacta?

## **1.3. Justificación**

El desarrollo de este proyecto aporta a mejorar la calidad de vida de personas que no cuentan con una herramienta para el suministro de agua, que, además de brindar autonomía a este sistema, no depende del uso de energía tradicional. Por otro lado, se cuenta con una herramienta que permite visualizar de forma clara y oportuna, el estado de los todos los componentes del sistema, pues la implementación de este tipo de energías que incluyen instrumentos para el monitoreo, es elevado y su tecnología solo brinda información de las condiciones en que se encuentran cada uno de sus elementos y no ejerce acciones de control y visualización de alarmas pertinentes que prevengan posibles fallos en cada uno de los componentes. Por otro lado esta herramienta desarrollada, permite visualizar y registrar el comportamiento de las todas las cargas conectadas al sistema fotovoltaico, con el fin de caracterizar cargas de cualquier tipo y con los datos obtenidos realizar ajustes a los componentes fotovoltaicos, y así dimensionar de acuerdo al requerimiento eléctrico real, ya que, se sobredimensionamiento del sistema ocasiona daños en el mismo, generando pérdidas de dinero.

La herramienta desarrollada, supervisa y toma acciones de control, en las variables que intervienen en el proceso de potabilización, aunque solo son sensados tres parámetros que indican el estado del agua, permite conocer su estado antes y después del proceso de potabilización, además de realizar un control con respecto a estas variables. Así mismo, aumenta la vida útil los componentes energéticos como panel, baterías, bomba, y filtros de la planta. Cabe resaltar que esta herramienta puede ser usada para cualquier sistema fotovoltaico.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Diseñar e implementar un sistema de supervisión y control para una planta potabilizadora de agua alimentada con energía solar fotovoltaica.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Establecer las condiciones de instrumentación y parámetros energéticos necesarios para la implementación del sistema.
- Implementar un sistema para la medición de ciertas variables del agua y variables eléctricas del sistema fotovoltaico (voltaje y corriente).
- Implementar un sistema de energía fotovoltaica para el suministro energético de todo el sistema.
- Implementar una interfaz humano-máquina (HMI) para la visualización de datos.

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. Potabilización de agua

La potabilización del agua define como el conjunto de procesos y operaciones que permiten modificar las características microbiológicas, organolépticas, físicas y químicas del agua para garantizar su consumo, en Colombia dichas características fueron establecidas por el Ministerio de Medio Ambiente bajo el decreto 2115 de 2007 [2]. En 1804 John Gibb instaló la que se considera la primera planta de suministro de agua potable para la ciudad de Glasgow, dicha planta captaba agua de un río contaminado, la cual circulaba por un filtro hacia una estación de bombeo, hasta que el agua completaba una altura de 5m, a partir de ahí fluía entre una tubería de madera hacia la planta, este diseño presentaba muchas limitaciones ya que se imposibilitaba la limpieza oportuna de los filtros[7]. En la actualidad los sistemas de tratamiento de agua disponen de varias etapas para cumplir a cabalidad los requerimientos del Ministerio de medio ambiente: Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección[2].

#### 2.1.2. Procesos de potabilización de agua

Cada país determina los métodos y parámetros más importantes en el proceso de potabilización, usualmente en Colombia se dispone de cinco etapas y alrededor de 50 parámetros para llevar a cabo dicho proceso, entre los métodos se tiene los mencionados anteriormente, además de parámetros físicos, químicos y biológicos [2].

El proceso general de una planta para el tratamiento del agua (Figura 2.1), cuenta con tratamientos preliminares donde se elimina material y sustancias orgánicas e inorgánicas, como: hojas, animales muertos, ramas, lodo, arcilla, entre otros, además de eliminar olores y compuestos volátiles, para así llegar al aforo, el cual es indispensable para calcular la cantidad de sustancias químicas que debe agregarse al agua; cabe resaltar que en este proceso se mide el caudal que se va a transportar alrededor de todo el proceso, con el fin de estimar la cantidad de ciertas sustancia química utilizadas en el proceso de desinfección. En la etapa de coagulación y floculación, se acumulan coloides y otras sustancias no sedimentadas hasta formar grumos que

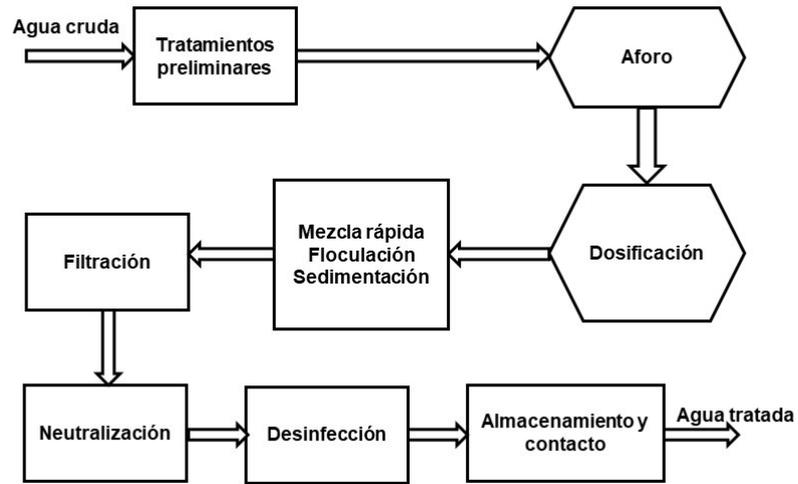


Figura 2.1: Procesos de potabilización de agua

puedan ser eliminados en el etapa de sedimentación, esta etapa es importante ya que dichas sustancias aportan un grado de turbiedad y color al agua, posteriormente se filtra para eliminar sólidos en suspensión antes de pasar al proceso final de desinfección, en esta etapa se elimina material biológico como virus y bacterias que puedan afectar la salud [2].

Existen varios tipos de plantas como la convencional, compacta, filtración directa, y los sistemas no convencionales [2].

### Planta convencional

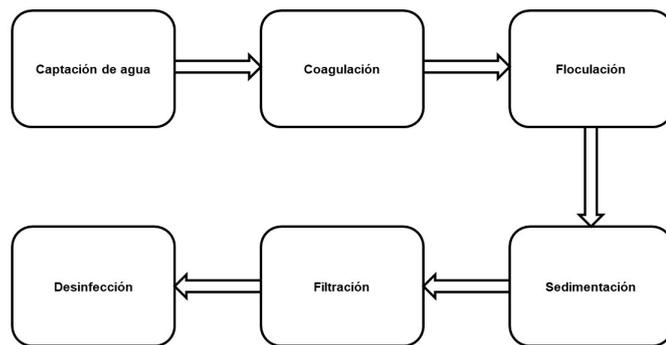


Figura 2.2: Proceso de potabilización planta convencional

Estas plantas son diseñadas por ingenieros y construidas en el sitio a tratar el agua, disponen de todas las etapas (Figura 2.2) mencionadas anteriormente . Para realizar el diseño de este tipo de plantas debe tenerse en cuenta parámetros como:

Análisis del nivel de complejidad, determinación del periodo de diseño, determinación de la dotación según la complejidad, proyección poblacional mediante el método geométrico, determinación del caudal de diseño y determinación de la calidad del agua cruda [8].

- **Análisis del nivel de complejidad:** La RAS 2000 establece que para todo territorio nacional debe tenerse en cuenta cuatro niveles de complejidad (Tabla 2.1), los cuales dependen del número de habitantes y la capacidad económica en las zonas a realizar el proyecto [9].

Tabla 2.1: Asignación del nivel de complejidad

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios
Bajo	¡2500	Baja
Medio	2501 a 12500	Baja
Medio - alto	12501 a 60000	Media
Alto	¿60000	Alto

- **Determinación del periodo de diseño:** Debe definirse el periodo de vida útil de la planta de tratamiento de agua potable (Tabla 2.2), de acuerdo al nivel de complejidad del sistema, con el fin de establecer la cantidad máxima de habitantes a suplir del líquido durante este tiempo [9].

Tabla 2.2: Periodo de diseño máximo

Nivel de complejidad del sistema	Periodo de diseño máximo
Bajo, medio, medio-alto	25 años
Alto	30 años

- **Determinación de la dotación según la complejidad:** Deben tenerse en cuenta ciertos parámetros como pérdidas, dotación según la georeferenciación y la temperatura de la zona (Tabla 2.3) y así determinar la cantidad de agua potable a producirse de acuerdo a las normativas Colombianas [9].

Tabla 2.3: Asignación del nivel de complejidad

Nivel de complejidad	Dotación neta máxima para poblaciones con clima frío o templado $(\frac{L}{hab*dia})$	Capacidad económica de los usuarios $(\frac{L}{hab*dia})$
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio - alto	125	135
Alto	140	150

- **Proyección poblacional mediante el método geométrico:** El crecimiento poblacional se define como geométrico si su aumento es proporcional al tamaño de la misma [10]. Se tiene la siguiente expresión:

$$P_f = P_{uc} * (1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad (2.1)$$

En donde  $r$  es la tasa de crecimiento anual,  $P_{uc}$  es la población inicial,  $P_f$  es la población al año de proyección,  $T_f$  es el año de proyección y  $T_{uc}$  corresponde al año inicial [10].

- **Determinación del caudal de diseño:** Es importante calcular el caudal adecuado para suplir las necesidades de la población, con el fin de diseñar y construir las diferentes estructuras hidráulicas del sistema de acueducto. Usualmente se trabaja con tres tipos de caudales, el primero es el caudal medio diario, que es el caudal promedio obtenido de un año de registros y es la base para la estimación de los otros caudales de operación, el segundo corresponde al caudal máximo diario, el cual representa el día de mayor consumo en el año, por último se encuentra el caudal máximo horario, que corresponde a la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo [10]. Las ecuaciones para la estimación de dichos caudales son resumidas a continuación.

$$Q_{prom} = \left( \frac{\text{consumo total}(\frac{L}{\text{hab} * \text{día}}) * \text{pobla proyectada}(\text{hab})}{86,400} \right) \quad (2.2)$$

$$Q_{maxdiario} = (K_1 * Q_{prom}) \quad (2.3)$$

$$Q_{maxhorario} = (K_2 * Q_{maxdiario}) \quad (2.4)$$

$$Q_{diseño} = (Q_{maxhorario}) \quad (2.5)$$

En el caso en que se disponga de un tanque de almacenamiento, las estructuras del acueducto se diseñan con el caudal máximo diario, en el caso contrario se deber hacer el diseño para un caudal máximo horario (Figura 2.4) [10].

- **Determinación de calidad del agua cruda:** Un parámetro utilizado en Colombia para determinar la calidad del agua es el índice de Riesgo de la Calidad del Agua para el consumo humano (IRCA), el cual relaciona un puntaje asignada a cada unas de las características valoradas en el agua y los valores máximos permitidos [11].

$$IRCA() = \left( \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{puntajes de riesgo asignado a todas las características analizadas}} * 100 \right) \quad (2.6)$$

### Planta de filtración directa

Son plantas similares a las convencionales, pero no cuenta con unidades de floculación y tampoco sedimentación (Figura 2.3), en este tipo de plantas, el agua es agitada fuertemente con el fin de obtener una separación instantánea de la sustancia coagulante, según la Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA), el agua saliente de los filtros debe tener una turbiedad entre  $(0 - 10)NTU$  y así

garantizar que esté libre de huevos parásitos, estos valores pueden obtenerse si en el proceso de coagulación se produce agua con turbiedad de  $2NTU$  [12]. La etapa de filtración solo remueve bacterias, ya que normalmente se aplica cloro residual de  $1 \frac{mg}{L}$  a la salida de la planta con un tiempo de contacto máximo de  $30min$ , si hubiera presencia de huevos parásitos, se necesitaría altas dosis de cloro residual y un tiempo de contacto mucho mayor, lo cual imposibilita la aplicación de este método [12].

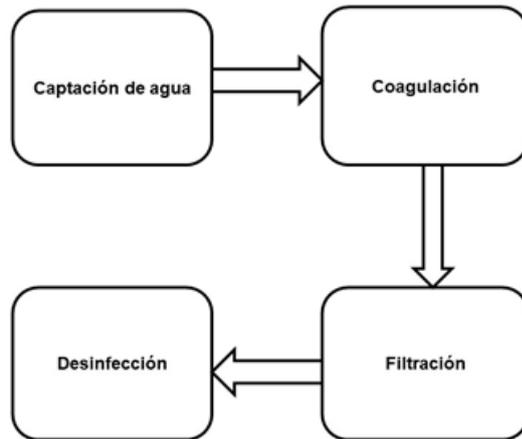


Figura 2.3: Proceso de potabilización por filtración directa

### Planta no convencional

Se instalan usualmente en zonas rurales ya que su costo es bajo en comparación a las plantas de tratamiento convencionales, son de fácil operación y mantenimiento. Dentro de este tipo de plantas se encuentran las de fibrofiltración biológica y las de filtración lenta en arena (Figura 2.4), las cuales realizan el proceso en varias etapas [1]. En la naturaleza se realizan procesos de filtración lento, el agua proveniente de lluvias, ríos y otras fuentes hídricas, atraviesa capas de grava, arena y arcilla hasta alcanzar depósitos subterráneos [12].

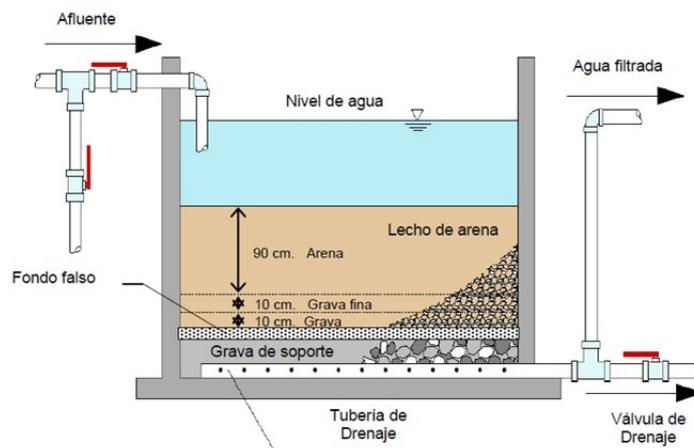


Figura 2.4: Filtración lenta en arena [35]

### Plantas compactas

Son plantas pre-fabricadas donde los procesos de coagulación, floculación y sedimentación están dentro de una misma unidad, pero separadas por compartimentos, usualmente están hechas de láminas metálicas o fibras de aluminio (Figura 2.5).

Una planta de tipo compacta es la Klorman, de fácil operación e instalación ya que no dispone de partes móviles que dificulten la portabilidad de la misma. Su unidad cuenta con un sistema de filtración, el cual se realiza a través de un proceso de centrifugado y por el paso de agua a través de una malla de poliéster o acero de alta resistencia [113].

El sistema de cloración inyecta hipoclorito de calcio en la línea de distribución de agua a través del clorinador (Klorman 1000) y así logra desinfectar el agua de agentes patógenos, este tipo de tratamiento es económico y de fácil acceso[13].

Además de lo mencionado anteriormente, dicha planta cuenta con un sistema de bombeo el cual se realiza a través de una motobomba ECO WORTHY sumergible, esta herramienta está hecha de acero inoxidable y así evita corrosiones, su alimentación en DC es de 24V y puede ser conectada a un sistema de panel solar o generador de viento, además tiene la capacidad de bombear 6 litros por minuto[14].

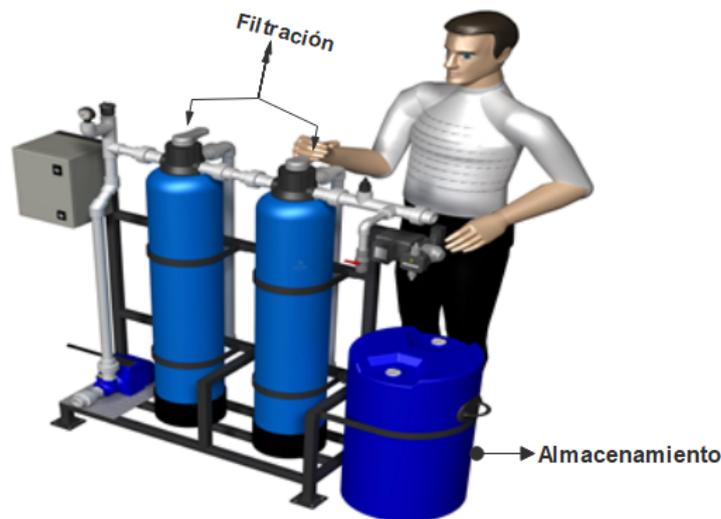


Figura 2.5: Planta compacta [36]

### 2.1.3. Energía fotovoltaica

William Grylls Adams y Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio, aunque la cantidad de electricidad que se generaba con este tipo de célula era muy poca no se descartó la posibilidad de llevarla a aplicaciones electrónicas. Un siglo después, en el año 1953, Gerald Pearson creó una célula fotovoltaica a partir de silicio, la cual tenía mayor eficiencia que la patentada por Sr William y Richard. A partir de ese momento el desarrollo de las células fotovoltaicas fue incrementando pues el campo de aplicaciones seguía en aumento[15].

Se tiene entonces que la energía eléctrica obtenida de los haces de luz mediante células fotoeléctricas responde a la luminosidad liberando electrones, estos están débilmente ligados al semiconductor ocupando una banda de energía, más conocida como “banda de valencia”. El flujo de electrones en el circuito exterior se conoce como corriente de la célula y la multiplicación de dicha corriente por el voltaje determina la potencia nominal entregada al inversor[16].

Las células fotovoltaicas se agrupan en celdas, y estas a su vez, forman paneles con la agrupación de varias celdas fotovoltaicas, dichos paneles generan corriente continua, es decir, que la intensidad de corriente permanece constante a través del tiempo en condiciones de irradiancia similares. Un sistema fotovoltaico consta de tres partes para su funcionamiento, un sistema de baterías, inversor y regulador de carga[17].

