

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña

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

Adriana Chavarría Campos

Cartago, noviembre de 2018

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña, realizado por la señorita Adriana Chavarría Campos y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



M.Sc Miguel Hernández Rivera

Profesor lector



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector



Dr. Carlos Meza Benavides

Profesor asesor

Cartago, 22 de noviembre, 2018

Declaración de autenticidad

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

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

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



Adriana Chavarría Campos

Cédula: 1-1567-0625

Resumen

Todo ser humano tiene derecho a disponer de agua en cantidad suficiente, con características físicas, químicas y biológicas que le permitan ser apta para el consumo humano y el uso doméstico. No obstante, a nivel mundial, esta posibilidad no está al alcance de todos y en Costa Rica no existe la excepción a este problema. En el país existen zonas, especialmente del ámbito rural, donde la calidad del agua no cumple con los parámetros requeridos para el consumo de los pobladores.

En la zona de Los Ángeles de La Cureña, ubicada en Sarapiquí, no existe una red comunal de distribución del recurso hídrico para el abastecimiento de los habitantes. Debido a esto, las personas se ven en la necesidad de adquirir agua de manera artesanal, utilizando métodos que no garantizan la calidad del agua.

Con el objetivo de evaluar posibles estrategias de solución para la potabilización de agua en la comunidad de Los Ángeles se plantea un sistema de bombeo solar para un pozo con detección automática de calidad de agua. Este sistema se puede escalar para plantear un sistema de pozos y bombeo para la comunidad en general.

Por lo tanto, se diseñó un sistema fotovoltaico aislado que permite alimentar el sistema de bombeo con autonomía de 1 día. Además, este sistema fotovoltaico está en la capacidad de alimentar un sistema electrónico, el cual fue diseñado para identificar si la turbidez, el potencial de reducción de oxidación (ORP), la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica del agua proveniente del pozo, están dentro de los rangos permitidos en Costa Rica. Así mismo, el sistema fotovoltaico suministra la energía necesaria para el funcionamiento de un sistema de comunicación remota que se encarga de enviar mensajes de alerta ante fallos y/o inconvenientes del sistema en general.

Es importante mencionar que la etapa de implementación de este sistema de bombeo solar en Los Ángeles, está fuera del desarrollo de este proyecto. Se realizaron pruebas de calibración de los sensores y posteriormente pruebas que verifican el correcto funcionamiento del sistema de comunicación remota y el sistema de detección de la calidad del agua, en un tanque de almacenamiento ubicado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Palabras claves: bombeo de agua, calidad del agua, comunicación remota, sensores y sistema fotovoltaico.

Abstract

Every human being has the right to have enough water with physical, chemical and biological characteristics that allow it to be suitable for human consumption and domestic use. However, worldwide, this possibility is not available to everyone and in Costa Rica there is no exception to this problem. In the country there are areas, especially in rural areas, where water quality does not comply the parameters required for the consumption of the inhabitants.

In Los Angeles, La Cureña, located in Sarapiquí, there is no communal water distribution network for the supply of the inhabitants. Due to this, people acquire water in a traditional way, using methods that do not guarantee water quality.

With the objective of evaluating possible solutions strategies for water purification in the community of Los Angeles, a solar pumping system for a well with automatic detection of water quality is proposed. This system can be scaled to raise a system of wells and pumping for the community in general.

Therefore, an isolated photovoltaic system was designed to feed the pumping system with autonomy of 1 day. In addition, this photovoltaic system is in the capacity to power an electronic system, which was designed to identify that the turbidity, oxidation reduction potential (ORP), temperature, pH and electrical conductivity of the water coming from the well, are within the allowed ranges in Costa Rica. Likewise, the photovoltaic system will supply the necessary energy for the operation of a remote communication system that is responsible for sending warning messages in the event of failures and / or inconveniences of the system in general.

It is important to mention that the implementation of this solar pumping system in Los Angeles is outside the development of this project. Calibration tests were carried out on the sensors and subsequently tests that verify the correct functioning of the remote communication system and the water quality detection system, in a storage tank located in the Costa Rica Institute of Technology.

Key words: photovoltaic system, remote communication, sensors, water quality and water pumping.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres por haberme dado la oportunidad de estudiar y brindarme todo su apoyo.

Agradecimiento

Agradezco la colaboración y apoyo en la elaboración de este Proyecto de Graduación, a las siguientes personas, quienes participaron activamente en su consecución:

Ingeniero Carlos Meza Benavides, asesor del Proyecto de Graduación.

Ingeniero Miguel Hernández Rivera, lector del Proyecto de Graduación.

Ingeniero Marvin Hernández Cisneros, lector del Proyecto de Graduación.

Ingeniero Macario Pino Gómez, facilitador del tema central desarrollado en este proyecto.

A los asistentes del Laboratorio de Investigación de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab) por su cooperación y disposición durante la elaboración del proyecto.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, por todo el apoyo brindado durante mi proceso de formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Agua para consumo	1
Situación en Costa Rica	1
Parámetros para asegurar la calidad de agua	3
Parámetros físicos	3
Parámetro fisicoquímicos	3
Parámetros químicos	3
Parámetros biológicos.....	4
Tanques de almacenamiento de agua potable	5
Tanques enterrados.....	5
Tanques semienterrados	5
Tanques superficiales.....	5
Tanques elevados.....	6
Sistemas de bombeo de agua potable.....	6
Bombas centrífugas horizontales	6
Bombas centrífugas verticales.....	6
Bombas sumergibles.....	6
Capítulo 2: Situación del agua potable en la comunidad de Los Ángeles del distrito de La Cureña	7
Análisis de la situación actual	9
Capítulo 3: Sistema de bombeo propuesto.....	15
Etapa 1: Sistema de bombeo de agua	17
Etapa 2: Sistema electrónico de detección de la calidad del agua.....	17
Etapa 3: Sistema de comunicación	19
Etapa 4: Iluminación.....	20
Requerimientos del sistema fotovoltaico	20
Requerimientos generales del proyecto.....	20

Capítulo 4: Descripción e implementación del diseño	21
Sistema de bombeo de agua.....	22
Bomba sumergible.....	22
Sensor de caudal COM-CB0214A	24
Sensor ultrasónico HC-SR04.....	24
Válvula de fluido	25
Sistema electrónico de detección de la calidad del agua	26
Selección del microcontrolador.....	26
Sensor de ORP SEN0165	28
Sensor de turbidez SEN0189	29
Sensor de pH SEN0161	31
Sensor de temperatura DS18B20.....	32
Sensor de conductividad eléctrica.....	34
Diagrama completo del hardware	36
Sistema de comunicación	36
Iluminación	38
Diseño del sistema fotovoltaico.....	38
Evaluación del recurso solar	38
Evaluación de los consumos	42
Balance de energía.....	44
Dimensionamiento de baterías	45
Cálculo del regulador.....	45
Conexión entre módulos	47
Selección y comprobación.....	48
Capítulo 5: Desarrollo de pruebas	50
Pruebas de calibración.....	50
Sensor de turbidez SEN0189	52
Sensor de potencial de oxidación-reducción SEN0165	53

Sensor de temperatura DS18B20	53
Integración del código	54
Adaptación de sensores a la tubería	55
Pruebas del sistema de comunicación remota	57
Capítulo 6: Análisis	60
Conclusiones	65
Recomendaciones	66
Referencias bibliográficas.....	67
Anexos	70
Anexo A. Características técnicas de la bomba 4SP2-16	70
Anexo A.1 Caudal suministrado por la bomba 4SP2-16 de acuerdo con su potencia de entrada y la profundidad del pozo	70
Anexo A.2 Potencia de entrada (W) necesaria en la bomba 4SP2-16 vs litros/minuto suministrados.....	71
Anexo B. Tabla de coeficientes de corrección por inclinación (k).	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agua para consumo humano: Porcentaje de población cubierta de acuerdo a la entidad administradora en Costa Rica-Periodo 2010.	1
Figura 2. Población con agua potable en Costa Rica.	2
Figura 3. Localización de la comunidad meta: Los Ángeles, La Cureña.....	7
Figura 4. Parte interior de un pozo excavado y sin revestimiento.	9
Figura 5. Desechos producidos en la actividad ganadera, sin un adecuado manejo.	10
Figura 6. Sistema de aguas residuales y aguas grises cercanas al pozo de agua.....	11
Figura 7. Condiciones al interior de los pozos.....	11
Figura 8. Sistema de bombeo con combustible.....	12
Figura 9. Sistema de succión manual con balde y mecate.	12
Figura 10. Sistema de bombeo solar en pozos con detección automática de la calidad del agua en una casa de habitación en la comunidad de Los Ángeles.	15
Figura 11. Diagrama de bloques del “Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña”.	16
Figura 12. Pozo sin presencia de coliformes ni metales pesados, donde se realizará la instalación del sistema.....	17
Figura 13. Regulador de tensión monofásico de 3 kVA.	23
Figura 14. Diagrama de conexión del sensor de potencial de oxidación-reducción (ORP) y microcontrolador	28
Figura 15. Diagrama de conexión del sensor de turbidez y microcontrolador.....	29
Figura 16. Variación de la tensión de salida en función de la temperatura en soluciones con distinta turbidez.	30
Figura 17. Diagrama de conexión del sensor de pH y microcontrolador.....	31
Figura 18. Diagrama de conexión del sensor de temperatura y microcontrolador.....	33
Figura 19. Circuito para obtener la resistencia eléctrica del agua.....	34
Figura 20. Diagrama de conexión del sensor de conductividad y microcontrolador.	35
Figura 21. Diagrama completo del hardware del sistema	36
Figura 22. Módulo SIM900 GSM/GPRS. Fuente: CrCibernética.	37

Figura 23. Conexión entre el módulo SIM900 y Arduino Mega	37
Figura 24. Hardware del módulo SIM900.	38
Figura 25. Resumen climático de Puerto Viejo de Sarapiquí.	39
Figura 26. Diagrama cilíndrico de Puerto Viejo de Sarapiquí (latitud: 10.46 N, longitud: -84.01 O correspondiente a los meses de Enero-Junio).	39
Figura 27. Diagrama cilíndrico de Puerto Viejo de Sarapiquí (latitud: 10.46 N, longitud: -84.01 O correspondiente a los meses de Julio-Diciembre).	40
Figura 28. Diagrama de conexión del sistema fotovoltaico	49
Figura 29. Soluciones con distintos valores de pH.	50
Figura 30. Recta de calibración del sensor de pH SEN0161.	52
Figura 31. Soluciones con distintos valores de turbidez.	52
Figura 32. Cambio abrupto en medición de la temperatura del agua.....	54
Figura 33. Mediciones simultáneas de ph, temperatura y ORP a agua de grifo.	55
Figura 34. Mediciones simultáneas de ph, temperatura, conductividad eléctrica, ORP y turbidez en agua de grifo.....	55
Figura 35. Adaptación de sensores a la tubería de la salida del tanque.	56
Figura 36. Envío de mensajes de texto con alerta por fallo en indicadores de la calidad del agua	57
Figura 37. Envío de mensaje de texto ante peligro de desborde del agua en el tanque	58
Figura 38. Sensor de corriente para simular la corriente que circula por la bomba sumergible	58
Figura 39. Envío de mensaje de texto con advertencia de fallo en el suministro eléctrico en la bomba sumergible.....	59
Figura 40. Mediciones de parámetros de calidad de agua con válvula cerrada.	61
Figura 41. Mediciones de los parámetros de calidad de agua con válvula abierta.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua.	4
Tabla 2. Resultados análisis de laboratorio con el método N.M.P. Comunidad de Los Ángeles.	13
Tabla 3. Resultados de los análisis de metales pesados. Comunidad de Los Ángeles ..	14
Tabla 4. Requerimientos para el sistema electrónico de detección de la calidad del agua.	18
Tabla 5. Requerimientos para el sistema de comunicación.	19
Tabla 6. Requerimientos del sistema fotovoltaico.	20
Tabla 7. Requerimientos generales del proyecto.	21
Tabla 8. Dispositivos requeridos para el sistema de bombeo.	25
Tabla 9. Especificaciones de los sensores seleccionados.	26
Tabla 10. Comparación entre Raspberry Pi y Arduino Mega.	27
Tabla 11. Cálculos de la radiación mensual en Puerto Viejo de Sarapiquí.	41
Tabla 12. Radiación anual en Puerto Viejo de Sarapiquí a distintos ángulos de inclinación.	41
Tabla 13. Evaluación de los consumos generales en el proyecto “Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña”.	43
Tabla 14. Resultados obtenidos a partir de mediciones a soluciones con distintos valores de pH.	51
Tabla 15. Resultados obtenidos a partir de mediciones a soluciones con distintos valores de turbidez.	53

Capítulo 1: Agua para consumo

El agua es un elemento esencial en el desarrollo de cualquier ser vivo, ya que está presente en todas las actividades cotidianas del ser humano. Por lo tanto, su gestión debe ser un tema prioritario para garantizar la seguridad hídrica y promover el desarrollo de los países. (Ballester, 2008).

El agua, de calidad potable, se define como “aquella que, al ser consumida, no causa daño a la salud del usuario, para lo cual debe cumplir con los requisitos físico-químicos y microbiológicos indicados en el “Reglamento para la Calidad del Agua Potable” (Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2003, p.13).

Son muchos los problemas que aquejan la administración del recurso hídrico, entre los que se destacan en el caso de Centroamérica: el crecimiento urbano; desequilibrios entre la oferta y la demanda del recurso; desigualdades en áreas urbanas y rurales en cuanto a servicios de saneamiento y administración de agua potable; la contaminación que reduce la calidad del recurso; la ausencia de políticas claras; desactualización de la legislación existente, entre otros (CEPAL, 2005).

Situación en Costa Rica

En el caso de Costa Rica, es importante mencionar que, según un estudio realizado en el año 2010 por el Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, la estimación de cobertura con agua para consumo humano cubre un total de 100% de la población del país, de la cual un 98.7% es abastecida a través de agua por cañería y 1.3% no se tiene información (figura 1), debido a que se abastecen por medio de pozos, nacientes o quebradas propias.