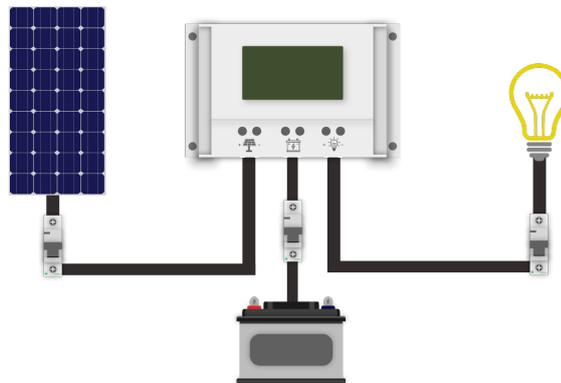


Figura 2.6: Sistema fotovoltaico [37]

### Generador fotovoltaico

Es el encargado de transformar la energía luminosa del sol en eléctrica. La potencia que puede llegar a suministrar una sola célula es de  $3W$ , debido a que este valor es muy bajo para aplicaciones convencionales, se agrupan conectándolas en serie o paralelo para formar los módulos fotovoltaicos. La potencia que pueda suministrar un módulo dependerá estrictamente de la cantidad de células que posea [16]. El

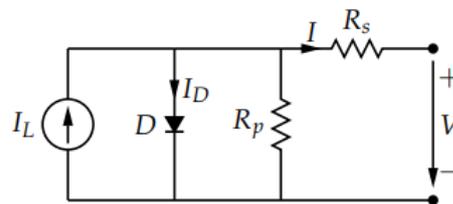


Figura 2.7: Modelo eléctrico de una célula solar

modelo matemático de la figura 2.7 viene dado por la siguiente ecuación:

$$I = I_{sc} \left[ 1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + IR_s}{mV_T}\right) \right] \quad (2.7)$$

Donde:

$I$  = Corriente total

$I_{sc}$  = Corriente en corto circuito

$V$  = Tensión aplicada

$V_{oc}$  = Tensión circuito abierto

Usualmente estas células se fabrican a partir de silicio cristalino y policristalino, dichas células proporcionan  $0,5V$  y una corriente de ( $35mA$ ) aproximadamente cuando son iluminadas por el sol en un día despejado a ( $1000 \frac{W}{cm^2}$ ), este último valor es la irradiancia de referencia, ya que varía con respecto a la posición geográfica del lugar [16].

Un generador fotovoltaico es la agrupación de células o módulos eléctricos y así poder adaptarse a características de funcionamiento de una aplicación determinada. Dicho generador se compone de  $N_p * N_s$ , para el cual  $N_p$  es la cantidad de columnas y  $N_s$ , el número de celdas en cada serie. Donde la cantidad de columnas define la corriente total del generador, y el número total de módulos por serie establece la tensión del generador [17].

$$I_g = N_p * I_m \quad (2.8)$$

$$V_g = N_s * V_m \quad (2.9)$$

### **Baterías corriente directa**

La energía producida por el módulo fotovoltaico se acumula en un sistema de baterías, y así la energía que se produce durante las horas de sol puede ser utilizada cuando la radiación sea baja o nula. Por lo general, están formadas por elementos de  $2V$ , los cuales se conectan en serie y así proporcionar tensiones de trabajo de  $12V$ ,  $24V$  y  $48V$ . La capacidad medida en Amperios hora, de dos o más baterías conectadas en paralelo es igual a la suma de cada uno de ellas. Existen diversos tipos de baterías, como lo son: alcalinas, ácido plomo, níquel, níquel-hierro, níquel-cadmio, níquel-hidruro, litio, iones de litio, polímero de litio, y grafeno, todas tienen características y reacciones químicas diferentes[18].

Usualmente en las aplicaciones con generadores fotovoltaicos se utilizan baterías de ácido Plomo y Níquel-Cadmio, debido a su costo y tipo de aplicación las baterías de ácido-plomo son las más usadas, por el contrario, las baterías de níquel-cadmio son utilizadas para aplicaciones más profesionales donde se requiera descargas profundas o permanecer periodos largos en baja carga sin sufrir de deterioro [18].

#### ■ **Baterías ácido plomo**

Son células electroquímicas donde las reacciones en los electrodos son reversibles y así poder almacenar energía para después liberarla cuando se conecta a un circuito exterior. En general estas baterías están compuestas por placas, material activo y electrolito [18].

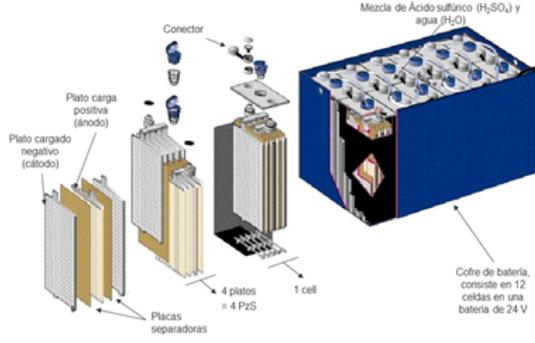
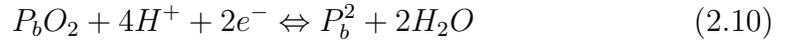


Figura 2.8: Componentes de una batería ácido-plomo[38].

En las baterías de Pb-a (Figura 2.8) las placas forman los electrodos positivos y negativos, los cuales permiten la entrada y salida de corriente, la cual circula por el interior por efectos de carga y descarga, dichos electrodos sufren reacciones de oxido-reducción y dependiendo del proceso se comporta como anodo o catodo. Adicionalmente se cuenta con el material activo que participa en las reacciones presentes en las baterías y así distribuir la corriente en las placas. Por último se tiene el electrolito que generalmente es una solución diluida de ácido sulfúrico, el cual actúa como medio de transporte para las cargas entre las placas negativa y positiva [17].

Las reacciones químicas en una batería de ácido plomo son:

En la placa positiva



En la placa negativa



Reacción global



Una batería de Pb-a puede ser modelada por como una fuente de tensión,  $V_{BI}$  en serie con una resistencia  $R_{BI}$  como se muestra en la figura 6, dichos parámetros están relacionados con la densidad del electrolito y la temperatura, es decir, un incremento en la concentración del ácido provoca un aumento en la tensión y una disminución en la resistencia. Por el contrario si disminuye la densidad, la tensión disminuye y la resistencia incrementa [17].

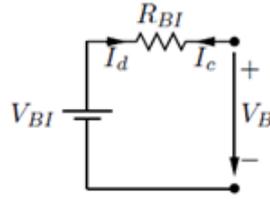


Figura 2.9: Modelo eléctrico de una batería[17]

Teniendo en cuenta este modelo, se tiene que la tensión de salida en el proceso de carga y descarga en la batería está descrito por siguientes ecuaciones:

$$\text{Carga : } V_B = V_{BI} + I_C * R_{BI} \quad (2.15)$$

$$\text{Descarga : } V_B = V_{BI} - I_C * R_{BI} \quad (2.16)$$

El comportamiento de la fuente de tensión equivalente está relacionado con la densidad del electrolito, en el cual si éste es homogéneo se tiene que:

$$V_{BI} = \rho_e + 0,84 \quad (2.17)$$

Para baterías cargadas el valor para  $\rho_e$  varía entre  $1,2 \frac{g}{cm^3}$  y  $1,28 \frac{g}{cm^3}$ , siendo entonces la tensión  $V_{BI} \simeq 2,04V$  y  $2,12V$ [16].

Una variante de las baterías Pb-a son las Absorbed Glass Material (AGM) cuya característica principal es que su electrolito está en forma cristalina formando capas entre las placas, razón por la cual se le conoce como batería de electrolito inmovilizado. Se diseñan especialmente para minimizar la pérdida de agua en la carga [18].

El régimen de carga o descarga determina la intensidad de corriente eléctrica que se utiliza en el proceso, se expresa en la capacidad medida en amperios hora, es decir si la descarga completa de una batería de  $20Ah$  en  $5h$ , su capacidad será de  $100Ah$ , el cual indica un régimen  $I(C5)$ . En las aplicaciones con energía solar se tiene un rango de descarga de 10 a 100 horas,  $I(C10)$  a  $I(C100)$ , el voltaje de carga de una batería está asociado a su vez, con el porcentaje de carga de la misma respectivamente [18].

- **Regulador de carga**

Realiza un proceso óptimo de carga de la batería. Este elemento protege a la batería de cargas o descargas excesivas que pueden afectar la vida útil de las mismas, controlando la cantidad de energía que pasa a través de ellas y el módulo fotovoltaico, y así aprovecha al máximo la energía proveniente del generador fotovoltaico, además de garantizar la protección y buen funcionamiento de las baterías [18].

Existen varios tipos de reguladores, algunos pueden realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del panel fotovoltaico, maximizando la transferencia

energética del generador hacia la batería, además de sistemas de monitorización que registran la operación del regulador.[18].

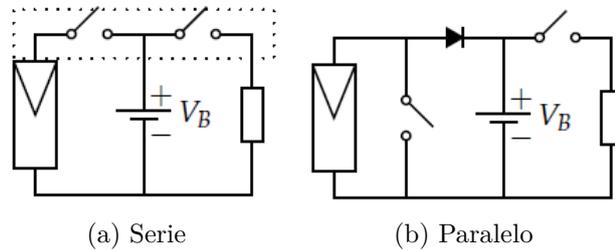


Figura 2.10: Esquema eléctrico de un regulador de carga[18].

Usualmente los reguladores funcionan por control de la tensión, existen varios métodos de control, aunque los más comunes son el regulador serie (Figura 2.10. a) y paralelo (Figura 2.10.b), el primero pone en circuito abierto el generador fotovoltaico cuando la batería está cargada, por el contrario el regulador paralelo disminuye la corriente progresivamente en función de la tensión de la batería [18].

### Regulador de carga tipo ( Maximum Power Point Tracking) MPPT

Este tipo de regulador dispone de un controlador del punto de máxima potencia y un transformador de corriente continua ( $CC - CC$ ), el cual convierte corriente continua de alta tensión a corriente continua de más baja tensión a la hora de la carga de la batería. Este regulador trabaja con los módulos a la tensión que más se adecue en el momento, y así extraer la máxima potencia, además de contar con un controlador por modulación de ancho de pulso PWM, para la carga de la batería [17].

El regulador debe seleccionarse en función de la tensión del sistema y de la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  del panel solar, aplicando un factor de seguridad, normalmente de 1,3 debido a que la irradiancia puede llegar a los  $1,300 \frac{W}{m^2}$  [18].

#### 2.1.4. Sistema de supervisión y control

La automatización industrial consiste en controlar una actividad o proceso sin la intervención de un operador humano. Existen herramientas que permiten supervisar y controlar diferentes variables que pueden presentarse en un proceso o planta. Además de ser controlado a distancia, la interacción es a través de una interfaz gráfica que comunica al usuario con el sistema [19].

Este tipo de sistemas constan de tres etapas: adquisición de datos, supervisión y control, existe usualmente un ordenador, el cual efectúa las tareas de supervisión y gestión de alarmas, además se puede realizar tratamiento de datos [19].

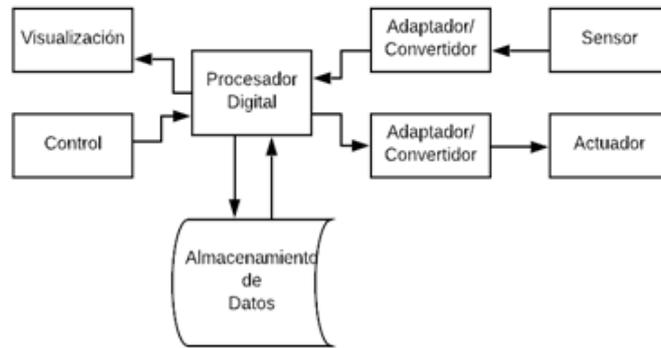


Figura 2.11: Esquema general sistema de supervisión y control

En la primera etapa del proceso de supervisión y control (Figura 2.11) se realiza la adquisición de datos, en esta se obtienen las señales que representan los fenómenos físicos, que suceden a través del tiempo. Es indispensable contar con los sensores adecuados para realizar la medición de dichos fenómenos y acondicionar dichas señales para que el procesador digital almacene los datos obtenidos y puedan ser transferidos en el tiempo de evolución de los datos, al panel de visualización y control, dicha visualización se realiza a través de una interfaz gráfica de fácil acceso, el cual permite tomar decisiones y modificar la evolución de un proceso si así se requiere, de este modo se vigila continuamente que el sistema cumpla con los parámetros establecidos previamente sin la supervisión constante de un operador humano [20].

## 2.2. Marco referencial

### 2.2.1. Referencia internacional

- **Control y monitoreo de una potabilizadora de agua por medio de una Red de ControlNet. (V. Estrada, V. Gutierrez)(1)**

En el presente proyecto los investigadores presentan una propuesta de rehabilitación y modernización de la planta de tratamiento de agua “Iztapalapa purísima 5”, para esto se seleccionó la instrumentación necesaria como sensores y actuadores para lograr cumplir con la calidad de agua potable según la Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-1994, también fueron escogidos un dispositivo para realizar las rutinas de control según las entradas y salidas requeridas, PAC (Controlador de Automatización Programable) y tableros de control distribuidos en las diferentes etapas de filtración, todo esto enlazado por medio de una red ControlNet para poder visualizar el proceso mediante una Interfaz humano máquina (HMI) PanelView para el envío de alertas y mensajes al personal de la planta para la realización de mantenimientos preventivos y paros programados [21].

- ***Adaptación e implementación de un sistema autónomo de bajo coste de monitorización de calidad del agua en tiempo real (El-Khoury Vidarte Namir ) (2)***

El investigador diseña e implementa un sistema que permite medir la calidad del agua por medio de algunas variables que considera son las más relevantes, además que su proyecto estaba enfocado en el bajo costo de todo su sistema, y de este modo fuera accesible en países en vía de desarrollo, para esto se eligió la instrumentación requerida para el desarrollo del trabajo bajo las normativas Españolas que determinan la calidad del agua. Debido al bajo costo del sistema, fue necesario que calibrara cada uno de los sensores seleccionados, los datos obtenidos de estos sensores fueron grabados en una memoria SD en tiempo real [22].

- ***Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua autónomo de bajo costo. (S. Aravinda, S. Marshall, J. Gubbi, M. Palaniswami, R. Sinnott, V. Pettigrove) (3)***

Los investigadores desarrollaron un sistema de monitoreo de la calidad del agua, para determinar las causas de la contaminación y así garantizar la supervivencia de especies acuáticas, para ello se eligieron los sensores adecuados que permitieran medir las condiciones físicas y químicas biológicamente relevantes en el agua, cada sensor fue calibrado con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos, dichos datos se muestran en tiempo real en un monitor autónomo, utilizado para el monitoreo animales acuáticos, realizado por el Centro Victoriano para la Identificación y Gestión de la Contaminación Acuática (CAPIM) [23].

## 2.2.2. Referencia nacional

- ***Microred Solar Fotovoltaica para Automatización de Planta Compacta de Potabilización de Agua. (O Bayona Peñaloza) (4)***

El investigador Otto Bayona realizó un trabajo de investigación donde diseñó y se puso en operación una micro red solar fotovoltaica con el fin de poder cubrir los requerimientos energéticos de una planta compacta de potabilización de agua de bajo costo en Barichara (Santander-Colombia), para determinar la viabilidad del proyecto con la micro red solar fotovoltaica, esta se comparó con un generador Diesel convencional y se usó el software Homer Micro grid. Teniendo en cuenta la radiación en el lugar donde se utilizará la planta y las horas de sol, se diseñó la micro red para lograr satisfacer la demanda energética de la planta de potabilización considerando que es totalmente independiente del sistema energético convencional y así poder suplir las necesidades de agua de un pequeño grupo de personas. Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran el proyecto como una alternativa económicamente viable, socialmente aplicable y de bajo impacto medio ambiental debido pues a l no usar un generador Diesel se evitarán 2.047 Kg/año de dióxido de carbono además de óxido nitroso, material particulado, sulfuro de hidrógeno e hidrocarburos no quemados [24].

- ***Diseño de un sistema Scada basado en labview, implementando el protocolo de comunicación inalámbrica zigbee. (C. Robles Algarín, R. Caputo Llanos, A. Sánchez Hernández) (5)***

Carlos Robles, Roger Llanos y Alberto Sánchez, presentaron un prototipo de un sistema SCADA realizado en el software LabVIEW usando el protocolo ZigBee en la comunicación inalámbrica para supervisar y controlar de manera remota de los procesos de Coagulación y Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP). Para el sensado de las variables fueron usados sensores de temperatura y Ph y así poder realizar la supervisión y la posterior implementación del sistema de control para los motores y electroválvulas usadas a lo largo del proceso, los autores reportan haber logrado estructurar un programa principal con una interfaz sencilla con baja demanda de recursos de cómputo para las tareas de control y visualización de los datos de temperatura y pH [25].

- ***Visualización y Control de Variables en la Planta de Abastecimiento de Agua en la Universidad de Quindío. (E. Marín, A.Serna, P Triviño)(6)***

Eduard Marin, Andres Serna y Pablo Triviño, desarrollaron un sistema de visualización y control de variables eléctricas implicadas en el funcionamiento de una motobomba que es usada en la Planta de Abastecimiento de Agua del Bloque de Ciencias Basicas y Tecnologicas de esta Universidad, esto lo lograron usando un circuito eléctrico y electrónico encargado de obtener la información de distintas variables (voltaje, corriente y presión), posterior a la etapa de sensado realizada con los diferentes sensores de voltaje, corriente y presión y su respectivo acondicionamiento de señal, los datos fueron obtenidos con una tarjeta Arduino Mega 2560, estos son visualizados en una pantalla LCD y se toman las decisiones concernientes al sistema de control ON-OFF para protección del sistema en caso de caídas de fase o elevaciones de corriente, todo esto con la idea de aumentar la vida útil de los equipos usados en la planta pues el sistema también posee un sistema de alarmas en caso de la alteración de la corriente, y además disminuir los costos en el consumo de energía y agua, pues después de implementar el sistema se reduce en un 70 % el número de veces que se enciende la motobomba durante una hora pico [26].

- ***Sistema de instrumentación, actuación y automatización de una planta de tratamiento de agua potable para campamentos de pozos petroleros (ptap).(L. Lozano, P. Sánchez)(7)***

Lizeth Lozano y Paula Sánchez, desarrollaron un proyecto que consiste en el diseño de un sistema de instrumentación, actuación y automatización de una planta de tratamiento de agua potable para campamentos de pozos petroleros (PTAP), este toma como modelo una de las plantas ofertadas por la empresa SORTE LTDA. El proyecto se realiza para poder de estudiar diferentes plantas utilizadas en campos petroleros y poder asi escoger una planta PTAP de referencia, la cual permitirá establecer las necesidades de automatización y poder escoger los transductores y actuadores necesarios para cumplir con los requerimientos establecidos, al final del proyecto se escogen 6 actuadores, 8

válvulas de control de flujo y 19 sensores analógicos que permiten monitorear las condiciones a la entrada y salida de agua de la planta y así poder verificar el tratamiento realizado. El sistema de automatización fue diseñado bajo tecnología Siemens y la plataforma integrada de automatización TIA portal, el diseño se realizó con un Controlador Lógico Programable (PLC) de la familia S7-1200, una red Profinet y una pantalla HMI del mismo fabricante [27].