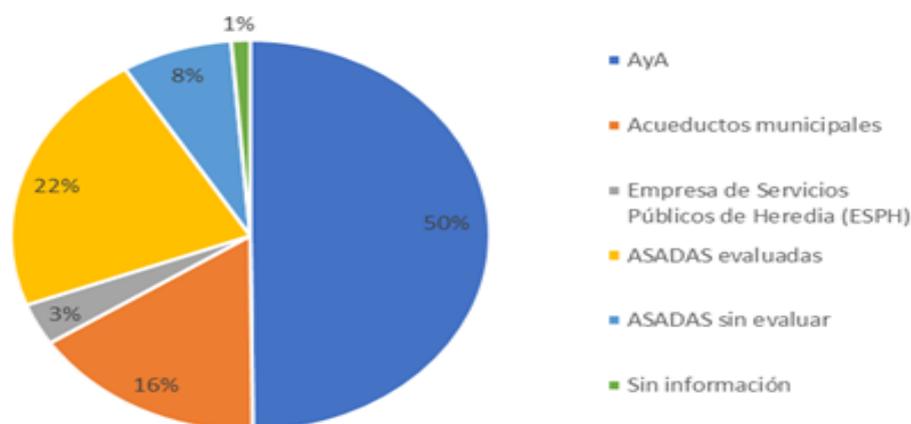


Figura 1. Agua para consumo humano: Porcentaje de población cubierta de acuerdo a la entidad administradora en Costa Rica-Periodo 2010.

Fuente: elaborado con datos del Laboratorio Nacional de Aguas (2010).

En Costa Rica, especialmente en zonas periféricas, no existe una adecuada sanidad y accesibilidad al agua para consumo humano (Arias, 2010). En el Decimosexto Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (2010), se menciona que los 12 cantones con menor cobertura de acueducto, con respecto a la población total de la zona, son Talamanca (44,1%), Sarapiquí (46,4%), Los Chiles (50,45%), Buenos Aires (61%), Guatuso (63,1%), Upala (63,4%), Osa (65,5%), Pococí (66,8%), Hojancha (67,4%), Golfito (67,5%), Matina (68,1%) y Guácimo (70,5%):

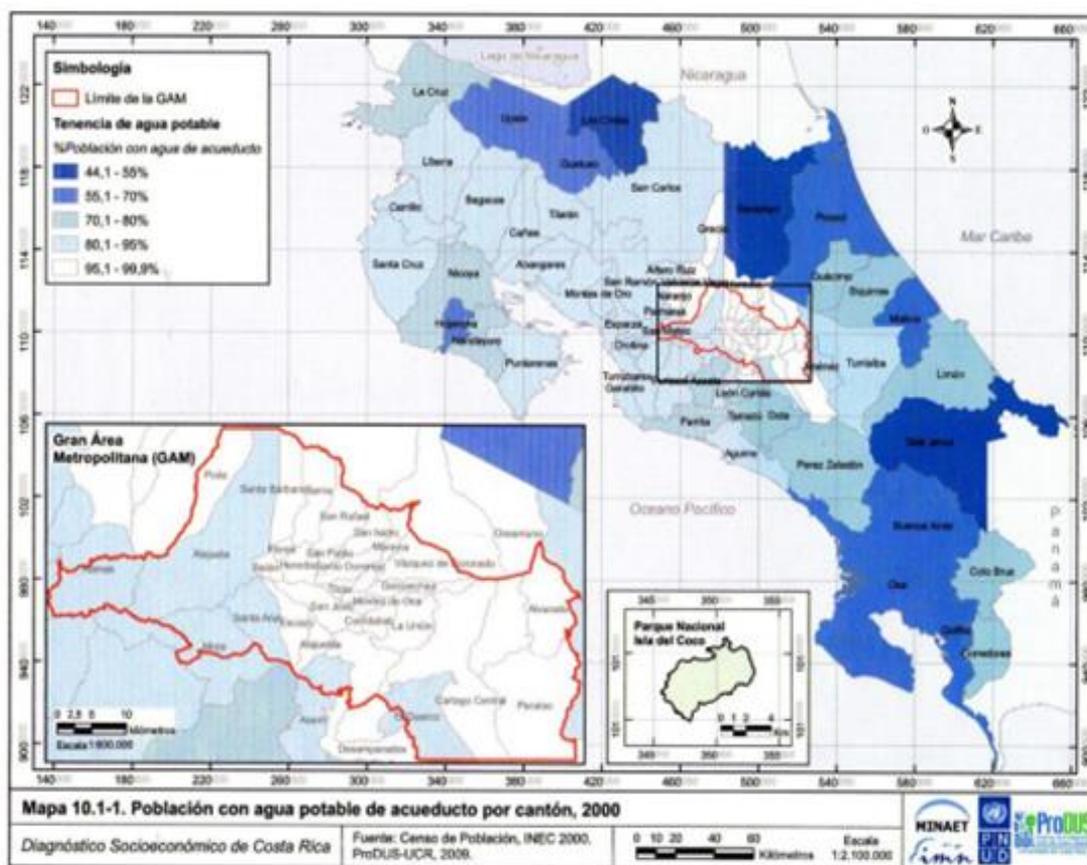


Figura 2. Población con agua potable en Costa Rica.

Fuente: Arias, A. (2010). Décimo sexto informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe Final Situación de Potabilización y Saneamiento en Costa Rica (Informe final). San José, 2010. 36 p.

Parámetros para asegurar la calidad de agua

Arias (2010) recomienda realizar, de manera rutinaria, análisis de metales, plaguicidas, trihalometanos y otros compuestos que son indicadores del riesgo que el agua puede presentar a la población. Según Rodríguez (2015), la calidad del agua se determina a partir de cuatro parámetros categorizados como físicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos, los cuales se detallan a continuación.

Parámetros físicos

Los parámetros físicos son los que se pueden observar con mayor facilidad. Entre estos están: el color, presencia de sólidos suspendidos o disueltos y la temperatura. El color es un indicador de la presencia de sustancias que dificultan la absorción de luz y afectan la estética en general. En cuanto a la temperatura, el calor asociado a esta condiciona la velocidad de degradación biológica de los contaminantes presentes. De esta manera, un aumento de la temperatura puede reducir la capacidad de absorción y disolución de oxígeno en el agua, causando condiciones sépticas en las que el agua puede desprender malos olores y otros compuestos no deseados (Rodríguez, 2015).

Parámetro fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos no son fácilmente observables y no pueden separarse mediante el uso de técnicas físicas (secado, precipitación, filtración). De acuerdo con Aznar (2001), los parámetros fisicoquímicos son: el pH, la conductividad y el oxígeno disuelto.

El valor de pH, es referido a la cantidad de iones H⁺ en la disolución acuosa. Un valor de pH por debajo de 4 en su escala, indica que el agua es corrosiva (disolverá algunos metales), mientras que a valores de pH superiores a 9, el agua se considera cáustica o incrustante, causante de irritaciones, quemaduras, depósitos de sales o fragilidad en los elementos metálicos. El valor de la conductividad, hace referencia a niveles de sales disueltas en agua. En cuanto al oxígeno disuelto, este es un parámetro que indica la concentración de este gas en la disolución (Rodríguez, 2015).