■ ***Diseño de un sistema automatizado para una planta de tratamiento de agua potable. (F. Arenas Castaño, W. Londoño Giraldo)(8)***

En Colombia se existen plantas potabilizadoras de gran capacidad que van de 200 a 5.000 L/s, estas manejan sistemas de control para garantizar condiciones aptas de consumo humano. Las plantas de tratamiento de pequeña  $(9a99)\frac{L}{s}$  y mediana capacidad  $(100a199)\frac{L}{s}$ , generalmente no cuentan con este tipo de tecnología entorpeciendo el proceso, teniendo en cuenta que son sistemas manipulados físicamente por operarios que se exponen diariamente a errores que ocasionan accidentes, pérdidas de tiempo, insumos, dinero, e incluso reprocesos que distorsionan el control y manejo del recurso hídrico. Por esto los investigadores realizaron un trabajo enfocado en el diseño de un sistema automatizado (SCADA) para una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), compuesto por simulación entre un PLC y una pantalla HMI donde se representa una topología de comunicación industrial, que a su vez centraliza el control de los subprocesos que conforman la potabilización del agua (Dosificación de químicos, Floculación, Sedimentación, Filtración y Desinfección) para plantas de tratamiento a pequeña y mediana escala. Para ello, se empleó el software Simatic S7 donde se elaboró el algoritmo de control en lenguaje KOP, que en conjunto con WinCC Flexible permite visualizar la simulación a través de una pantalla HMI y así poder maniobrar los elementos de control que dispone una PTAP. Este diseño reúne un comportamiento que permite interactuar en tiempo real con cada operación que se lleva a cabo dentro de la PTAP, el programa reconoce y actúa sobre los dispositivos que conforman dicho proceso (Sensores de volumen, Caudalímetros, Sensores de turbiedad, Electroválvulas, Bombas dosificadoras y Moto reductores). Y aunque el sistema no fue implementado, los estudiantes afirman que una futura implementación ayudaría a reducir los errores mencionados anteriormente por la intervención manual en este tipo de plantas que no presentan tecnologías autómatas, minimizándolos y contribuyendo al proceso de potabilización de agua; además de tener un sistema de monitoreo que mejora las condiciones de control. Por último resaltan que un sistema automático en la potabilización de agua garantiza desempeño en su funcionamiento, ofreciéndole al operador de planta la comodidad de tener un programa amigable desde donde podrá observar y manipular directamente el proceso de toda la PTAP sin necesidad de presenciarlo físicamente [28].

■ ***Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja la fortaleza ubicada en el municipio de Melgar- Tolima. (H. Cortéz, L. Mora)(9)***

Los estudiantes Harold Cortez y Lina Mora de la Universidad Libre realizaron el presente trabajo de grado para optar al título de ingenieros ambientales, en

este se diseñó un sistema compacto de potabilización de agua para la Granja La Fortaleza, ubicada en el municipio de Melgar – Tolima. El Prototipo consiste en un solo módulo que contiene los procesos de coagulación – floculación y sedimentación, y posterior a esto tiene los procesos de filtración y desinfección. El diseño se llevó a cabo teniendo en cuenta los parámetros exigidos por el RAS 2000 Titulo C y la Resolución 2115 de 2007 sobre la calidad del agua potable. Se realizaron ensayos de laboratorio con el fin de determinar algunos parámetros de diseño y garantizar la calidad del agua tratada. Los resultados obtenidos indican que el agua cruda extraída del pozo artesanal, es apta para potabilizar, igualmente, que la construcción del sistema compacto es viable en cuanto al volumen que ocupa y los costos de operación requeridos [29].

### 2.2.3. Referencia regional

- **Propuesta de automatización de una planta de tratamiento de agua para uso industrial. (Y. Rodríguez , L. García)(10)**

Los investigadores presentan una propuesta para automatizar la planta de tratamiento de agua de uso industrial en Colcerámica S.A. Planta Girardota, en dicha propuesta se describe el tratamiento que se realiza actualmente con esto se obtuvo un diagnóstico que permite seleccionar las variables que serán medidas y controladas, pues son de vital importancia en el proceso: pH, turbidez, flujo y nivel de agua en los vertederos. Posterior a esto describen los equipos seleccionados que son necesarios para realizar la propuesta, se elaboran los diagramas de Tubería e Instrumentación (P ID). De implementar la automatización para la planta se tendrán como resultados la medición de las variables mencionadas anteriormente, además de un registro continuo de estas, exceptuando la variable pH y por último un sistema de dosificación automático para el sulfato de aluminio e hipoclorito de sodio, logrando que el agua tratada en la planta cumpla con las condiciones requeridas por la compañía Colceramica S.A [30].

Tabla 2.4: Comparación con los proyectos del marco de referencia

Proyectos	Uso de energías no convencionales	Monitoreo de variables en tiempo real	Monitoreo de variables para calidad de agua en tiempo real	Sistema de control	Interfaz gráfica
<b>INTERNACIONAL</b>					
1	x	x	√	√	√
2	x	x	√	x	x
3	x	x	√	√	√
<b>NACIONAL</b>					
4	√	x	x	x	x
5	x	x	√	√	√
6	x	√	x	√	x
7	x	x	√	√	√
8	x	x	√	√	√
9	x	x	√	x	x
<b>REGIONAL</b>					
10	x	x	√	√	x

Después de analizar el marco referencial se evidencia la importancia de un proyecto como el presente para países como Colombia donde un gran número de personas no tienen acceso al agua potable ni a la red eléctrica. Esta misma preocupación también es evidenciada en otras partes del planeta, por ejemplo de las referencias internacionales [21] solo se enfoca en el monitoreo y control de la calidad del agua y permite una visualización a través de HMI, pero no en el uso de energías no convencionales ni el monitoreo y control de las variables eléctricas involucradas, aunque el proyecto tiene buenos componentes, no fue posible evaluar resultados pues solo se planteó la propuesta y no se llevó a cabo la implementación, el proyecto realizado en Europa [22] muestra el interés y la importancia de supervisar la calidad del agua pero al no ser monitoreado en tiempo real, impide que se puedan tomar acciones de manera rápida y eficiente, el proyecto [23] tiene varios aspectos positivos pues permite monitorear la calidad del agua en tiempo real en un monitor autónomo con el fin de proteger los ambientes acuáticos. El panorama nacional la situación es similar, pues solo un referente [24] de 6 ciudades usa energías renovables para un proyecto relacionado con tratamiento de agua, aunque está enfocado en comparar dichas energías con la generación por Diesel, por lo tanto no monitorea ni controla variables eléctricas ni del agua; por otro lado [25], [27] y [28] monitorean variables del agua en tiempo real, poseen control, y HMI, pero no usan energías no convencionales ni monitorean consumo o generación eléctrica, [28] solo es un diseño y no se implementó. En [26] se monitorea y controla el sistema eléctrico de una planta de agua lo que gran utilidad pues se garantiza el aumento de la vida útil de los equipos, pero no se interesa por la calidad del líquido, [29] se basa en el diseño y desarrollo convencional de una planta de tratamiento de agua para una pequeña comunidad, por lo cual no se implementan muchas de las tecnologías usadas en este proyecto. Por último en el panorama regional [30] es una propuesta no implementada que se enfoca en controlar y monitorear algunas variables del agua en un proceso industrial, el sistema es alimentado de manera tradicional y no se encarga del monitoreo o control del consumo y generación eléctrica.

## Capítulo 3

# METODOLOGÍA

Este proyecto de investigación se basa en una metodología cuantitativa y fué desarrollado en 7 etapas (Figura 3.1), donde se describen los procesos metodológicos para la culminación del mismo.

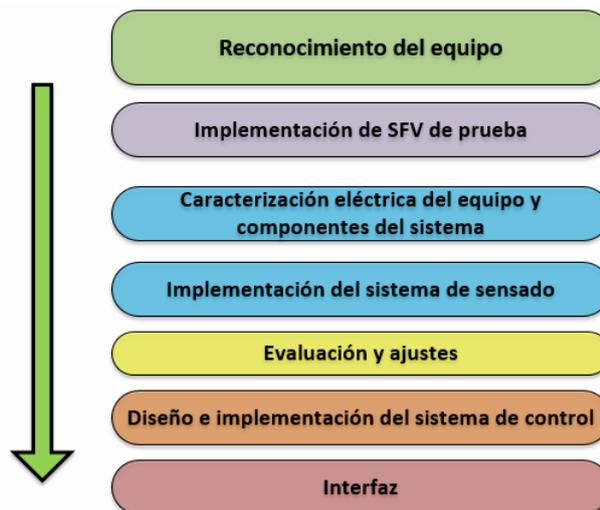


Figura 3.1: Desarrollo metodológico

- **Reconocimiento de equipos:** El objetivo de esta etapa fué conocer el funcionamiento de cada uno de los componentes de la planta compacta, el manejo de la misma, además de conocer el comportamiento y características eléctricas de la bomba sumergible.
- **Implementación del sistema fotovoltaico de prueba:** De acuerdo a las características eléctricas de la bomba, se realiza un estimado de los componentes fotovoltaicos, con el fin de realizar pruebas en la planta y caracterización de sensores.

- **Caracterización eléctrica del equipo y componentes del sistema:** Cada uno de los sensores fueron caracterizados con el fin de obtener las curvas de comportamiento de cada uno, además, se caracterizó el comportamiento eléctrico de la bomba sumergible en las condiciones de trabajo.
- **Implementación del sistema de sensado:** Los sensores que se caracterizaron en la etapa anterior son montados en el sistema, además, se calibraron con respecto a instrumentos tomados como referencia.
- **Evaluación y ajustes:** En esta etapa se realizaron las primeras pruebas para observar y cuantificar el comportamiento de la bomba y sensores implementados, además, e realizaron ajustes al sistema fotovoltaico y a algunos sensores.
- **Diseño e implementación del sistema de control:** A partir de las pruebas realizadas en la etapa de evaluación, se determinan las acciones de control, para variables eléctricas y variables del agua.
- **Interfaz:** El objetivo de esta etapa era mostrar al usuario de forma amigable, el estado de todos los componentes del sistema, tanto para variables energéticas, como para las variables de sensado del agua.

### 3.1. Reconocimiento del equipo

#### Planta de tratamiento de agua compacta

La planta de tratamiento de agua compacta (figura 3.2), es una planta de la marca Klorman, adquirida por el grupo de investigación SENNOVA perteneciente al SENA regional Cauca, que no cuenta con partes móviles, lo que permite desplazarla de un lugar a otro con mayor comodidad, integra procesos físicos, químicos y biológicos para reducir o eliminar agentes contaminantes presentes en el agua, con el fin de obtener agua con características adecuadas para el consumo humano, la planta cuenta con un sistema de filtración, uno de refinación y uno de cloración, así realiza los procesos mencionados anteriormente.



Figura 3.2: Planta potabilizadora Klorman 2015

- **Sistema de filtración Panafilter:** En el interior contienen Zeolita recubierta por dióxido de Manganeseo (figura 3.3), el cual implica tres procesos, 1) intercambio iónico como fase inicial, donde el manganeso disuelto se fija en la superficie de la zeolita, 2) la posterior oxidación del manganeso sobre la superficie del medio, la cual permite la formación de una película de óxidos ( $MnOx(s)$ ) sobre el grano del material y 3) la remoción del manganeso disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material filtrante. Esta película es altamente selectiva de los iones de manganeso,  $Mn(II)$ , seguida de los iones de hierro  $Fe(II)$ . Oxidando el manganeso adsorbido en la superficie del grano se regenera la capacidad de adsorción del medio asegurando una continua remoción de hierro y manganeso durante la filtración [13].

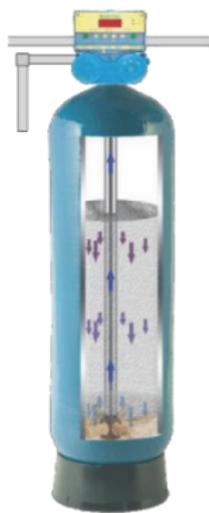


Figura 3.3: Sistema de filtración[13].

- **Sistema de refinación:** Cuenta con tres filtros (Figura 3.4), el primero es un filtro de sedimentos de Polipropileno, el cual remueve partículas suspendidas en el agua con un tamaño de 5 micras, además de disminuir la turbidez, posteriormente, se encuentra el filtro de carbón activado granular (GAC), el cual está diseñado para remover partículas orgánicas, colores, olores y sabores indeseados, el último filtro antes del proceso de cloración, es el filtro de carbón activado en bloque (CTO), el cual tiene las mismas características del anterior además de acondicionar de manera final el sabor del agua [13].



Figura 3.4: Sistema de refinación[13].

- **Sistema de cloración:** En este proceso se dosifica el hipoclorito de calcio de manera continua en la línea de distribución del agua (figura 3.5), este tratamiento permite eliminar microorganismos causantes de enfermedades [13].



Figura 3.5: Sistema de cloración

## 3.2. Caracterización eléctrica del equipo y componentes del sistema

### 3.2.1. Cargas

La planta de tratamiento compacta, dispone de una bomba sumergible para el proceso de captación de agua, dicho elemento, funciona en corriente directa y conocer sus características eléctricas era indispensable para determinar su consumo energético al sistema fotovoltaico, además de la bomba, existen otros elementos que generan consumo al sistema, como el sistema de adquisición de datos (sensores) y el sistema de control (actuadores), teniendo en cuenta dichos elementos, se realiza una estimación de la energía total consumida por las cargas.

- **Bomba sumergible:** Es la encargada de bombear el agua desde el punto de captación de agua hasta la planta para realizar el tratamiento (figura 3.6), las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.1



Figura 3.6: Bomba sumergible[14]

Tabla 3.1: Especificaciones bomba sumergible

ESPECIFICACIONES (Fabricante: Amarine)	
Voltaje	24Vdc
Corriente máxima	5A
Potencia máxima	120W
Velocidad de flujo	3,2 GPM o 12 LPM
Máxima elevación	230 Ft o 70m
Máxima profundidad de inmersión	100 Ft o 30m

- **Electroválvula:** Las electroválvulas son usadas para permitir o restringir el flujo de agua (Figura 3.7), cuando esta es alimentada con 12V, el electroimán abre o cierra la válvula según el tipo que esta sea, para las diferentes funciones en el sistema de control fueron usadas electroválvulas normalmente cerradas y normalmente abiertas, con el fin de disminuir el consumo energético. Las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.2

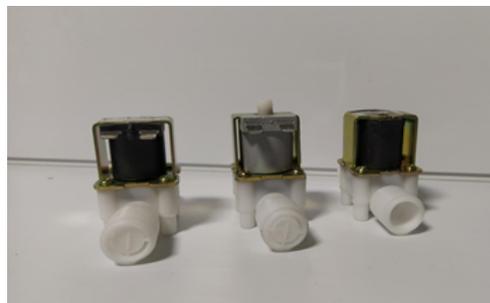


Figura 3.7: Electroválvulas normalmente abierta (gris) y normalmente cerrada (negra)

Tabla 3.2: Especificaciones electroválvula

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje de operación	12Vdc
Rango de entrada	0-12Vdc
Rango de salida	close - open
Flujo aceptado	$(1,5 - 20) \frac{L}{min}$
Consumo	5W

### 3.2.2. Sensores y actuadores

#### Tarjeta de adquisición de datos

- Arduino Mega 2560:** Esta placa electrónica cuenta con múltiples entradas analógicas y digitales (figura 3.8) que permite implementar sistemas de sensado y control a bajo costo [32]. Las especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 3.3.



Figura 3.8: Arduino Mega 2560

Tabla 3.3: Especificaciones arduino mega 2560

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje de operación	5Vdc
Corriente por cada pin	40mA
Pines digitales de entrada y salida	54 (14 PWM) Y (16 analógicos)

### 3.2.3. Sensores

Los sensores que fueron implementados en el marco de este proyecto, son compatibles con la tarjeta de adquisición Arduino.

- Módulo sensor de voltaje FZ0430:** El sensor FZ0430 (Figura 3.9) está basado en un divisor de tensión con resistencias de  $30K\Omega$  y  $7,5K\Omega$ , esto genera que la tensión recibida por módulo sea de divida por un factor de  $5 * (\frac{7,5}{30+7,5})$ .



Figura 3.9: Sensor FZ0430

Tabla 3.4: Especificaciones sensor FZ0430

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Rango de entrada	(0-25)Vdc
Rango de detección de voltaje	24,42mV-25V
Rango de salida	(0-5)V
Consumo	16,6mW

- **Módulo sensor de corriente ACS712:** El ACS712 de Allegro (Figura 3.10) es un sensor que funciona por efecto Hall, este transforma el campo magnético que produce la corriente al pasar por un alambre de cobre interno en el sensor, convirtiendo este campo en un voltaje variable directamente proporcional a dicho campo.



Figura 3.10: Sensor ACS712

Tabla 3.5: Especificaciones sensor ACS712

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje de operación	(4,5-5,5)Vdc
Rango de entrada	-5A a 5A
Rango de salida	(0-5)V
Consumo	16,6mW

- **Módulo sensor de flujo YF-S201:** El sensor de flujo (Figura 3.11) está conformado por un rotor que posee en sus paletas un imán, también posee un sensor de efecto hall que detecta el campo magnético del imán de las paletas y con esto el movimiento del rotor, el sensor de efecto hall envía los pulsos por uno de los cables del sensor, los pulsos deberán ser convertidos posteriormente a flujo.



Figura 3.11: Sensor de flujo YF-S201

Tabla 3.6: Especificaciones sensor YF-S201

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
<b>Voltaje de operación</b>	$(4,5-5,5)V_{dc}$
<b>Rango de entrada</b>	$(1 - 30) \frac{L}{min}$
<b>Rango de salida</b>	Número de pulsos proporcionales al caudal
<b>Consumo</b>	75mW

- Sensor de pH 4502C:** Este sensor (figura 3.12) permite tener lecturas del pH del líquido en el cual se encuentra sumergido, está compuesto por un módulo sensor y una sonda sumergible.



Figura 3.12: Sensor de pH 4502C

Tabla 3.7: Especificaciones sensor pH

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
<b>Voltaje de operación</b>	5Vdc
<b>Corriente de trabajo</b>	$(5 - 10)mA$
<b>Rango de entrada</b>	(0-14)pH
<b>Rango de salida</b>	(0-5)VDC
<b>Consumo</b>	50mW

- Sensor de turbidez SEN0189:** Este sensor (Figura 3.13) permite registrar los niveles de turbidez, posee un emisor y receptor de luz, al medir las tasas de dispersión y transmitancia se puede detectar la cantidad de partículas suspendidas en el agua, su modo de uso puede ser digital o analógico.



Figura 3.13: Sensor de turbidez SEN0189

Tabla 3.8: Especificaciones sensor SEN0189

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje de operación	5Vdc
Corriente de operación máx	40mA
Rango de entrada	(0-3.000)NTU
Rango de salida modo analógico	(0-4,5)Vdc
Rango de salida modo digital	ALTO-BAJO (ajuste umbral por potenciómetro)
Consumo	200mW

- Tarjeta de relés optoacopada:** Los relés optoacoplados (Figura 3.14) permiten controlar el flujo de corriente que circula a través de ellos, con un LOW permiten el paso de corriente y con un HIGH lo impiden o envían a otro circuito.