Parámetros químicos

Entre los parámetros químicos se consideran principalmente la materia orgánica y otras sustancias nutrientes como amonio y fósforo, las cuales consumen oxígeno en su degradación biológica y producen compuestos más simples u oxidados, así como CO₂ y agua (Rodríguez, 2015).

Parámetros biológicos

Este parámetro está asociado a la presencia y cantidad de diferentes tipos de microorganismos. El origen de estos seres vivos proviene principalmente de materia fecal, que desprenden los coliformes fecales o bacterias entéricas, alertando de la contaminación del agua (Rodríguez, 2015).

Según Rodríguez (2015) se recomienda valorar en el sitio el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto, la conductividad y el material flotante.

La Tabla 1 indica los rangos de los parámetros permitidos para considerar el agua potable según Decreto N° 38924-S-MINAE (2015).

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Unidad	Valor Alerta (VA)	Valor Máximo Admisible (VMA)
Turbiedad	UNT	1	5
pH	Valor de pH	6.0	8.0
Conductividad	µS/cm	400	-
Temperatura	°C	18	30

Fuente: Presidencia de la República de Costa Rica. (12 de enero del 2015). Decreto No 38924-S. Reglamento para la Calidad del Agua Potable. Presidencia de la República de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Además de los cuatro parámetros antes mencionados es recomendable determinar el potencial de oxidación-reducción (ORP), el cual permite supervisar el proceso de desinfección del agua ante la presencia de coliformes fecales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) adoptó en 1971 un valor de 650 mV para el potencial oxidación-reducción mantenido durante 30 minutos, con el cual se asegura que el agua está adecuadamente desinfectada (OMS, 2006). Valores menores a este valor indican que el proceso de desinfección es más lento.

Una vez comprendidos los parámetros mínimos que permiten determinar la calidad del agua, se puede proceder a analizar cómo se miden. Para esto existen laboratorios que se encargan de realizar análisis químicos y microbiológicos especializados, como por ejemplo el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) ubicado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago.

No obstante, el traslado de muestras puede incurrir en variaciones en los valores reales de los parámetros. Orellana (2017) menciona que para evitar la alteración en estos parámetros se pueden utilizar sistemas electrónicos de seguimiento y análisis de la calidad del agua que pueden ser llevados con facilidad a campo para realizar muestreos. Antes de realizar estas mediciones en el sitio, se recomienda realizar pruebas con soluciones de calibración para determinar la precisión en los datos obtenidos. En adición a lo anterior, cuando se realizan pruebas en campo, se recomienda que el agua a analizar sea extraída del tanque de almacenamiento (Laboratorio de Calidad Ambiental, 2009).

Tanques de almacenamiento de agua potable

Los tanques de almacenamiento son un elemento del sistema de abastecimiento de agua, que abastece a una población. El propósito fundamental de estos tanques es proveer una cantidad adecuada en las demandas máximas observando el aspecto económico y la capacidad suficiente (Pavón, 2001) . Según la Comisión Nacional del Agua de México (2007), existen principalmente 4 tipos de tanques: enterrados, semienterrados, superficiales y elevados.

Tanques enterrados

Estos tanques se construyen bajo el nivel del suelo. Se emplean en terrenos con características adecuadas para su funcionamiento y de fácil excavación. Estos tanques tienen como principal ventaja proteger el agua de variaciones de temperatura y la adaptación al entorno. Sin embargo, requieren importantes excavaciones tanto para el propio tanque, como para todas las conexiones de la red de distribución y en la línea de conducción, es posible que se presenten filtraciones no deseadas (Comisión Nacional del Agua de México, 2007).

Tanques semienterrados

Los tanques semienterrados tienen parte de su estructura bajo el nivel del terreno y parte sobre el nivel del terreno. Se emplean generalmente cuando la altura topográfica respecto al punto de alimentación es suficiente y cuando el terreno presenta alguna dificultad de excavación (Comisión Nacional del Agua de México, 2007).

Tanques superficiales

Pavón (2001) indica que en los tanques superficiales es más sencillo efectuar la instalación, el mantenimiento del mismo, operación y mantenimiento de las tuberías de entrada y de salida, pero su construcción debe tomar en cuenta que el terreno sobre el que se instale tenga la capacidad de soportar las cargas que se le impongan.

Tanques elevados

Los tanques elevados se emplean cuando se necesita altura para darle presión al agua y lograr su distribución. Su tamaño y forma depende del volumen que almacenarán (Chán, 2012). Generalmente son construidos en localidades con topografía plana donde no se dispone en su proximidad de elevaciones naturales con altimetría apropiada. Cuando se opera un sistema de distribución de agua, se debe conocer los criterios básicos operativos como la variación de consumo a lo largo del día por parte de los consumidores, hasta el manejo de los sistemas de válvulas y equipos de bombeo que se encuentran en cada uno de los tanques de almacenamiento (Comisión Nacional del Agua de México, 2007).

Sistemas de bombeo de agua potable

Según la Organización Panamericana de la Salud, (2005) las bombas más frecuentemente usadas en el abastecimiento de agua son:

Bombas centrífugas horizontales

Son equipos con el eje de transmisión de la bomba en forma horizontal y son especiales para utilizar en cisternas, fuentes superficiales y embalses. Tienen la ventaja de poder ser instaladas en un lugar distinto a la fuente de abastecimiento, permitiendo ubicarlas en lugares secos, protegidos de inundaciones, ventilados y de fácil acceso. No obstante, su mayor desventaja es la limitación en la carga de succión, ya que el valor máximo teórico que alcanza es el de la presión atmosférica del lugar, sin embargo, cuando la altura de succión es de pocos metros, la bomba muestra deficiencias de funcionamiento (OPS, 2005).

Bombas centrífugas verticales

Estas bombas tienen el eje transmisión en forma vertical, sobre el cual se apoya un determinado número de impulsores que elevan el agua por etapas. Son ubicadas directamente sobre el punto de captación y son usadas en pozos profundos. Entre sus ventajas están, la versatilidad y capacidad para trabajar en un amplio rango de velocidades; sin embargo, presenta desventajas por la estricta verticalidad que necesitan los pozos para su instalación (OPS, 2005).

Bombas sumergibles

Tienen la bomba y motor acoplados en forma compacta, funcionando conjuntamente sumergidos en el punto de captación. Estas bombas se emplean en pozos profundos. Sin embargo, una desventaja es que al estar sumergidos, es difícil tener acceso a ellos cuando están instalados, dificultando realizar mantenimiento sin paralizar el bombeo (OPS, 2005).