Figura 3.14: Tarjeta de relés de 8 canales

Tabla 3.9: Especificaciones relés optoacoplados

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje de operación	250Vac/30Vdc
Corriente de operación máx	10A
Voltaje de la bobina (relé)	5Vdc
Corriente de activación por relé	(15 a 20)mA
Rango de salida digital	ALTO-BAJO (ajuste umbral por potenciómetro)
Consumo máx (8 canales activos)	600mW

### 3.3. Implementación del sistema fotovoltaico de prueba

Para implementar el sistema fotovoltaico de prueba (Figura 3.15), se inicia con la selección de los componentes a partir de las cargas iniciales, dicha carga necesitaba 24V y 5A según el fabricante para su funcionamiento, con estos datos se estima la potencia del sistema fotovoltaico de tal forma que la energía generada durante las horas de sol fuera igual o superior al máximo consumo energético teórico de las cargas, para pruebas no inferiores a dos horas de uso.

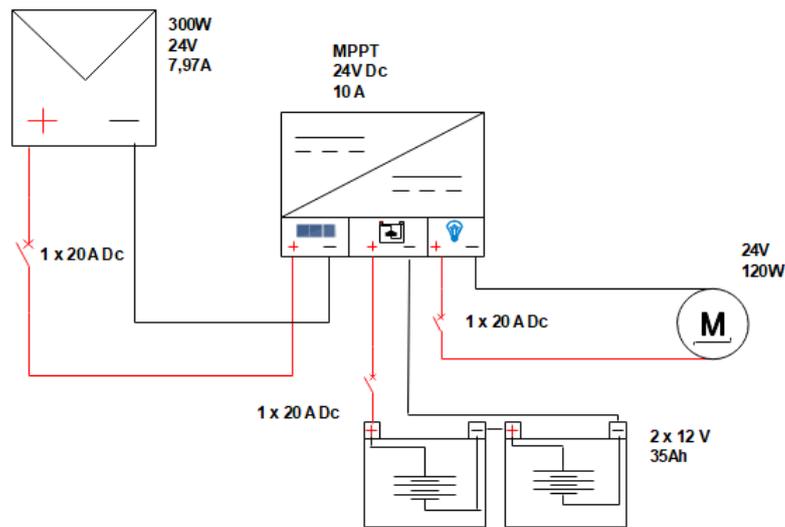


Figura 3.15: Sistema fotovoltaico de prueba [33].

- **Panel fotovoltaico:** De acuerdo a los cálculos iniciales para el dimensionado del sistema se utiliza un panel policristalino a 24V (figura 3.15) con las siguientes características:

Tabla 3.10: Especificaciones panel 24V

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Voltaje circuito abierto ( $V_{oc}$ )	44,5Vdc
Voltaje máximo ( $V_{mp}$ )	36,3Vdc
Potencia máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ )	300W
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	9,1A
Corriente máxima ( $I_{mp}$ )	8,33A

- **Banco de acumulación:** Partiendo de una estimación inicial, se eligen dos baterías (Figura 3.16) en serie de 12V con 35Ah cada uno, con tecnología Absorbent Glass Mat (AGM).



Figura 3.16: Batería 12V/35Ah.

- **Regulador de carga MPPT:** Se usó un regulador MPPT (seguimiento del punto máximo de potencia) (Figura 3.17) por sus ventajas sobre el PWM (modulador por ancho de pulso) el cual se encarga de gestionar la energía entre los diferentes componentes del Sistema Fotovoltaico.



Figura 3.17: Regulador de carga MPPT.

Tabla 3.11: Especificaciones regulador de carga MPPT

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Corriente máxima	12A
Voltaje de flotación batería	27,6Vdc/24V
Voltaje máx panel Isc	(36-48)Vdc
Voltaje de protección	21,2V/24V
Voltaje de recuperación batería	25,2Vdc
Modo de carga	MPPT y PWM

### 3.4. Cálculo del calibre del cable

Posterior al dimensionado, se calculó el calibre del cableado usado en el sistema fotovoltaico, puesto que escogerlo arbitrariamente puede ocasionar daños en el sistema, pérdidas de corriente o costos innecesarios, partiendo de la ecuación 3.1

$$S = \left( \frac{2 * L * I * R}{AV} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

S = Sección transversal del cable ( $mm^2$ )

L = Longitud de la conducción ( $m$ )

I = Corriente máxima de conducción ( $A$ )

R = Resistividad del conductor ( $Ohm * \frac{mm^2}{m}$ )

AV= Caída de tensión máxima admisible ( $V$ )

El número 2 hace referencia a la cantidad de cables en corriente continua (Positivo (Vcc) y Negativo (GND))

Para el SFV implementado se tienen los valores resumidos en la tabla 3.13.

Tabla 3.12: Parámetros cálculo del calibre

<b>Longitud panel a regulador (máx)</b>	4,85m
<b>Corriente máx en todo el sistema (Panel)</b>	8,6A
<b>Máxima caída de tensión (Panel)</b>	36,3V * 3%
<b>Resistividad del cobre a (20 – 25)<math>^{\circ}</math>C</b>	(0,0171Ohm * $\frac{mm^2}{m}$ )

$$S = \frac{2 * 4,85m * 8,6A * 0,0171Ohm * \frac{mm^2}{m}}{36,3V * 3\%} \quad (3.2)$$

$$S = 0,824mm^2 \quad (3.3)$$

Con el resultado de la ecuación 3.3 y teniendo en cuenta el (Anexo A), el calibre del cable para el sistema eléctrico es de 14.

### 3.5. Caracterización de sensores

Una vez implementado el SFV, se procedió a caracterizar cada uno de los sensores usados:

- Sensor de voltaje:** Para la caracterización y calibración del sensor FZ0430, se utilizan una fuente dual Peak Tech y un multímetro PeakTech (figura 3.18), dicho sensor registra el voltaje suministrado por la fuente de voltaje en incrementos 0,2V hasta 22 V, por medio del IDE del arduino, estos valores se comparan con los datos registrados por el multímetro (Figura 3.18 a) entre la señal de salida y GND del sensor y la salida de la fuente de tensión (Figura 3.18 b).



(a) PeakTech 2010DMM (b) Fuente Dual Peak Tech 6145

Figura 3.18: Instrumentos caracterización

- Sensor de corriente:** Para la caracterización de este sensor (figura 3.19) fue necesario un elemento que alcanzara una corriente moderada con el fin de obtener la mayor cantidad de datos y de este modo asegurar que la repetitividad de los mismos, para esto, se utilizó un bombillo halógeno de 12V que soportaba hasta 5A en corriente. En la toma de datos se realizaron variaciones de 0,2A hasta alcanzar los 5A en la fuente dual, además, fue necesario conectar dos multímetros, uno conectado en serie con el sensor, y el otro en paralelo con la fuente de tensión, de este modo, se logra comparar los valores obtenidos para las variables de voltaje y corriente del sensor, con respecto al registro de los instrumentos tomados como referencia.

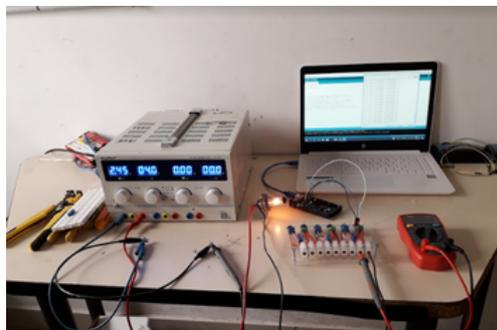


Figura 3.19: Caracterización sensor de corriente.

- Sensor de flujo:** La calibración de este sensor se realizó de manera indirecta pues no se contaba con un instrumento de referencia como un caudalímetro. En la prueba de campo se fijó un flujo de agua constante y se usó una probeta graduada para medir el volumen del líquido recogido en un recipiente, además se registró por medio del IDE del arduino los pulsos por cada litro de agua que circulaba por el sensor. Así mismo se realizó el procedimiento para volúmenes de agua distintos, y con los datos registrados, obtener la curva de comportamiento del sensor. La relación entre volumen y pulsos está dada por la ecuación 3.4.

$$V = K * Pulsos \quad (3.4)$$

Donde:

$V$  = Volumen que fluye por el sensor

$K$  = mililitros constantes por pulso

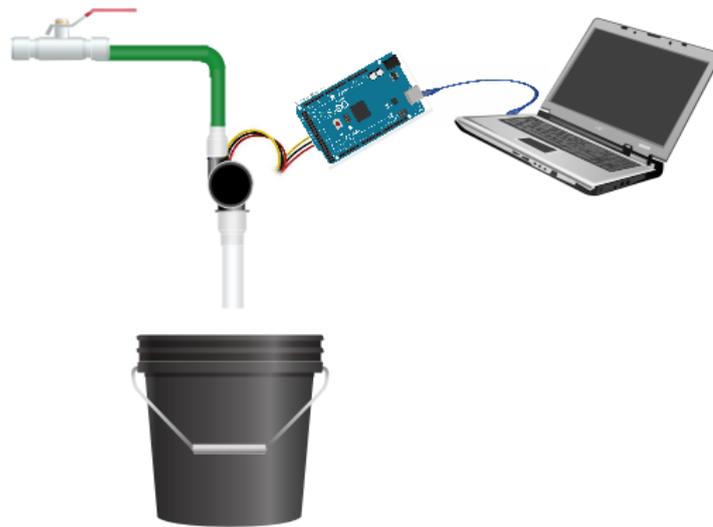


Figura 3.20: Caracterización sensor de flujo [33].

- **Sensor de pH:** Para caracterizar los sensores de pH se utilizó el kit Sension+ MM150 de la marca HACH (Figura 3.21), el cual contiene 3 soluciones tampón con pH de 4.01, 7 y 10.01. En la toma de datos, se registró el valor del voltaje medido en la salida del sensor, para cada una de las soluciones tampón. Inicialmente se probaron 6 sensores, sin embargo tres de ellos presentaron inconsistencias en los datos y fueron descartados, por lo que el proceso de caracterización se realizó con los 3 sensores que presentaban datos cercanos entre sí.



(a) Soluciones tampón



(b) Instrumento patrón y soluciones tampón

Figura 3.21: Caracterización sensores de pH

- Sensor de turbidez:** Fue necesario preparar soluciones tampón (Figura 3.22.a) con diferentes grados de turbidez tomando como referencia los datos obtenidos del turbidímetro HACH 2100N (figura 3.22 b). La tabla 3.14 resume los valores de turbidez con la descripción de las mismas. Posteriormente dichas muestras son utilizadas para la caracterización y calibración de estos sensores que serían usados a la entrada y salida de la planta de tratamiento de agua compacta (Figura 3.23)

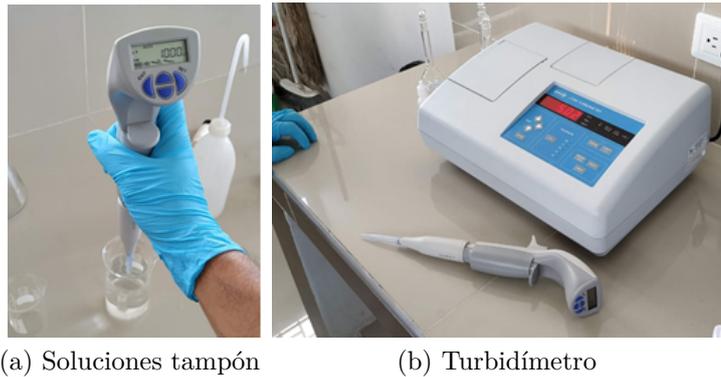


Figura 3.22: Preparación soluciones tampón

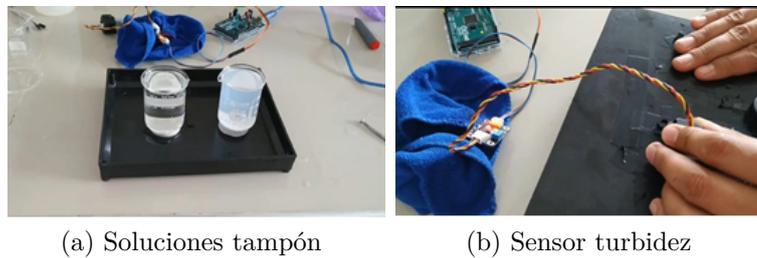


Figura 3.23: Caracterización sensor de turbidez

Tabla 3.13: Caracterización sensor de turbidez

<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	Agua potable
<b>2</b>	Límite máximo (Agua potable)
<b>5</b>	Límite máximo agua apta para consumo
<b>10</b>	No apta
<b>120</b>	No apta

- **Módulo reductor de tensión DC-DC LM 2596:** Debido a que las electroválvulas utilizadas tienen un voltaje de operación de 12V en DC y el sistema implementado funciona a 24V, fue necesario hacer una reducción de voltaje, para esto, se usó el reductor de voltaje DC-DC LM2596 de 24V a 12V (Figura 3.24), con una potencia de 25W, teniendo en cuenta que cada electroválvula consume 5W, solo es necesario un reductor de tensión para las tres electroválvulas.



Figura 3.24: Reductor de voltaje DC-DC

### 3.6. Ajustes

Se realizó un mes de pruebas, 3 días a la semana, 4 horas diarias, para determinar el comportamiento energético de los componentes del sistema fotovoltaico (SFV) y así realizar los ajustes que fueran necesarios. En primer lugar, con la implementación del SFV de prueba, se generaba una corriente excesiva por parte del panel, ocasionando calentamiento por efecto Joule en el cableado que conectaba los sensores de voltaje a la tarjeta de adquisición de datos, sin embargo este comportamiento sólo se presentaba en días de alta irradiancia (), esto se debía a que el SFV estaba sobredimensionado, ya que, después de realizar la caracterización de las cargas en las condiciones de trabajo, se encontró que el consumo eléctrico era menor con respecto a las especificaciones del fabricante, por lo tanto, se diseñó e implementó el SFV que se ajustaba a los requerimientos reales. Además, fue necesario agregar una bomba sumergible en el cálculo del dimensionado, ya que, para definir las acciones de control en las variables del agua, se requería una etapa de recirculación. En el dimensionado del sistema fue necesario considerar aspectos como: Consumo energético diario total de las cargas a conectar, el tiempo de uso y la ubicación del sistema fotovoltaico. Las tablas (3.14-3.15 y 3.16) resumen el valor obtenido para los distintos parámetros a analizar, además se realizaron varios diseños, teniendo en cuenta condiciones ideales (fabricante) y condiciones reales (Caracterización cargas) para tres casos de estudio, pues el tiempo de uso está ligado a la cantidad de agua a potabilizar, teniendo en cuenta que según la OMS se necesitan entre 50L a 100L de agua por persona para satisfacer sus necesidades diarias, se tiene que el caso 1 corresponde a una casa rural de 4 personas, el caso 2, a una casa rural con 8 integrantes, y en el caso 3, a una casa rural con 12 integrantes. Los parámetros utilizados para el diseño se mencionan a continuación:

**Energía total consumida por las cargas:**

$$E_t = P_t * Horas\ uso \quad (3.5)$$

**Factor de corrección o protección por pérdidas (FC):** Tiene en cuenta pérdidas por radiación y ubicación del panel solar.

$$1,1 \leq F.C \leq 1,5 \quad (3.6)$$

**Energía con factor de protección (Wh):**

$$E_p = E_t * 1,3 \quad (3.7)$$

**Capacidad del banco de baterías (Ah):**

$$C_{bat} = \left( \frac{E_p}{V_{sistema}} \right) \quad (3.8)$$

**Capacidad del banco de baterías con protección de descarga profunda (Ah):** Se deja una reserva mínima del 30 %

$$C_p = \left( \frac{C_{bat}}{0,7} \right) \quad (3.9)$$

**Corriente del SFV:**

$$I = \left( \frac{C_p}{Horas\ de\ sol} \right) \quad (3.10)$$

**Potencia del SFV:**

$$P = I * V_{max} \quad (3.11)$$

**Caso 1:** Casa rural con 4 personas

Tabla 3.14: Caso 1 diseño SFV

Parámetros	
Horas de uso	1h
Horas sol pico	4h
Energía con protección	390Wh
Capacidad baterías	16,25Ah
Capacidad baterías con protección	23,21Ah
Corriente del SFV	5,80A
Potencia del SFV	106,20W

**Caso 2:** Casa rural con 8 personas

Tabla 3.15: Caso 2 diseño SFV

Parámetros	
Horas de uso	1,15h
Horas sol pico	4h
Energía con protección	448,5Wh
Capacidad baterías	18,68Ah
Capacidad baterías con protección	26,69Ah
Corriente del SFV	6,67A
Potencia del SFV	122,13W

**Caso 3:** Casa rural con 12 personas

Tabla 3.16: Caso 3 diseño SFV

Parámetros	
Horas de uso	1,72h
Horas sol pico	4h
Energía con protección	670,8Wh
Capacidad baterías	27,95Ah
Capacidad baterías con protección	39,92Ah
Corriente del SFV	9,98A
Potencia del SFV	182,67W

Teniendo en cuenta la tabla 3.14, se realiza la implementación del SFV para ese caso de estudio, por lo tanto fué necesario reemplazar el panel y las baterías de acuerdo a las condiciones reales del sistema (figura 3.25).

- **Panel policristalino 12V**

Tabla 3.17: Especificaciones Panel 12V

Potencia máx ( $P_{m\acute{a}x}$ )	100W
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	22,68V
Voltaje máximo ( $V_{mp}$ )	18,1V
Corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ )	5,60A
Corriente máxima ( $I_{mp}$ )	5,23A

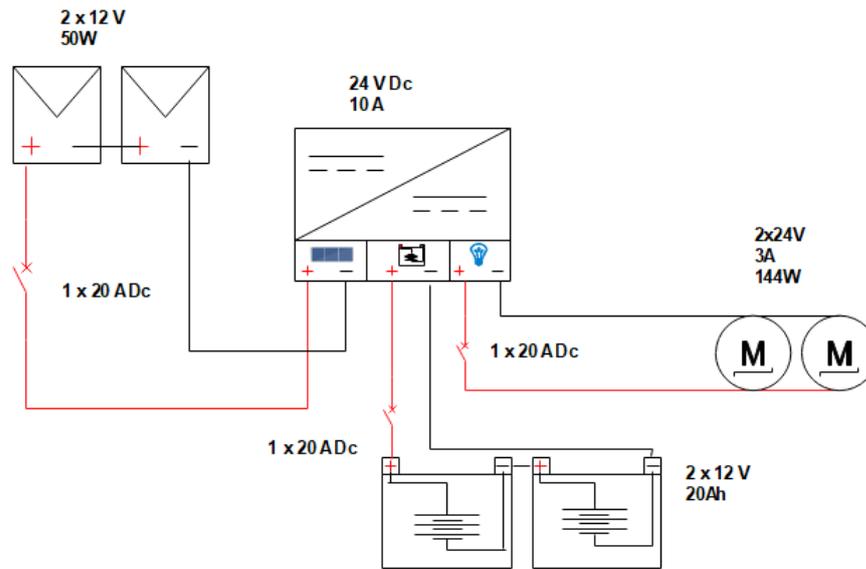


Figura 3.25: Sistema fotovoltaico ajustado [33].

- **Banco de acumulación 12V/20Ah**

Tabla 3.18: Especificaciones Baterías 12V/20Ah

<b>Voltaje nominal</b>	12V
<b>Capacidad</b>	18Ah
<b>Voltaje de carga flotante</b>	13,60V a 13,80V
<b>Voltaje de carga cíclico</b>	14,50V a 14,90V
<b>Corriente de carga máxima</b>	5,4A

- **Sensor de voltaje**

El rango del sensor FZ0430 es de 0 a 25V y el voltaje del panel puede superar los 44 V en circuito abierto, por tanto, no era adecuado para el sensado. Partiendo del modelo eléctrico, obtenido del datasheet del fabricante, se tiene que su configuración se basa en un divisor de tensión (Figura 3.26), por lo cual, se realiza un divisor de voltaje (figura 3.27) que se ajusta al voltaje de salida entregado por el sistema, usando resistencias de 1 MOhm y 9 MOhm se obtiene una relación 1 a 10, considerando que el valor máximo de lectura del arduino es 5V, se tiene un valor máximo de lectura de 50V. El rango fue suficiente para sensar el voltaje de panel en circuito abierto.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.12)$$

$$V_{out} = 50V \frac{1MOhm}{10MOhm} \quad (3.13)$$

$$V_{out} = 50V \frac{1}{10} \quad (3.14)$$

$$V_{out} = 5V \quad (3.15)$$

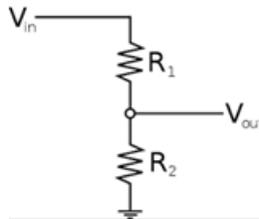


Figura 3.26: Divisor de tensión

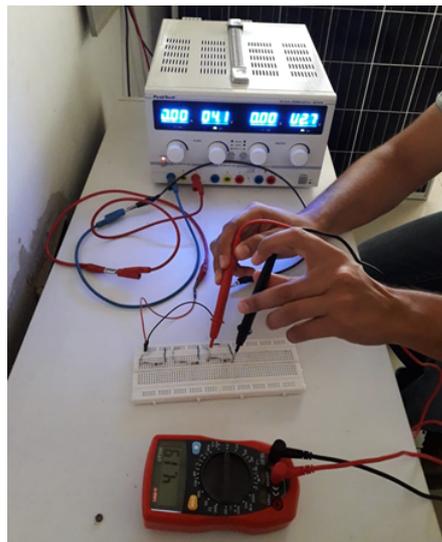


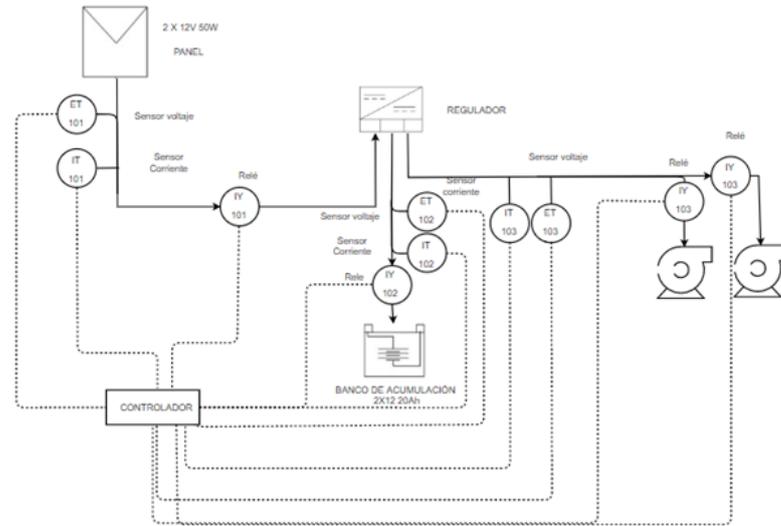
Figura 3.27: Caracterización divisores de tensión

- **Sensor de turbidez**

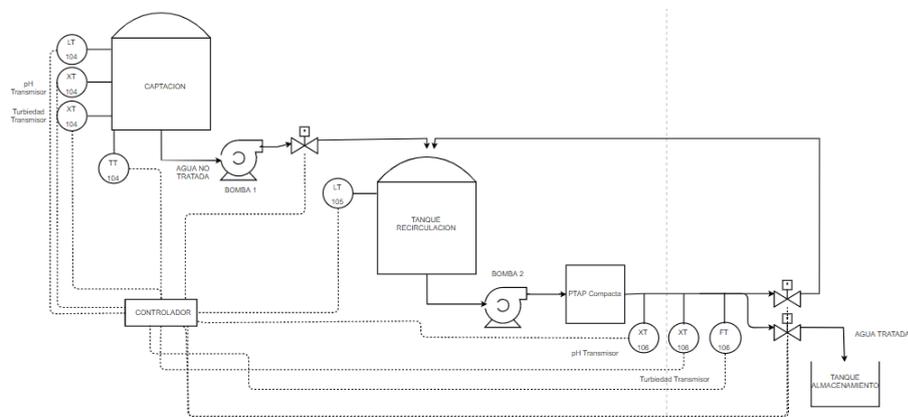
Debido a la resolución del instrumento, se decidió trabajar en modo digital, generando alarmas si la turbidez estaba por encima de valores establecidos por medio del potenciómetro incorporado.

### 3.7. Diseño e implementación del sistema de control

El sistema de control diseñado e implementado se basa en el correcto funcionamiento del sistema de sensado de variables, a continuación se muestra de manera general la articulación de los dos sistemas mencionados:



a) Diagrama de control eléctrico



b) Diagrama de control del agua

Figura 3.28: Diagrama de control del sistema

Conociendo la manera en la que trabajarán articulados los sistemas de supervisión y control, fue necesario conocer las condiciones que afectan y acortan la vida útil de los componentes del sistema fotovoltaico, posterior a esto se procedió a tomar las siguientes acciones de control, incluidas alarmas, en función de las variables eléctricas sensadas (Figura 3.29):

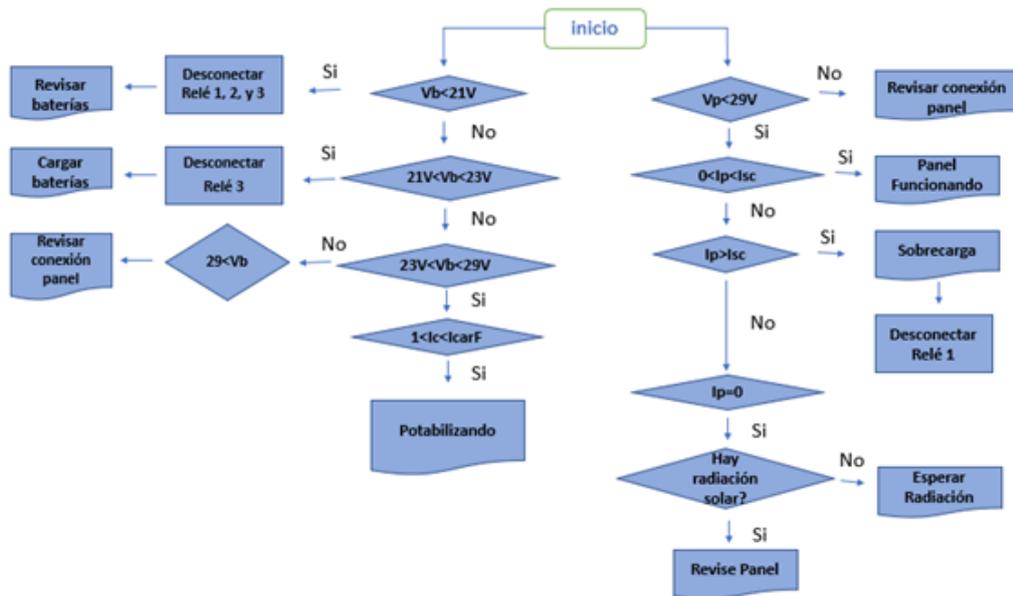


Figura 3.29: Diagrama de flujo sistema fotovoltaico

- Donde:  $V_b$ : Voltaje de baterías  
 $V_p$ : Voltaje de panel  
 $I_c$ : Corriente de la planta  
 $I_{carF}$ : Corriente de la planta dada por el fabricante  
 $I_{sc}$ : Corriente del panel en corto circuito  
 Relé 1: Conectado en serie con el panel  
 Relé 2: Conectado en serie con las baterías  
 Relé 3: Conectado en serie con la planta

Una vez realizado el control eléctrico, el cual garantiza que las bombas van a tener el suministro eléctrico suficiente, se procedió a implementar el control del agua. Si el agua a la entrada de la planta no se encuentra dentro de los rangos aceptados por la misma, la bomba de captación no se activa y se cierra la electroválvula, en caso contrario, el agua pasará al tanque 2, si después del tratamiento realizado por la planta el agua no cuenta con los valores requeridos de las variables medidas, se realiza un proceso de recirculación del agua para mejorar su calidad, si después de 5 ciclos de recirculación las variables medidas del agua no se encuentran en los valores deseados, se parará el proceso pues los filtros no están cumpliendo con su labor (esto se le informa al usuario para que proceda al cambio de estos) y se estará desperdiciando energía eléctrica, esto se explica en la figura 3.30

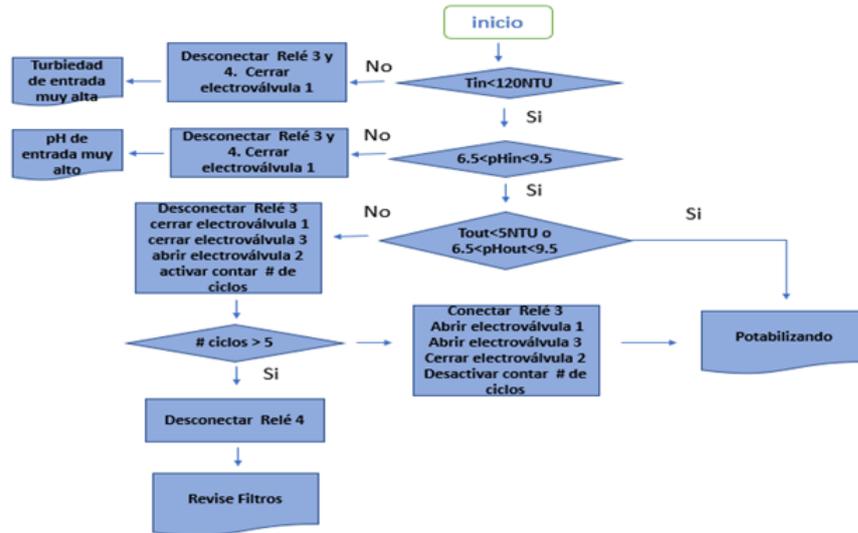


Figura 3.30: Diagrama de control planta de tratamiento de agua

Donde:

- Relé 3: Conectado en serie con bomba de captación (Bomba 1)
- Relé 4: Conectado en serie con bomba de tanque (Bomba 2)
- Electroválvula 1: Conectada después de bomba de captación
- Electroválvula 2: Conectada en el circuito de recirculación
- Electroválvula 3: Permite el paso al tanque de almacenamiento de agua potable

### 3.8. Interfaz

Para informar al usuario el estado general del sistema se implementó una interfaz en LabVIEW [31], este software fue escogido porque se ajustaba a las necesidades requeridas, ya que, facilitaba la visualización de los datos de forma amigable. LabVIEW es una herramienta muy útil para este proyecto, ya que como afirma National Instruments “ofrece un enfoque de programación gráfica que le ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración [31]. Esta visualización hace que sea más fácil integrar hardware de medidas de cualquier proveedor, representar una lógica compleja en el diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaces de usuario personalizadas”.

Para la interfaz se crearon 4 ventanas (Figura 3.31) que muestran al usuario el estado de sistema en cada etapa que ha sido implementada.

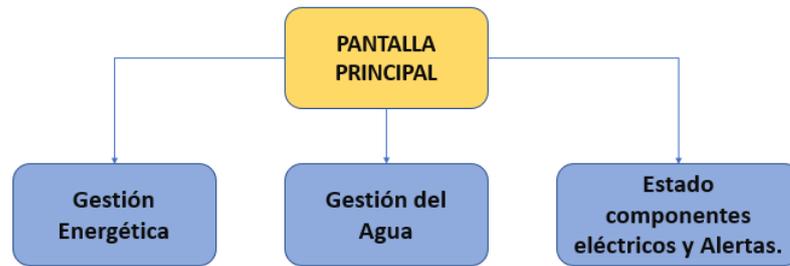


Figura 3.31: Ventanas de visualización en la interfaz gráfica

### 3.8.1. Pantalla principal

Informa al usuario sobre el estado General de la planta, mostrando datos como la producción energética del sistema fotovoltaico, el consumo de la planta en el tiempo de evolución de los datos, si se cumplen con los valores de pH y turbidez tanto en la entrada como en la salida, el volumen de agua tratado así como el estado de los componentes eléctricos del sistema, panel, batería y planta.

### 3.8.2. Gestión energética

Informa al usuario sobre el estado del agua antes y después del tratamiento, el estado de los componentes de la planta como son electroválvulas y bombas, el número de ciclos de recirculación que haya requerido el proceso de potabilización, además genera alertas sobre el cambio de filtros.

### 3.8.3. Estado de los componentes eléctricos y alertas

Informa sobre el estado de los componentes energéticos del sistema cuando se han tomado y las alertas para mantenimiento correctivo o preventivo en los diferentes casos.

## 3.9. Evaluación

Para evaluar el sistema de supervisión implementado, se compararon los datos obtenidos de los sensores usados con los instrumentos de referencia, en primer lugar se caracterizaron y calibraron todos los sensores a usar, con lo que después de implementado todo el sistema se realizaron algunas pruebas para observar el comportamiento del sistema, y así realizar ajustes a los datos obtenidos, minimizando el error relativo porcentual entre las medidas de dichos sensores y las medidas que registraban los instrumentos de referencia hasta obtener un máximo de 5 %. Se realizó un mes de pruebas, 3 días a la semana, 4 horas diarias, cada prueba, contenía 15.000 datos, que fueron tratados estadísticamente y así visualizar a través de gráficas, los resultados obtenidos.

# Capítulo 4

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Dimensionado de las cargas, sensores y actuadores

#### 4.1.1. Caracterización de la carga (Bomba sumergible)

Después de realizar tres días de prueba, 4 horas, para obtener el comportamiento de la bomba sumergible conectada al sistema fotovoltaico, se tiene que en las condiciones de profundidad del tanque de almacenamiento de agua, el consumo eléctrico de la bomba no supera los 3A. Para las pruebas y caracterización realizadas en campo, se toma una profundidad de sumersión de acuerdo a la capacidad del tanque de almacenamiento de 500L, de este modo se logra caracterizar en función del volumen de agua bombeado en una hora, además del consumo energético en dichas condiciones de prueba; se puede verificar el uso del sistema de adquisición de datos e interfaz, para la caracterización en diferentes condiciones de operación, logrando el desarrollo de una herramienta funcional y versátil, para caracterizar y mejorar diseños de sistemas de bombeo como el del caso de estudio. La respuesta en función del volumen se muestra en la figura 4.1

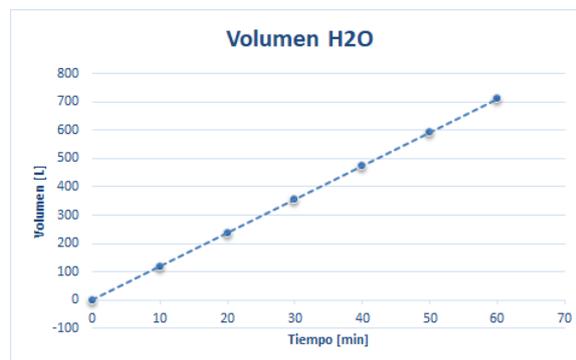
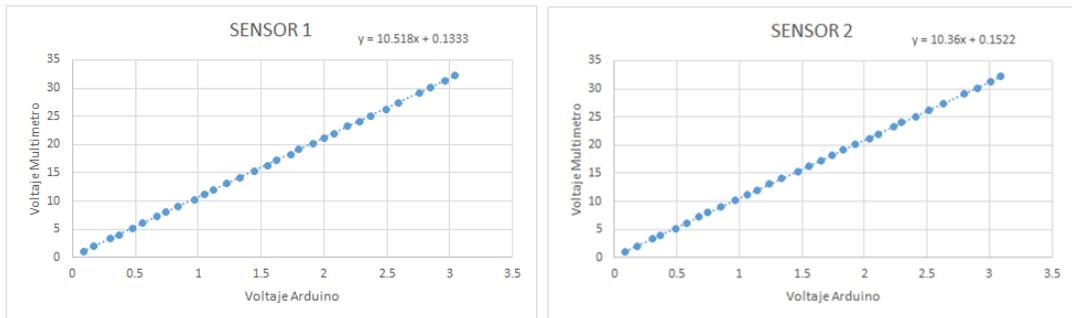


Figura 4.1: Curva característica bomba sumergible

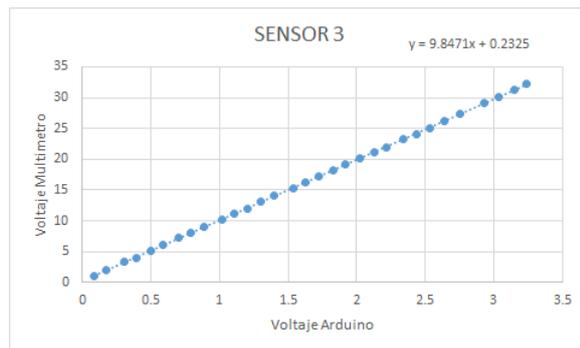
## 4.1.2. Caracterización y calibración de sensores y actuadores

### Sensores:

- **Sensor de voltaje:** Como se mencionó en el capítulo 3, en el apartado de ajustes, el sensor de voltaje que se tenía inicialmente fue reemplazado por un divisor de tensión, que fue caracterizado al igual que los demás sensores. Dicha caracterización permite obtener la función característica del arreglo de resistencias. El comportamiento se ve reflejado por una función lineal (Figura 4.2), donde la ecuación característica es programada en arduino y así realizar mediciones para realizar la calibración del instrumento. Para las tres gráficas (Figura 4.2. a, b y c) la función característica es diferente, aun con el mismo valor numérico de las resistencias, esto se debe al porcentaje de tolerancia de cada una de las resistencias, ya que puede variar de acuerdo a cambios de temperatura, además de estar en el orden de Mega Ohms, pues era necesario minimizar o en el mejor de los casos eliminar el paso de corriente por la etapa de control y así evitar daños en el circuito.