Capítulo 2: Situación del agua potable en la comunidad de Los Ángeles del distrito de La Cureña

Para el desarrollo del proyecto “Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña”, la comunidad meta pertenece al distrito La Cureña, ubicado en el cantón de Sarapiquí, provincia de Heredia, Costa Rica. Según Pino y Zúñiga (2017b), este distrito está conformado por una población aproximada de 1 231 habitantes, en las comunidades de:

- Golfito
- La Unión del Toro
- Los Ángeles
- Copalchí
- Tambor

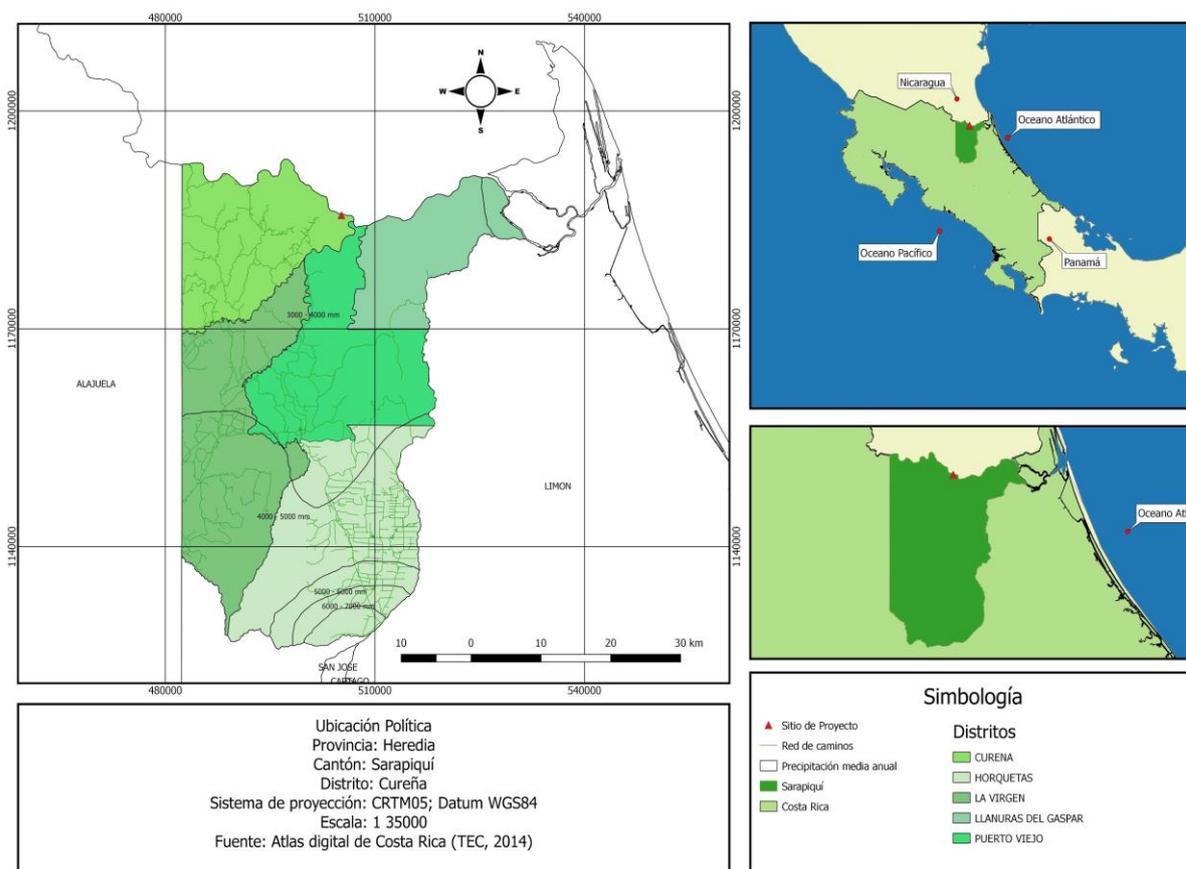


Figura 3. Localización de la comunidad meta: Los Ángeles, La Cureña.
Fuente: elaborado por el Ing. Diego Céspedes, 2018.

La comunidad de Los Ángeles presenta un Índice de Desarrollo Social (IDS) de 9.0, ubicándose en el penúltimo lugar a nivel nacional, según el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN, 2013). Para la determinación del IDS se toman en cuenta

diversos rubros, entre los cuales se encuentra el factor salud, el cual está relacionado con el acceso y la calidad del agua para el consumo humano.

Específicamente en la zona de La Cureña, la calidad del recurso hídrico se ha visto afectada debido a una inadecuada gestión de aguas residuales producto de actividades como la ganadería, en donde los residuos líquidos y sólidos de estos sistemas son vertidos sin ningún tratamiento a diferentes cuerpos de agua de la zona, como por ejemplo el Río Toro y Sarapiquí.

Debido a la problemática antes mencionada, entre los años 2014 y 2015, se realizó el proyecto “Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para las comunidades de: Copalchí, Tambor, Los Ángeles, La Unión del Toro, Distrito La Cureña, Cantón de Sarapiquí”, el cual fue apoyado por el Programa de Regionalización Universitario-PRR-Región Huetar Norte. A partir de este proyecto, surgieron otras iniciativas de proyectos relacionados con el uso de prácticas sostenibles en la actividad ganadera, como el reúso de aguas residuales en esta actividad, la cosecha de agua de lluvia y la energía solar.

Además, por medio de este proyecto, se dio inicio a análisis de laboratorio para determinar las características microbiológicas de las aguas tanto de los pozos como de los grifos de viviendas, establecimientos públicos, centros comunales y pulperías. Según Pino y Zúñiga (2017b), dichas pruebas fueron realizadas en épocas de altas y bajas lluvias, obteniendo que un 73.9% de las muestras de agua de pozos tienen presencia de coliformes fecales y *E coli*. En el caso de los grifos, se obtuvo que el 76.9% de las muestras reportaron presencia de coliformes fecales y *E coli*. Estos resultados demuestran que tanto el agua de los pozos como de los grifos no cumple con la normativa vigente en Costa Rica para la calidad del agua para el consumo.

Debido a lo mencionado anteriormente, se recomendó la alternativa de uso de aguas subterráneas, mediante la instalación de un pozo perforado con su respectivo tanque de almacenamiento y sistema de redes de conducción y distribución para abastecer de agua potable a la comunidad de Los Ángeles.

Se priorizó el problema del abastecimiento de agua para consumo humano, puesto que los habitantes de esta comunidad sufren de escasez del recurso en la época seca y la contaminación de los ríos se ha incrementado debido a las malas prácticas de manejo de residuos sólidos, aguas residuales y prácticas inadecuadas en sus actividades productivas como el uso de agroquímicos.

Por lo tanto, surge la idea de introducir mejoras en la red de distribución del recurso hídrico de la zona por medio de energía solar fotovoltaica e incentivar así a otras comunidades en situaciones similares, a adoptar medidas con un enfoque sostenible que permitan mejorar la calidad de vida de los habitantes de la zona, con un bajo impacto para el medio ambiente.

Análisis de la situación actual

La disponibilidad de agua ha sido un elemento clave para el desarrollo de asentamientos humanos. Los primeros pozos de explotación de las aguas subterráneas se perforaban a mano. El agua se extraía mediante un sistema de poleas y posteriormente con fuerza animal.

No obstante, en la actualidad el desarrollo tecnológico ha permitido la extracción de agua subterránea a profundidades considerables. Con el desarrollo de máquinas perforadoras y bombas de extracción, ha sido posible la perforación de numerosos pozos y su posterior explotación.

Una vez que se realiza la obra para la captación de aguas subterráneas y ésta ha alcanzado el acuífero, es necesario comprobar si el caudal que se obtiene del mismo es suficiente para satisfacer las necesidades para la que se están contemplando, de una manera sostenible y sin causar un impacto negativo en el recurso hídrico.

Para llevar dichas aguas a la superficie terrestre, es necesario utilizar algún método de extracción, como por ejemplo un sistema de bombeo. No obstante, es importante mencionar que en la comunidad de Los Ángeles no se cuenta con un suministro eléctrico fiable. Además, los sitios idóneos para realizar un pozo comunal se encuentran alejados del tendido eléctrico.

Actualmente, los habitantes de la comunidad de Los Ángeles se abastecen de agua por medio de pozos excavados y de poca profundidad (5-15 m), construidos manualmente y la mayoría de estos sin revestimiento ni protección en la parte superior, como se puede observar en la siguiente figura:



Figura 4. Parte interior de un pozo excavado y sin revestimiento.

Fuente: Pino y Zúñiga (2017a). Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; distrito La Cureña, cantón de Sarapiquí.

Programa de Regionalización Universitaria.

Uno de los mayores problemas que presenta este tipo de pozos es que al no contar con tapas o sistemas de protección, no es posible evitar contaminación por medio de infiltraciones, ya sea de crecidas de los ríos o de agua de lluvia. Además, la mayoría de estos pozos tampoco cuentan con filtrantes como arenas gruesas para evitar el ingreso de arenas finas y lodo a la bomba y tubería de succión.

Así mismo, los pozos son construidos sin criterio técnico y son colocados cerca de los sistemas de aguas residuales, en lugares donde la calidad de los mantos no es buena. Por ejemplo, en los sistemas ganaderos de la zona se hace una inadecuada gestión de las aguas residuales vertiendo estas a distintos cuerpos de agua de la zona:



Figura 5. Desechos producidos en la actividad ganadera, sin un adecuado manejo.



Figura 6. Sistema de aguas residuales y aguas grises cercanas al pozo de agua.
Fuente: Pino y Zúñiga (2017a). Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; distrito La Cureña, cantón de Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.



Figura 7. Condiciones al interior de los pozos.
Fuente: Pino y Zúñiga (2017a). Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; distrito La Cureña, cantón de Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.

En Los Ángeles el agua se extrae de los pozos principalmente de dos maneras, la más común es mediante el uso de bombas eléctricas o de combustible y la otra manera es manualmente con un balde y mecate. Ambas maneras presentan riesgos de contaminación, ya que las bombas de gasolina pueden ocasionar derrames de combustible dentro de los pozos o la extracción manual puede generar una inadecuada manipulación por parte de las personas, además de suciedad en los

equipos utilizados. En cuanto al sistema de bombeo eléctrico, el problema recae en las interrupciones de la red eléctrica en la época lluviosa, lo que impide la constante extracción del agua de pozo.



Figura 8. Sistema de bombeo con combustible.

Fuente: Pino y Zúñiga (2017a). Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; distrito La Cureña, cantón de Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.



Figura 9. Sistema de succión manual con balde y mecate.

Fuente: Pino y Zúñiga (2017a). Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; distrito La Cureña, cantón de Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.

Otro aspecto importante a mencionar es que el agua obtenida de los pozos perforados está destinada principalmente para el consumo humano, por lo que es necesario realizar pruebas de calidad tanto desde el punto de vista microbiológico (presencia de coliformes fecales y *E coli*) y como desde el punto de vista físico-químico (por ejemplo la presencia de metales pesados). Dichas pruebas son relevantes debido a las problemáticas anteriormente mencionadas, además de la afectación en la zona por desastres naturales, principalmente inundaciones; lo que trae consigo contaminación en el agua.

Según Pino y Zúñiga (2017a), como parte de la caracterización de los sistemas de abasto de agua, se realizaron dos muestreos para analizar coliformes fecales, *E. Coli* y metales pesados (hierro, cobre, manganeso y arsénico). Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2. Resultados análisis de laboratorio con el método N.M.P. en Los Ángeles.

Identificación de la Muestra	Fecha	Coliformes Fecales (NMP/100mL)	<i>E. coli</i> (NMP/100mL)
M4 – Casa	26-10-14	Ausente	Ausente
M5 – Casa	26-10-14	13	7,8
M5 – Casa	23-11-14	240	49
M8 – Casa	23-11-14	46	33
M9 -Pozo	23-11-14	17	13
M10 – Casa	23-11-14	110	49
M7- Casa	19-04-15	17	17
M8 – Pozo	19-04-15	Ausente	Ausente
M9 – Pozo	19-04-15	7,8	4,5
M7- Pozo	24-05-15	33	13
M8 – Casa	24-05-15	7,8	4,5

Fuente: Pino y Zúñiga (2017b). Mejora de las condiciones de los sistemas de abasto de agua, para consumo humano y para atender actividades productivas en las comunidades indígenas del distrito Telire y Bratsi, Cantón de Talamanca y comunidades del distrito La Cureña, Cantón Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.

Tabla 3. Resultados de los análisis de metales pesados. Comunidad de Los Ángeles

Identificación de la Muestra	Fecha	Hierro (mg/L)	Manganeso (mg/L)	Cobre (mg/L)	Arsénico (mg/L)
M4 - Casa	26-10-14	<0,3	<0,3	<0,3	ND
M5 - Casa	26-10-14	<0,3	<0,3	<0,3	ND
M5 - Casa	23-11-14	<0,3	<0,3	<0,3	ND
M8 - Casa	23-10-14	<0,3	<0,3	<0,3	ND

Fuente: Pino y Zúñiga (2017b). Mejora de las condiciones de los sistemas de abasto de agua, para consumo humano y para atender actividades productivas en las comunidades indígenas del distrito Telire y Bratsi, Cantón de Talamanca y comunidades del distrito La Cureña, Cantón Sarapiquí. Programa de Regionalización Universitaria.

A pesar de la importancia de dichas pruebas, en la comunidad de Los Ángeles existen dificultades para realizar las tomas de muestras de agua en periodos cortos de tiempo y transportarlas para el respectivo análisis de potabilidad, lo anterior debido a la lejanía de la zona.

Sin embargo, la realización de las pruebas de calidad es de suma importancia para evitar el consumo de agua contaminada y la propagación de una gran diversidad de enfermedades. La Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (2017) menciona que las principales bacterias transmitidas por el agua son *salmonella*, *aeromonas* y *eschericia coli*. Además menciona que los principales virus relacionados con brotes de afecciones transmitidas por el agua son astrovirus, virus de la hepatitis A (VHA), rotavirus y virus de la hepatitis E (VHE). La transmisión de estas bacterias y virus genera diversas enfermedades en el ser humano, entre las que destacan la disentería, enfermedades diarreicas, cólera, hepatitis A, fiebre y poliomielitis.

Capítulo 3: Sistema de bombeo propuesto

Con el objetivo de evaluar posibles estrategias de solución para la potabilización de agua en la comunidad de Los Ángeles en el distrito de la Cureña, se plantea un sistema de bombeo solar para un pozo con detección automática de calidad de agua. Este sistema podría escalarse para plantear un sistema de pozos y bombeo para la comunidad. La Figura 10 muestra un diagrama del sistema propuesto.