(a) Curva característica divisor de tensión 1 (b) Curva característica divisor de tensión 2

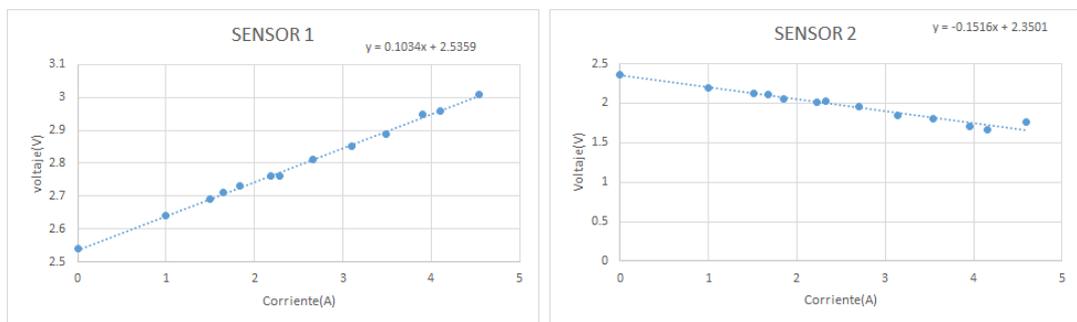


(c) Curva característica divisor de tensión 3

Figura 4.2: Curvas características divisor de tensión

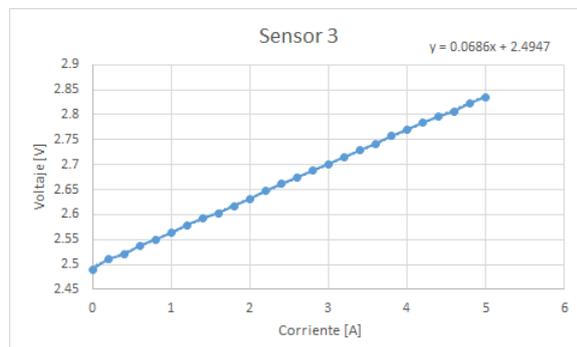
- **Sensor de corriente:** En la caracterización de estos sensores, se encontró que su respuesta se ajustaban a una función lineal (figura 4.3), donde el sensor 1 y 2 (Figura 4.3. a y b) corresponden a un sensor de 5, y el sensor 3 (Figura 4.3.c) a uno de 30A, se configuró de esta manera porque el rango de medición

para el panel y el banco de acumulación estaba entre 0A a 5A, mientras que la carga generaba una corriente de 6A. En la función de transferencia dada por el fabricante, asignaba un valor de 2,5V en la salida del sensor, para una corriente de 0A, por esto, el rango de registro de la señal de salida, estaba por encima o por debajo de los 2,5V, dependiendo del sentido del flujo de corriente, con el fin de asegurar que el comportamiento fuera lineal para todo el rango del sensor, por esto, cada uno de los sensores se caracterizaron tomando valores dentro de todo el rango. El sensor 2 (Figura 4.3.c), muestra la respuesta en voltaje por debajo de los 2,5V, se tiene que el comportamiento corresponde a una función lineal con una pendiente negativa, pero con magnitud similar a las pendientes de los sensores 1 y 3.



(a) Curva característica sensor corriente 1

(b) Curva característica sensor corriente 2



(c) Curva característica sensor corriente 3

Figura 4.3: Curvas características sensor de corriente

- Sensor de flujo:** La cantidad de agua que fluía por este sensor, fue medida por medio de la programación en el IDE del arduino, y se relacionó con el número de pulsos que registraba el monitor serial del arduino por cada mL, con los datos obtenidos después de 3 pruebas para cada volumen medido, se encuentra que la ecuación que se ajusta al comportamiento de dicho sensor, está dada por una función lineal (Figura 4.4) en el que un pulso corresponde a un volumen de 23mL, debido a que no se tenía un instrumento de referencia como los demás sensores, la calibración se hizo de forma indirecta, por medio de un probeta, se determinó el volumen de agua que fluía a través del sensor. Con el fin de disminuir errores sistemáticos, presentes en el proceso de medición, sin embargo, los errores personales son difíciles de estimar, por lo que se decidió

que la misma persona realizara todas las mediciones correspondientes a la caracterización y calibración, con el fin de disminuir errores.

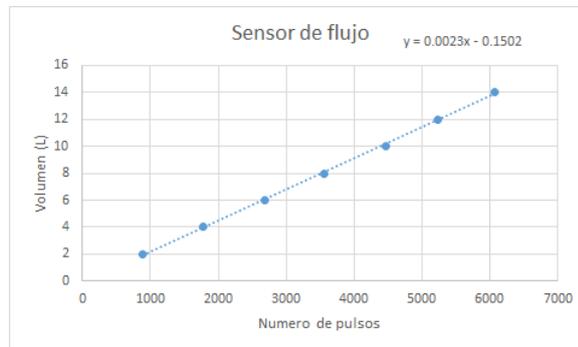
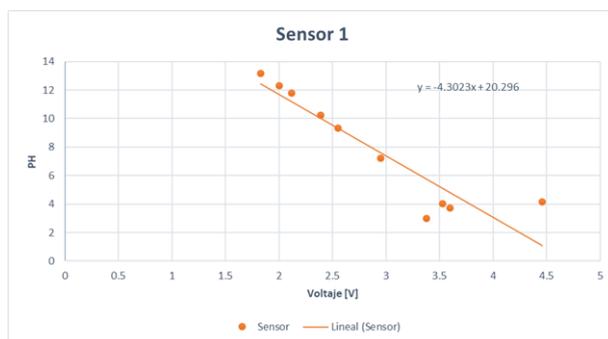
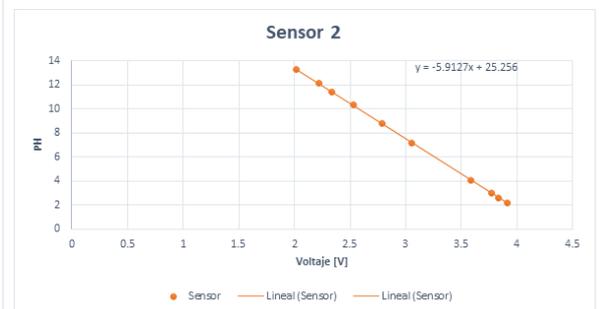


Figura 4.4: Curva característica sensor de flujo

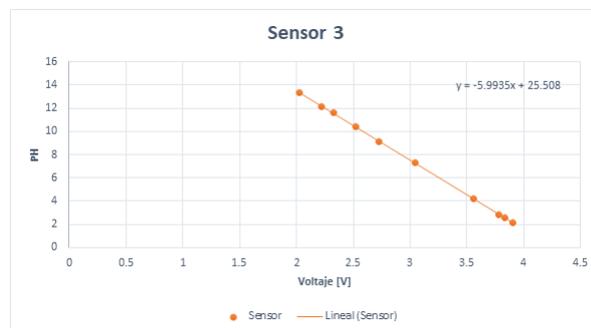
- Sensor de pH:** Para las pruebas realizadas se encuentra que el comportamiento en la salida de cada uno de los sensores está determinado por una función lineal (Figura 4.5), el sensor 1 (Figura 4.5.a) registraba un valor alejado en algunas soluciones tampón, por lo que se descartó y se trabajó con los dos sensores que presentaban mayor exactitud en las mediciones (figura 4.5 b y c).



(a) Curva característica sensor pH 1



(b) Curva característica sensor pH 2



(c) Curva característica sensor pH 3

Figura 4.5: Curvas características sensor de pH

- **Sensor de turbidez:** Debido al rango de medición de este sensor, fue necesario descartar el modo analógico incorporado. Ya que, la variación en voltaje entre 1.000NTU y 3.000.NTU, era solo de 1,9V, debido a la resolución del arduino, por lo que la medición de valores cercanos en NTU resultaba imprecisa, por esto se decide usar el sensor en su modo digital, y ajustar el valor deseado por medio de la resistencia incorporada para tal fin, de tal modo que la salida tiene dos estados, que se visualizan en el led interno del Arduino Mega, donde el led encendido indica que el valor del agua en NTU está por encima del valor ajustado.

### 4.1.3. Implementación del sistema de sensado de variables

Una vez caracterizados y calibrados los sensores usados, se procedió a realizar el montaje de la tarjeta de adquisición de datos (Figura 4.6).

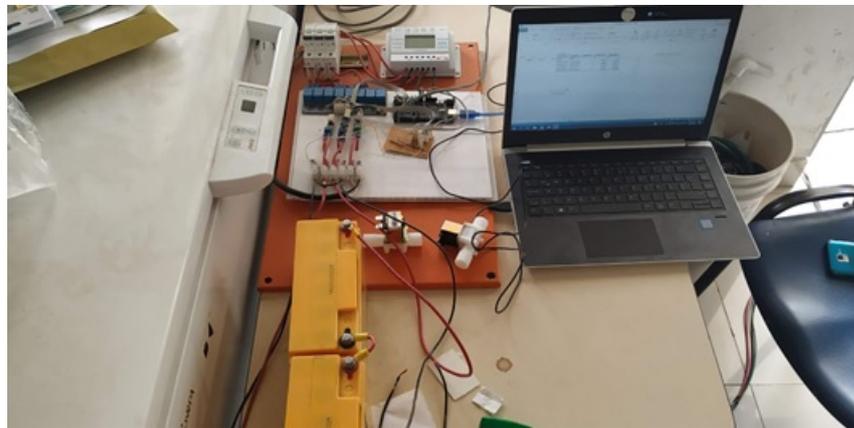


Figura 4.6: implementación del sistema de sensado de variables.

## 4.2. Implementación del sistema fotovoltaico

Se implementó el sistema fotovoltaico de prueba disponible en el laboratorio de energías renovables del CTPI (Figura 4.7), con el fin de realizar mediciones iniciales de potencial de generación fotovoltaica en el punto de estudio y la caracterización inicial del comportamiento energético de la bomba de agua; con este sistema de prueba se realizaron pruebas durante tres semanas, identificando fallas relacionadas con la generación fotovoltaica, encontradas mediante mediciones y registros, lo cual produjo un calentamiento en las resistencias del divisor de tensión implementado, provocando daño en el cableado y gasificación en el banco de acumulación, adicionalmente, se identifica que el sistema de bombeo utilizado como piloto, exige una potencia inferior a la especificaba por el fabricante, por lo que fué necesario ajustarlo a las condiciones de trabajo; Con los primeros datos de potencia de generación en punto de aplicación y de consumo inicial de energía en el sistema, se dimensionó e implementó un sistema fotovoltaico de acuerdo a las condiciones establecidas (Figura 4.8),

tanto en requerimientos de potencia, como en tiempos de trabajo de la planta; este sistema fotovoltaico ajustado, una vez comprobado su funcionamiento energético, se utilizó para el desarrollo de pruebas de campo, optimización de sistema de adquisición de datos y desarrollo de interfaz usuario en las fases restantes del proyecto.

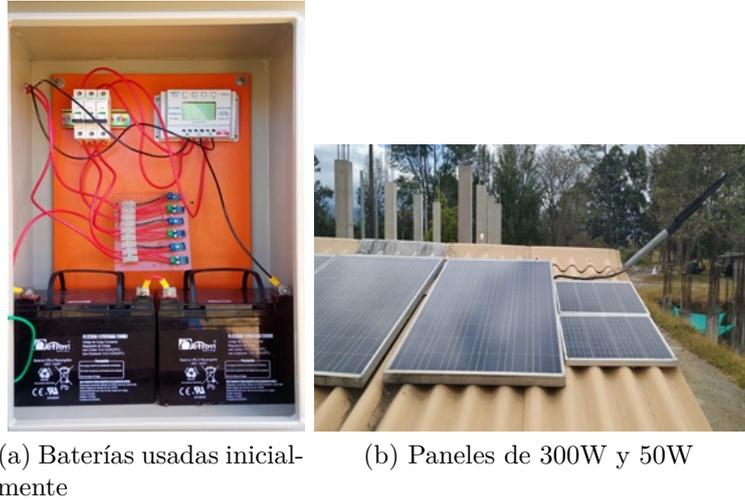
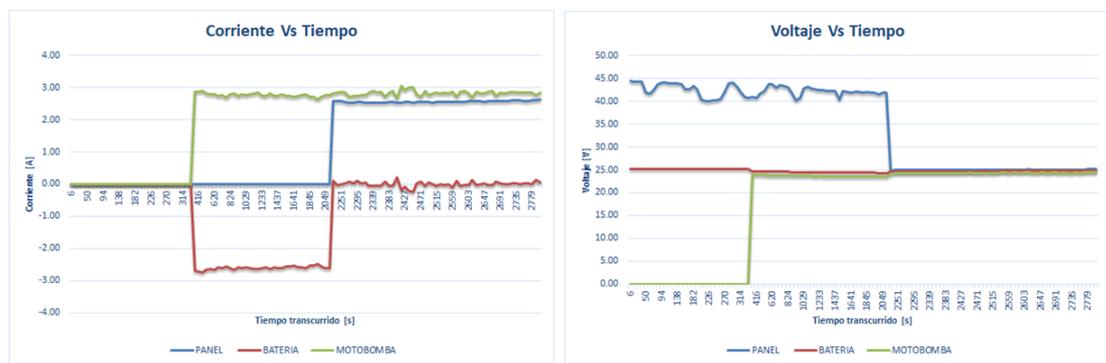


Figura 4.7: Sistema fotovoltaico inicial



Figura 4.8: Sistema implementado después del ajuste

Dentro del mes de pruebas y ajustes, se realizaron 4 pruebas, correspondientes a 4 horas diarias, con el fin de observar la gestión energética del sistema implementado, y, a partir de los resultados, establecer las condiciones de control eléctrica necesarias para la protección y mejoras o corrección de posibles fallos. En primer lugar, se analiza el comportamiento de éste, con respecto a la corriente de cada uno de sus componentes (Panel, Batería, bomba) (Figura 4.9). Se analizaron tres casos de estudio, en el primero, se tiene el sistema apagado, las protecciones termomagnéticas están normalmente abiertas por lo cual no se permite el paso de corriente al sistema, los sensores registran la corriente en 0A para los tres elementos, en el segundo caso, la protección del banco de acumulación se cierra para que permita el paso de corriente y así registrar el estado de las baterías, como el porcentaje de carga es superior al 30 % de carga del banco de acumulación, se puede permitir el paso de corriente hacia la bomba e iniciar el proceso de potabilización durante 30 min, esto ocasionó que las baterías disminuyeran su carga, pues la corriente exigida por la bomba era suministrada en su totalidad por éstas, por lo que fue necesario permitir la generación de corriente del panel, siendo este el tercer caso, aquí se realizó una convención de signos (tabla 4.1), con el fin de poder determinar si el banco de acumulación está siendo cargado por el generador fotovoltaico o descargado por la bomba. Para este último caso se tiene que la corriente del generador fotovoltaico está por encima de la corriente exigida por la bomba para su funcionamiento (Figura 4.9), por lo que además de suministrar la energía necesaria para iniciar el proceso de potabilización, permite entregar energía para cargar las baterías.



(a) Corriente

(b) Voltaje

Figura 4.9: Prueba 26 de agosto 2019

Tabla 4.1: Conversión de signos.

Elementos	Signo	Estado
Panel	+	Falla
	-	Entrega al sistema
Batería	+	Cargando
	-	Descargando
Bomba	+	Encendido
	-	Falla

Sumado a lo anterior, también se vio necesario conocer el comportamiento energético con respecto al voltaje generado por el regulador en los tres casos mencionados anteriormente (Figura 4.9.b), así, en el primer caso en el que la protección de las baterías está cerrada, el voltaje registrado por el sensor del panel, estaba entre 40 V y 45 V, este valor representa el voltaje en circuito abierto del panel fotovoltaico, este parámetro indica posibles fallas en el panel si todo está en funcionamiento y el sensor registra dichos valores. En el segundo caso, donde se tiene en funcionamiento la bomba, y la energía es suministrada completamente por el banco de acumulación, el voltaje en las baterías no puede estar por debajo del 30% de carga, pues la descarga por debajo de este valor, ocasiona daños a las baterías, disminuyendo la vida útil de las mismas. Finalmente, se tiene el último caso donde el generador está suministrando la corriente necesaria para el funcionamiento de la bomba, se tiene que el voltaje en los tres componentes son cercanos entre sí, pues el generador es quien provee la energía a la bomba, por lo tanto las baterías no suministran energía al sistema, manteniendo su tensión alrededor de 25V que representa el voltaje de flotación del banco de acumulación.

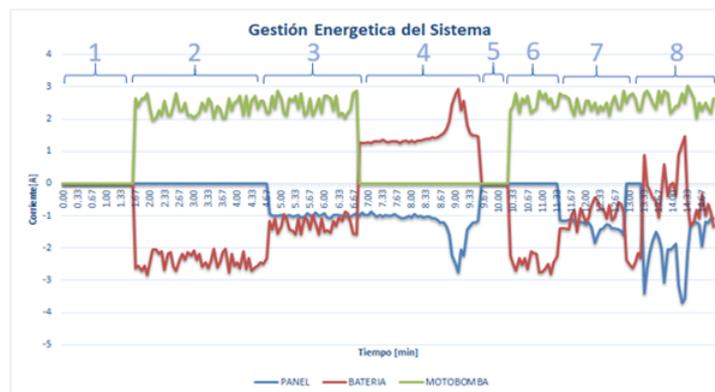


Figura 4.10: Prueba 29 de agosto de 2019

Además se realizaron 4 pruebas, registrando 4 horas de datos, en diferentes horas del día con el fin de tener fiabilidad en los datos obtenidos en los casos de estudio mencionados anteriormente, y así poder determinar los parámetros necesarios para implementar el sistema de control a los componentes de las variables eléctricas. El 29 de agosto se realizó una prueba final (Figura 4.10)

y a partir de los resultados obtenidos, corroborar el funcionamiento del sistema y la gestión energética del mismo, se realizaron pruebas de 15 min en diferentes horas de la mañana y de la tarde, ésta en particular se realizó al medio día donde se presentaban picos de irradiancia y los casos de estudio podían evidenciarse con mayor facilidad. Los casos de estudio mencionados anteriormente se explican partiendo de la figura 4.10, donde cada uno ha sido numerado del 1 al 8:

**Caso 1:** Las protecciones se encuentran abajo, de tal manera que todos los componentes se encuentran desconectados, el panel no genera corriente, la bomba no está conectada por lo cual no consume corriente, por lo tanto la batería no está siendo cargada o descargada.

**Caso 2:** Se suben protecciones de batería y bomba, pero no la del panel; la batería empieza a ser descargada para alimentar la bomba, se observa que la corriente que consume la bomba es la misma entregada por la batería con signo contrario (debido a las convenciones mencionadas). Este caso puede presentarse cuando se desee potabilizar agua en la noche.

**Caso 3:** Se sube protección del panel comenzando este a suministrar la corriente requerida por la bomba, pero al no ser suficiente el banco de acumulación suministra el excedente. Este caso se presenta cuando hay baja irradiancia solar.

**Caso 4:** Se potabiliza la cantidad de agua deseada y se apaga la bomba (Corriente 0A), toda la corriente generada por el panel es usada para cargar el banco de acumulación.

**Caso 5:** Cuando el banco de acumulacion se carga por completo el regulador desconecta el panel, por lo que las corrientes de panel, batería y carga, en este caso bomba, son de 0A.

**Caso 6:** En este caso se presenta la misma situación explicada en el caso 2.

**Caso 7:** El panel es conectado y las variaciones de irradiancia se reflejan en las variaciones de las corrientes de panel y batería, las cuales se compensan para entregar a la carga la corriente suficiente.

**Caso 8:** En este caso sucede una situación de gran importancia en los sistemas fotovoltaicos, la radiación solar alcanza su valor máximo y la corriente producida por el panel es mayor a la requerida por la carga, por lo que el sobrante es usado para cargar las baterías.

Con el sistema de supervisión implementado se constata el correcto funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico, y se verifica lo aprendido teórica-

mente, pero los reguladores carecen de protecciones extras que ayuden alargar la vida útil de sus componentes, lo que se logra con el sistema de control implementado a continuación.

Además, se diseña e implementa el sistema de control para la gestión energética, el cual previene fallas en el sistema fotovoltaico, buscando garantizar o alargar la vida útil de cada uno de sus componentes, partir de las pruebas realizadas y resultados obtenidos.

### 4.3. Diseño e implementación del sistema de control

Para el desarrollo del sistema de control se establecen los casos a considerar a partir de los análisis energéticos realizados, los valores obtenidos en voltaje y corriente para los diferentes componentes del sistema y la asociación en la interfaz desarrollada a leds indicadores de estado de manera visual.

#### 4.3.1. Casos de control eléctrico

A continuación se muestran los casos de control posibles, para la conexión y desconexión de los componentes del sistema fotovoltaico utilizado, contando con 6 leds, que permiten informar al usuario, el estado de cada componente y alertas sobre posibles situaciones que están sucediendo, para así tomar las acciones correctivas necesarias. Se usó la siguiente notación.

Tabla 4.2: Casos de control eléctrico.

Dispositivo	Nombre Asignado	Estado	Estado Lógico	Color Led
Paneles Solares	Relé panel	Conectado	1	Verde
		Desconectado	0	Negro
Baterías	Relé batería	Conectado	1	Verde
		Desconectado	0	Negro
Bombas	Relé carga	Conectado	1	Verde
		Desconectado	0	Negro

**Caso 0:** Las baterías han caído en ciclo de descarga profunda (tienen una carga inferior al 30%), por lo cual el sistema desconecta panel, baterías y carga, mostrando una alerta asociada a banco de baterías: “Revise Baterías”, de esta manera se protegen componentes eléctricos del sistema (figura 4.11).

Tabla 4.3: Caso 0 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
0	0	0	0		Revise baterías

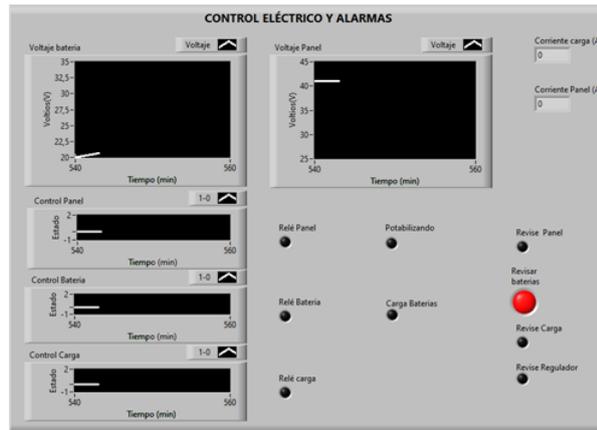


Figura 4.11: Control eléctrico caso 0

**Caso 1:** Antes de llegar a descarga profunda y para evitar esto, se ha implementado un rango en el cual toda la energía producida por el panel solo es usada para cargar las baterías, por lo cual se desconecta la carga, de esta manera se aumenta la vida útil de las baterías (figura 4.12).



Figura 4.12: Caso 1 eléctrico

Tabla 4.4: Caso 1 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
1	1	1	0	Carga batería	

**Caso 2:** Las baterías tienen carga suficiente para alimentar la bomba, además el panel sigue en producción, pero la carga no se pone en funcionamiento después de haberse dado el orden de empezar su funcionamiento, por lo tanto se muestra la alerta “Revisar Carga”, con esta alerta sabe donde está el problema y el usuario no pierde tiempo revisando otros componentes del sistema como baterías o panel (figura 4.13).

Tabla 4.5: Caso 2 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
2	1	1	0		Revise carga

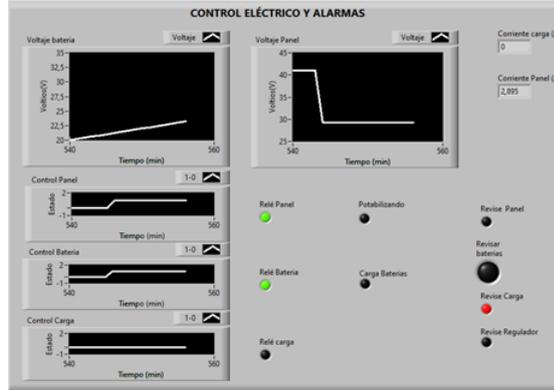


Figura 4.13: Caso 2 eléctrico

**Caso 3:** El panel está conectado y se encuentra produciendo, la carga se encuentra activa el conjunto panel-baterías suministra la potencia necesaria, es decir, el sistema está en funcionamiento de manera correcta, se indica en la interfaz el aviso “Potabilizando” (figura 4.14).



Figura 4.14: Caso 3 eléctrico

Tabla 4.6: Caso 3 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
3	1	1	1	Potabilizando	

**Caso 4:** Las baterías han superado el voltaje de operación, esta situación puede darse cuando el regulador no está realizando bien su función, lo que puede llevar a dañar los componentes del sistema, para evitar esto se desconectan todos los componentes del sistema y aparece la alerta “Revise Regulador” (figura 4.15).

Tabla 4.7: Caso 4 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
4	0	0	0		Revise regulador

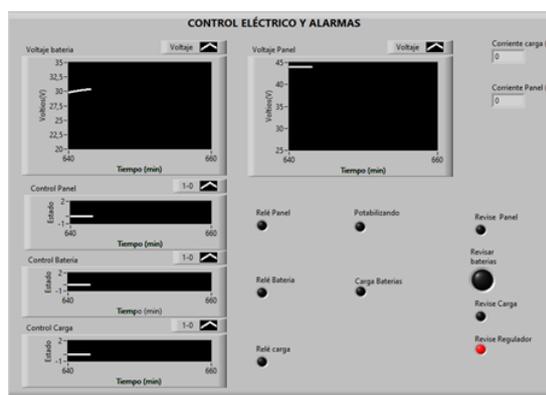


Figura 4.15: Caso 4 eléctrico

**Caso 5:** El panel se encuentra conectado pero no está produciendo energía, esta es suministrada por las baterías para realizar el proceso de potabilización, se muestra la alerta “Revise Panel” y el indicador “Potabilizando”, de esta manera cuando se agote la carga disponible el usuario sabrá que la causa fue la falta de producción en panel y podrá tomar las acciones pertinentes (figura 4.16).

Tabla 4.8: Caso 5 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
5	0	1	1	Potabilizando	Revise panel

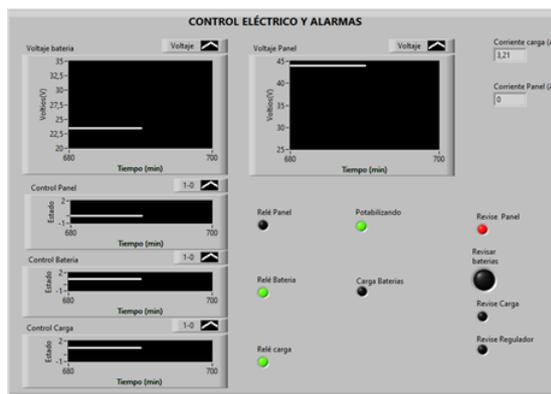


Figura 4.16: Caso 5 eléctrico

**Caso 6:** El panel no está produciendo, pero las baterías tienen carga disponible, sin embargo la carga no se encuentra en funcionamiento, por lo que aparecen las alertas “Revisar Panel” y “Revisar Carga” (figura 4.17).

Tabla 4.9: Caso 6 eléctrico.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
6	0	1	0		Revisar panel y Carga

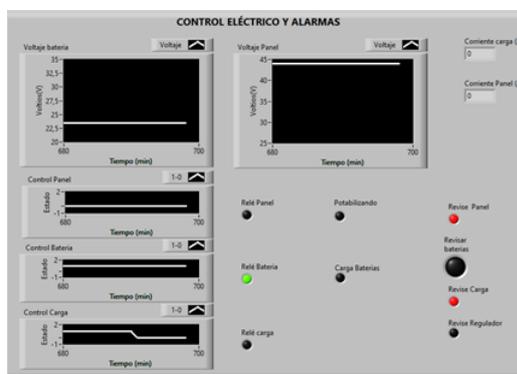


Figura 4.17: Caso 6 eléctrico

Los casos explicados incluidas las alertas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.10: Casos eléctricos de control.

Caso	Relé panel	Relé batería	Relé carga	Indicador	Alerta
0	0	0	0		Revisar baterías
1	1	1	0	Carga batería	
2	1	1	0		Revisar carga
3	1	1	1	Potabilizando	
4	0	0	0		Revisar regulador
5	0	1	1	Potabilizando	Revisar panel
6	0	1	0		Revisar panel y Carga

### 4.3.2. Casos de control de agua

Una vez implementados los casos de control eléctrico, se procedió a implementar los casos de control del agua, se muestran los diferentes casos de control posibles, los diferentes leds al lado de cada dispositivo informan al usuario el estado de este y las alertas informan sobre posibles situaciones que están sucediendo para así tomar las acciones correctivas necesarias. Se usó la siguiente notación.

Tabla 4.11: Notación control de agua.

Dispositivo	Nombre Asignado	Estado	Estado Lógico	Color Led
Bomba sumergible ubicada en captación	Bomba 1	encendida	1	Verde
		Apagada	0	Rojo
Bomba sumergible ubicada en tanque	Bomba 2	Encendida	1	Verde
		Apagada	0	Rojo
Electroválvula ubicada entre captación y tanque	Valv 1	Abierta	1	Verde
		Cerrado	0	Rojo
Electroválvula ubicada entre caja de sensores 2 y tanque	Valv 2	Abierta	1	Verde
		Cerrado	0	Rojo
Electroválvula ubicada entre caja de sensores 2 y tanque de almacenamiento final	Valv 3	Abierta	1	Verde
		Cerrado	0	Rojo

**Caso 0:** Las protecciones se encuentran abajo y no hay suministro de corriente, todos los dispositivos se encuentran apagados (figura 4.18).

Tabla 4.12: Caso 0 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
0	0	0	0	0	0

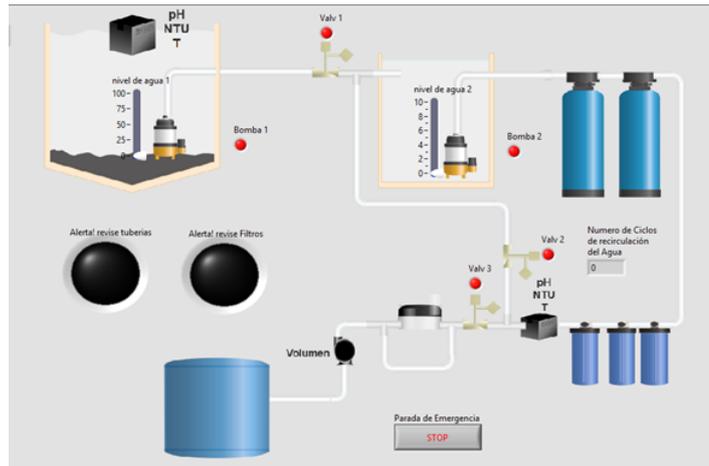


Figura 4.18: Caso 0 control agua

**Caso 1:** las protecciones se encuentran arriba, los dispositivos cuentan con corriente. Las variables sensadas del agua están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC, el nivel del agua sensado en la captación y en el tanque es muy bajo, por lo tanto las bombas 1 y 2 no se encienden, Valv 1 se encuentra cerrada como protección, de tal forma que llegue líquido al tanque, pues cuando el nivel es muy bajo puede traer suciedad. Valv 2 se encuentra cerrada, pues cuando circule el agua en mayoría de casos esta no necesitará recirculación, Valv 3 se encuentra abierta para permitir el paso del agua potable al tanque de almacenamiento en un futuro (figura 4.19).

Tabla 4.13: Caso 1 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
1	0	0	0	0	1

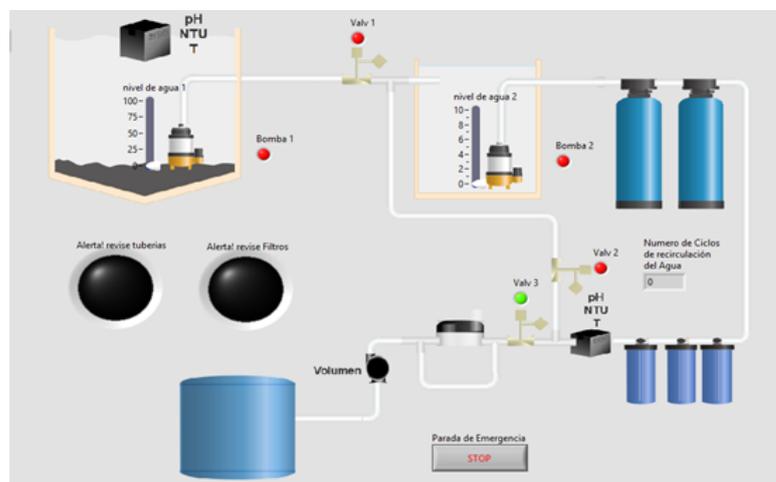


Figura 4.19: Caso 1 control agua

**Caso 2:** El nivel del agua sentido en la captación es óptimo, en el tanque es bajo, pero las variables sensadas del agua no están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC por lo tanto las bombas 1 y 2 no se encienden, Valv 1 se encuentra cerrada. Valv 2 está cerrada y Valv 3 se encuentra abierta (figura 4.20).

Tabla 4.14: Caso 2 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
2	0	0	0	0	1

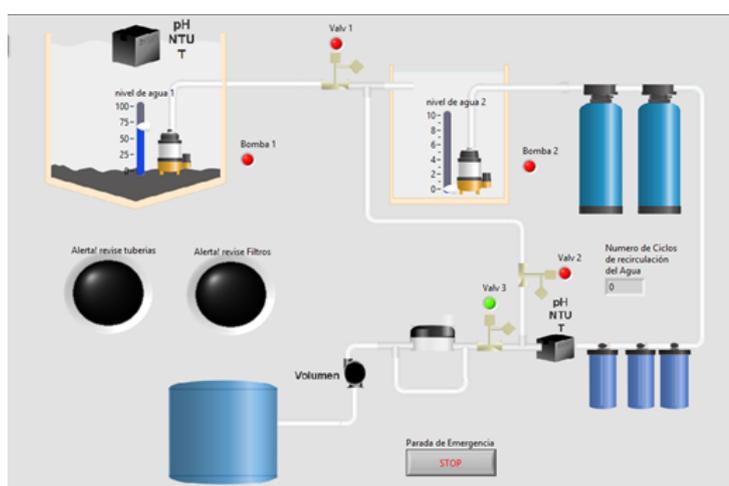


Figura 4.20: Caso 2 control agua

**Caso 3:** El nivel del agua sentido en la captación es óptimo y en el tanque es muy bajo, Las variables sensadas del agua están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC por lo tanto la bomba 1 se enciende, la bomba 2 no se enciende, pues no se ha llenado el tanque todavía, Valv 1 se encuentra abierta y permite flujo hacia el tanque. Valv 2 se encuentra cerrada y Valv 3 abierta (figura 4.21).

Tabla 4.15: Caso 3 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
3	1	1	0	0	1

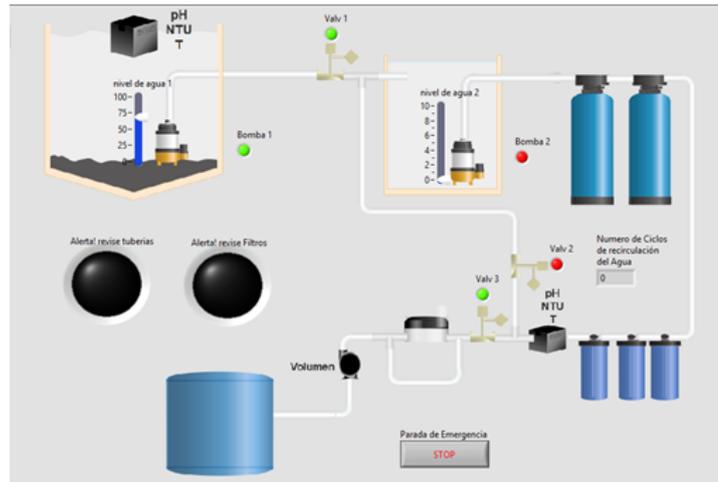


Figura 4.21: Caso 3 control agua

**Caso 4:** El nivel del agua sensed en la captación es óptimo. Las variables sensed del agua están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC pero ha transcurrido tiempo y el nivel del agua en la tanque no aumenta, por lo tanto para prevenir perdidas de agua y evitar desperdicios de energia se envia la alerta “Revise Tuberia”, la bomba 1 se apaga, se Valv 1 se cierra y asi se evita posible perdida de agua. Valv 2 está cerrada y Valv 3 abierta (figura 4.22).