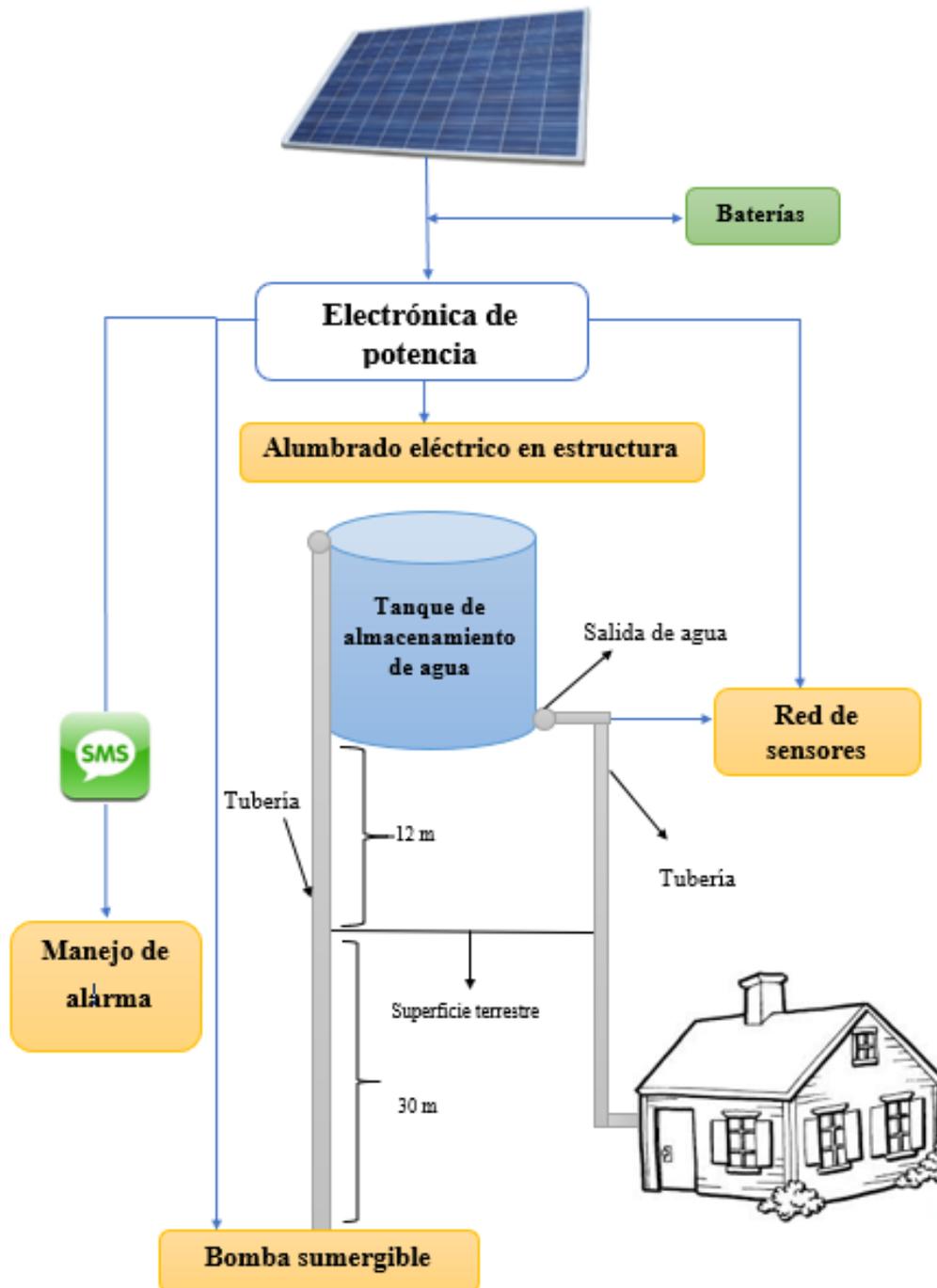


Figura 10. Sistema de bombeo solar en pozos con detección automática de la calidad del agua en una casa de habitación en la comunidad de Los Ángeles.

El método utilizado para transportar el agua desde el pozo hasta el tanque de almacenamiento es el bombeo a pequeña escala. Dado que muchas de estas comunidades no disponen de energía eléctrica o la electricidad presenta una frecuente intermitencia, se propone alimentar esta bomba por medio de un sistema solar fotovoltaico. De esta manera, la energía solar fotovoltaica es la fuente principal de energía para las cuatro etapas involucradas: iluminación y los sistemas de bombeo de agua, comunicación y detección de la calidad del agua, como se aprecia en la siguiente figura:

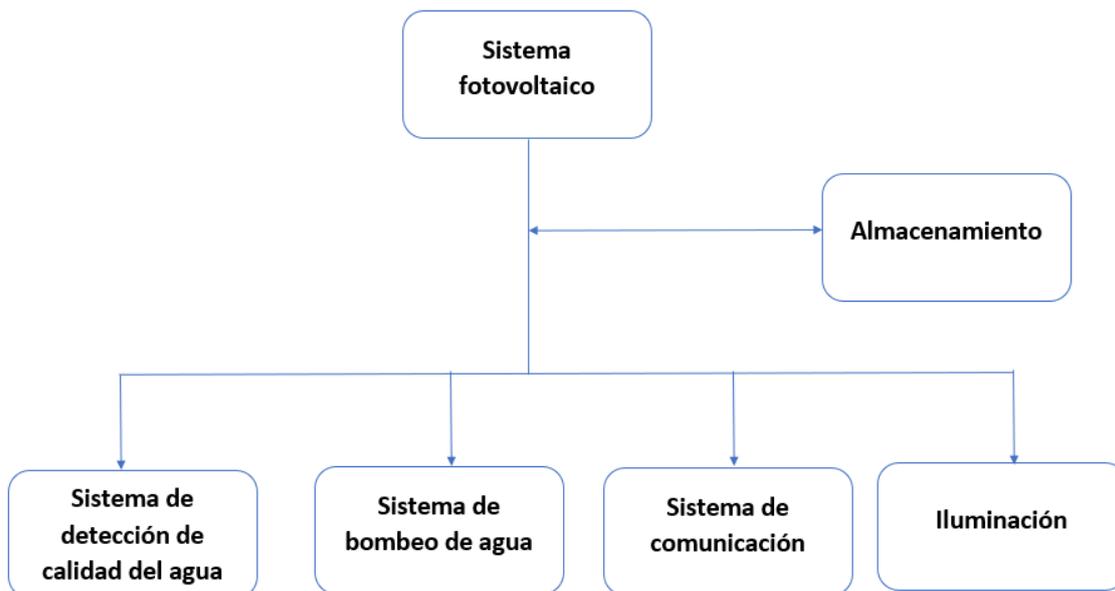


Figura 11. Diagrama de bloques del “Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña”.

A partir de las figuras 10 y 11 es posible comprender el enfoque de la solución propuesta. Se desarrolló un sistema de bombeo de agua proveniente de un pozo, se almacenó dicha agua en un tanque de almacenamiento para su posterior análisis de calidad y si existe alguna alerta, se enviará información al respecto.