Tabla 4.16: Caso 4 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
4	0	0	0	0	1

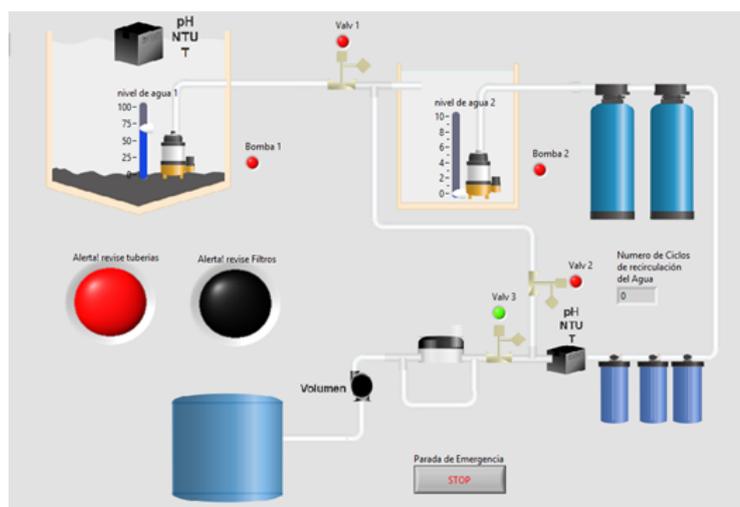


Figura 4.22: Caso 4 control agua

**Caso 5 CASO IDEAL:** El nivel del agua sentido en la captación es óptimo. Las variables sensadas del agua están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC el nivel del agua en la tanque es óptimo, la bomba 1 está encendida, Valv 1 está abierta. Las variables del agua sensadas después del tratamiento están dentro de los rangos permitidos, Valv 2 cerrada pues no se necesita recirculación, Valv 3 está abierta para permitir el paso del agua potable a la etapa de cloración y sensado de volumen después de ser tratada y su posterior almacenamiento en un tanque, disponible para ser usada (figura 4.23).

Tabla 4.17: Caso 5 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
5	1	1	1	0	1

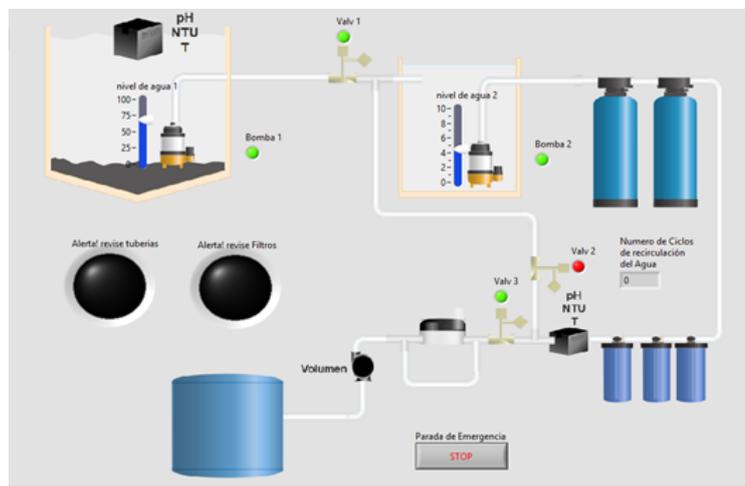


Figura 4.23: Caso 5 control agua

**Caso 6:** El nivel del agua sentido en la captación es óptimo. Las variables sensadas del agua están dentro del rango de trabajo aceptado por la PTAPC, el nivel del agua en la tanque es óptimo y el tanque también. Las variables del agua sensadas después del tratamiento no están dentro de los rangos permitidos, en este momento se empiezan a contar el número de ciclos de recirculación, usando el sensor de volumen implementado en la caja de sensores después del tratamiento y conociendo el volumen de agua que se maneja en todo el proceso, Valv 1 y Valv 3 se cierran, Valv 2 se abre para recircular el agua y mejorar sus características. Para ahorrar energía se apaga la bomba 1 pues solo se recirculará el agua del tanque, por esto sigue encendida la bomba 2 (figura 4.24).

Tabla 4.18: Caso 6 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
6	0	0	1	1	0

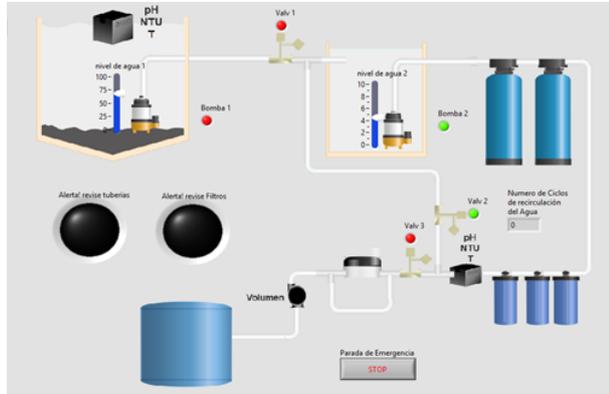


Figura 4.24: Caso 6 control agua

**Caso 7:** El número de ciclos de recirculación es mayor a 5, se detiene el proceso, se apagan bombas y se envía la alerta al usuario “Alerta Revise Filtros”. Solo se mantiene abierta Valv 2 para así obligar al agua de mala calidad a ser retirada por la etapa de filtración (figura 4.25).

Tabla 4.19: Caso 7 control agua.

Caso	Bomba 1	Valv 1	Bomba 2	Valv 2	Valv 3
7	0	0	0	1	0

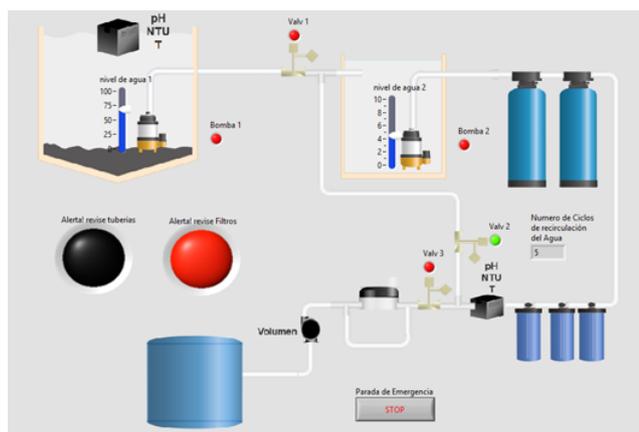


Figura 4.25: Caso 7 control agua

## 4.4. Interfaz gráfica

La interfaz desarrollada posee varias pantallas para dar al usuario una vista general o detallada según sea la necesidad de este:

### 4.4.1. Pantalla principal

En esta se muestra al usuario una vista general del sistema (Figura 4.26), la potencia producida, la potencia consumida, el estado del panel si está conectado o desconectado, el estado de las baterías si se encuentran cargando o descargando con su porcentaje de carga, el estado de la planta si se encuentra en funcionamiento, si las variables medidas del agua están en los rangos permitidos tanto a la entrada como a la salida y el volumen de agua tratado.



Figura 4.26: Pantalla principal

### 4.4.2. Pantalla gestión energética

En esta el usuario puede conocer los valores instantáneos de voltaje y corriente en paneles, banco de acumulación y planta o carga, además de gráficas de los históricos de cada uno de estos y gráficas del comportamiento de voltaje y corriente en simultaneo de los tres componentes con lo que se puede estudiar y supervisar la gestión energética del sistema (Figura 4.27).

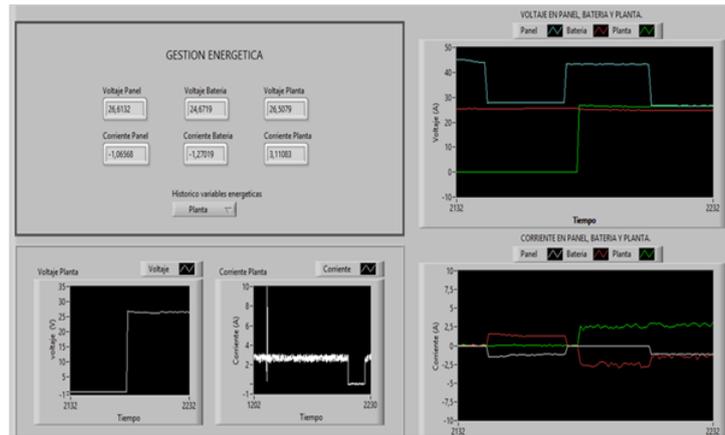


Figura 4.27: Pantalla gestión energética

#### 4.4.3. Pantalla control eléctrico y alarmas

En esta pantalla el usuario puede conocer las acciones de control que está realizando el sistema para proteger los elementos eléctricos del mismo y las alarmas para realizar los mantenimientos preventivos y correctivos que sean necesarios (Figura 4.28).



Figura 4.28: Pantalla control eléctrico y alarmas

#### 4.4.4. Pantalla control de agua y alertas

En está el usuario puede conocer las acciones de control que está realizando el sistema en la entrada de la planta para proteger los filtros y bombas, y a la salida para garantizar la calidad del agua o en caso contrario impedir que llegue al consumidor final, además de distintas alertas sobre mantenimientos preventivos o correctivos. (Figura 4.29).

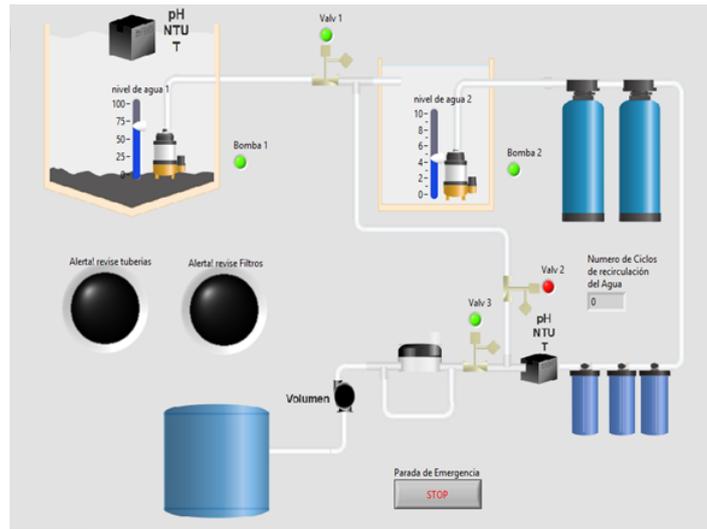


Figura 4.29: Pantalla control de agua y alarmas

## 4.5. Evaluación

La planta con los sistemas de alimentación y supervisión y control implementados se muestra en la figura 4.30 en esta se realizaron distintas pruebas con distintos tipos de agua y en diferentes condiciones energéticas, para validar el correcto funcionamiento de las misma, obteniendo excelentes resultados y una posible solución a una problemática común en la región y el país, la falta de agua potable y energía eléctrica para un gran número de comunidades.



Figura 4.30: Sistema de supervisión y control

# Conclusiones

- Se implementó un sistema energeticamente autónomo que permite medir algunas variables del agua para realizar un estimativo de sus condiciones con relación al pH, turbidez y volumen después del proceso de potabilización, además de realizar control sobre estas, para mejorarlas o en caso de que no sea posible dicha mejora, impedir que el agua llegue a la población.
- Se establecieron las condiciones de instrumentación y parámetros energéticos necesarios para la implementación del sistema.
- Se diseñó e implementó un sistema de supervisión y control para una planta de tratamiento de agua compacta alimentada por energía solar fotovoltaica, utilizando distintos sensores y actuadores enlazados con Arduino y LabVIEW de National Instruments.
- Se desarrolló una Interfaz Humano-Máquina (HMI) para que el usuario pueda tener acceso a información de cada etapa del proceso, desde la generación eléctrica hasta la potabilización del agua.
- La interfaz desarrollada es aplicable a cualquier sistema solar fotovoltaico, y permite conocer mucha más información que la ofrecida por los sistemas disponibles en el mercado actualmente, por esto también puede ser usada en la academia para explicar sobre el verdadero y correcto funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico.
- El sistema de supervisión y control acompañado de la interfaz desarrollados en el presente proyecto, permite contar con una herramienta que mejora el aprovechamiento energético, funcionamiento, mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas fotovoltaicos.
- El sistema de supervisión y control presenta ventajas frente a los reguladores convencionales, pues es personalizable por lo que puede ser usado para cualquier sistema solar fotovoltaico ofreciendo mucha más protección en casos que no son tenidos en cuenta por los reguladores convencionales, traduciéndose en aumento de la vida útil de los diferentes elementos del sistema.

# Referencias bibliográficas

- [1] Martínez, N. (Agosto, 2017). Informe Sectorial: Agua potable y saneamiento básico. Recuperado de <http://www.findeter.gov.co>
- [2] Lozano, W., y Lozano, G.(2009). POTABILIZACIÓN DEL AGUA, principios de diseño, control de procesos y laboratorio.
- [3] Instituto Nacional de Salud. Grupo Calidad de Agua (2014). Enfermedades vehiculizadas por agua-EVA e índice de riesgo de la calidad en Colombia-IRCA. Bogotá, DC, Colombia 2015.
- [4] Programa de ONU- Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC) (2015). El agua fuente de vida.
- [5] LA NetWork (2018). Agua Limpia y Saneamiento: Por qué es importante.
- [6] Sistema de Información Eléctrico Colombiano. SIEL (2016). Informe de cobertura.
- [7] Instituto de Investigación y Desarrollo en Agua Potable, Saneamiento Básico y Conservación del Recurso Hídrico. (1999). FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cali, Colombia.
- [8] Cárdenas, C.(2014). Diseño de una planta de tratamiento de agua potable: Caso de estudio Un municipio de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- [9] Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000). Resolución 1096
- [10] López, P.(2004). POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO. Punto Cero.
- [11] Lopez, R. (2004). Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Bogotá, Colombia.

- [12] Vargas, L. Procesos Unitarios y Plantas de Tratamiento.
- [13] Panachlor (2015). Planta Potabilizadora Klorman. Manizales, Colombia.
- [14] Amarine, CA-0268-01. Bomba de diafragma sumergible. Manual.
- [15] Oviedo, J., Badii, A., Guillen, O., Serrato, L. (2015). Historia y uso de Energías Renovables. México.
- [16] Sala, G. (2012). Energía Solar Fotovoltaica.
- [17] Perpiñán, O. (2018). Energía Solar Fotovoltaica. Versión 1. España.
- [18] Abella, M. Energía Solar Fotovoltaica. Sistemas Fotovoltaicos. Madrid, España.
- [19] Gañán, L., y Castañeda, J. (2016). Diseño e implementación de un sistema SCADA para una estación multivariable didáctica. Pereira, Colombia.
- [20] Rodriguez, A. (2013). Sistemas SCADA. Tercera edición. C.V, México.
- [21] Estrada, V., y Gutierrez, V. (2012). Control y monitoreo de una potabilizadora de agua por medio de una red controlnet. México.
- [22] Vidarte, N. (2016). Adaptación e implementación de un sistema autónomo de bajo coste de monitorización de calidad del agua en tiempo real. Madrid, España.
- [23] Rao, A., Marshall, S., Gubbi, J., Palaniswami, M., Sinnott, R., y Pettigrovet, V. (21 de Octubre 2013). Diseño de un sistema de monitoreo de calidad de agua autónomo de bajo costo. Australia.
- [24] Bayona, F. (2015). Microred Solar Fotovoltaica para Automatización de planta compacta de Potabilización de Agua. Bucaramanga, Colombia.
- [25] Robles, C., Caputo, R., y Sanchez, A. (2012). Diseño de un sistema Scada basado en labview, implementando el protocolo de comunicación inalámbrica zigbee. Santa Marta, Colombia.
- [26] Martín, E., Serna, A., y Triviño, P. (2015). Visualización y Control de Variables en Planta de Abastecimiento de Agua en la Universidad del Quindío.

Armenia, Colombia.

[27] Lozano, L., y Sanchez, P. (Junio 2017). Sistema de instrumentación, actuación y automatización de una planta de tratamiento de agua potable para campamentos de pozos petroleros. Bogotá, Colombia.

[28] Arenas, F., y Londoño, W. (2017). Diseño de un sistema automatizado para una planta de tratamiento de agua potable. Colombia.

[29] Mora, L., y Cortés, H. (2015). Diseño de un sistema compacto de potabilización de agua para consumo humano en la granja la fortaleza ubicada en el municipio de Melgar - Tolima. Bogotá, Colombia.

[30] Rodriguez, Y., y García, L. (2014). Propuesta de automatización de una planta de tratamiento de agua para uso industrial. Cali, Colombia.

[31] Labview(17.0)[software](2017).

[32] Arduino IDE (1.8.9)[software](2018).

[33] EdrawMax(8.4)[software](2018).

[34] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos). (2014). Agua y Energía. París.

[35] C.A.S.A. Menú de alternativas de tratamiento a nivel comunitario y domiciliario. Bolivia.

[36] Distriambiente. Plantas de tratamiento de agua potable.

[37] SEINEREE.(2019). Componentes de un sistema fotovoltaico.

# Anexos

Calibre mm <sup>2</sup>	Temperatura nominal del conductor (ver Tabla 310-13)						Calibre AWG o kcmils
	60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C	
	TIPOS TW*, UF*	TIPOS FEPW*, RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*, ZW*	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP*, FEPB*, MI, RHH*, RHW-2, THHN*, THHW*, THW-2*, THWN-2*, USE-2, XHH, XHHW*, XHHW-2, ZW-2	TIPOS TW*, UF*	TIPOS RH*, RHW*, THHW*, THW*, THWN*, XHHW*, USE*	TIPOS TBS, SA, SIS, THHN*, THHW*, THW-2, THWN-2, RHH*, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE				
0,82	....	....	14	....	....	....	18
1,31	....	....	18	....	....	....	16
2,08	20*	20*	25	....	....	....	14
3,30	25*	25*	30*	20*	20*	25*	12
5,25	30	35*	40*	25	30*	35*	10
8,36	40	50	55	30	40	45	8
13,29	55	65	75	40	50	60	6
21,14	70	85	95	55	65	75	4
26,66	85	100	110	65	75	85	3
33,62	95	115	130	75	90	100	2
42,20	110	130	150	85	100	115	1
53,50	125	150	170	100	120	135	1/0
67,44	145	175	195	115	135	150	2/0
85,02	165	200	225	130	155	175	3/0
107,21	195	230	260	150	180	205	4/0
126,67	215	255	290	170	205	230	250
152,01	240	285	320	190	230	255	300
177,34	260	310	350	210	250	280	350
202,68	280	335	380	225	270	305	400
253,35	320	380	430	260	310	350	500
304,02	355	420	475	285	340	385	600
354,69	385	460	520	310	375	420	700
380,02	400	475	535	320	385	435	750
405,36	410	490	555	330	395	450	800
456,03	435	520	585	355	425	480	900
506,70	455	545	615	375	445	500	1.000
633,38	495	590	665	405	485	545	1.250
760,05	520	625	705	435	520	585	1.500
886,73	545	650	735	455	545	615	1.750
1.013,40	560	665	750	470	560	630	2.000

Figura 4.31: Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 200 V nominales y 60C a 90C.