Para el diseño del sistema antes mencionado, es fundamental analizar los parámetros técnicos de interés, como lo son la capacidad del sistema de bombeo, la tensión, corriente necesaria, el potencial de ahorro de energía y la capacidad de generación de la misma. Tomando en consideración todos estos factores, es posible diseñar un sistema sencillo, práctico y confiable, que además requiera poco mantenimiento y que sea apropiado de acuerdo con las características específicas de la zona de influencia del proyecto antes descrita.

Para la primera parte de implementación del proyecto en la zona, se utilizará un pozo que cuentas con las mínimas condiciones adecuadas para la extracción de agua para consumo humano. En dicho pozo (ver figura 12) se realizaron pruebas de calidad del agua a distintas profundidades

y se obtuvo que a una profundidad de 30 metros no hay presencia de coliformes fecales ni metales pesados como el hierro, cobre, manganeso y arsénico.



Figura 12. Pozo sin presencia de coliformes ni metales pesados, donde se realizará la instalación del sistema.

Seguidamente se explicará con mayor detalle cada una de las 4 etapas mencionadas anteriormente:

Etapas 1: Sistema de bombeo de agua

Se extrae agua de un pozo a una profundidad de 30 m. El agua extraída se almacena en un tanque que se encuentra 12 m sobre la superficie del terreno. Se considera que esta altura es suficiente para brindar un suministro de agua por gravedad a los dispositivos sanitarios en las viviendas, como por ejemplo llaves de cocina, ducha, servicios sanitarios, entre otros.

Etapas 2: Sistema electrónico de detección de la calidad del agua

Se acondicionó el tanque de almacenamiento con el fin de disponer de un conjunto de sensores que permitan determinar la calidad del agua extraída del pozo.

Según el Decreto Ejecutivo No 38924-S-MINAE (2015), existen 4 niveles distintos de control de la calidad del agua: nivel primero, segundo, tercero y cuarto. El nivel primero corresponde al programa de control básico, el cual consiste en la inspección sanitaria para evaluar la operación y mantenimiento en la fuente, el almacenamiento, la distribución del agua potable y la determinación de los siguientes parámetros: color aparente, conductividad, pH, olor, sabor, temperatura, turbiedad, coliformes fecales, *Escherichia coli*, y cloro residual libre o combinado.

De los parámetros antes mencionados, para este proyecto se pretende monitorear los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Requerimientos para el sistema electrónico de detección de la calidad del agua.

Parámetro	Unidades	Rango de calidad	Resolución (*)
Turbidez	UNT	0 – 5	0.1
Potencial de oxidación- reducción (ORP) (**)	mV	<800	10
Temperatura	°C	18-30	0.5
pH	pH	6.0 – 8.0	0.1
Conductividad eléctrica	μS/cm	<400	10

Fuente: Presidencia de la República de Costa Rica. (12 de enero del 2015). Decreto No 38924-S. Reglamento para la Calidad del Agua Potable. Presidencia de la República de Costa Rica, San José, Costa Rica.

(*) La resolución necesaria fue tomada de Lambrou (2014).

(**) El potencial de oxidación-reducción para agua potable no tiene un rango definido en Costa Rica, este fue escogido de acuerdo a recomendaciones por parte del CEQIATEC.

La turbidez es monitoreada debido a que esta es originada por las partículas en suspensión o coloides. Es decir, la turbidez causada por las partículas que por su tamaño, se encuentran suspendidas y reducen la transparencia del agua en menor o mayor grado (Marcó *et al.*, 2004). Además, esta misma autora menciona que el pH no tiene efectos directos sobre la salud, pero sí puede influir en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución, además de afectaciones en procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección.

Otro de los parámetros incluidos es el potencial de reducción de oxidación (ORP). Según Hybrid Turkeys (2016), ORP es una medida en milivoltios (mV) del nivel de oxidación en el agua. Este índice representa la actividad del desinfectante en el agua en vez del nivel de concentración (en ppm) del mismo. Las medidas de ORP permiten que se evalúe la eficacia del tratamiento del agua, sin importar el tipo de oxidante ni la combinación de la fórmula desinfectante, y sin importar otras condiciones variables del agua que puedan existir.

Además se supervisa la temperatura del agua. La Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006) menciona que el agua fría tiene, por lo general, un sabor más agradable que el agua tibia, y la temperatura repercutirá en la aceptabilidad de algunos otros componentes inorgánicos y contaminantes químicos que pueden afectar al sabor. La temperatura alta del agua potencia la proliferación de microorganismos y puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión.

Y el último parámetro supervisado es la conductividad eléctrica. Se realiza este análisis con el objetivo de evidenciar la presencia de electrolitos disueltos, ya que el agua pura no debe presentar conductividad eléctrica alguna, por su ausencia de electrolitos, a diferencia del agua potable, que presenta algunos electrolitos disueltos. En fin, Pérez (2016) establece que la medida de la conductividad del agua brinda una idea de los sólidos disueltos en la misma.

Tras una inspección de los 5 parámetros anteriormente explicados, es posible determinar si el agua que se encuentra en el tanque de almacenamiento es apta para el consumo humano.

Etapa 3: Sistema de comunicación

El sistema de comunicación remota se basa en la detección de rangos no permitidos en los parámetros de turbidez, pH, temperatura, conductividad eléctrica y ORP, para el caso de agua potable en Costa Rica.. Además de supervisar el estado de calidad del agua, este sistema de alarma con comunicación remota informa acerca de otros fallos que se pueden generar en el sistema en general, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Requerimientos para el sistema de comunicación.

Situación	Forma de comunicación
No existe suministro eléctrico en la bomba	Mensaje a personal de mantenimiento. Indicador en Sitio
Existe suministro eléctrico pero no existe bombeo	Mensaje a personal de mantenimiento. Indicador en Sitio
Fallo en algún indicador en calidad de agua	Mensaje a personal de mantenimiento.
Peligro de desborde de agua en tanque	Mensaje a personal de mantenimiento.
Nivel de agua en tanque bajo	Mensaje a personal de mantenimiento.

Según lo mostrado en la tabla anterior, este sistema detecta si alguno o varios de los parámetros de calidad de agua se encuentran fuera de los rangos permitidos en Costa Rica. Así mismo, es capaz de advertir el bajo nivel del agua almacenada en el tanque o caso contrario, su desborde. Posterior a la detección de dichos fallos y/o advertencias, el sistema debe enviar información relacionada a estos, por medio de un mensaje SMS.

Etapa 4: Iluminación

Si el sistema de comunicación informa acerca de algún fallo y este debe ser reparado en horas nocturnas, se cuenta con un alumbrado eléctrico en los alrededores de la estructura destinada al sistema de bombeo. Lo anterior para facilitar dichas labores de mantenimiento y/o reparación.

Requerimientos del sistema fotovoltaico

El sistema de detección de la calidad del agua, el sistema electrónico de comunicación, el sistema de bombeo y la iluminación de seguridad del sitio son alimentados por medio de energía solar fotovoltaica. Los requerimientos del sistema fotovoltaico se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 6. Requerimientos del sistema fotovoltaico.

Elemento funcional del sistema	Detalles del elemento
Alimentación	<ul style="list-style-type: none">● Sistema de bombeo● Sistema de detección de la calidad del agua● Sistema de comunicación● Iluminación de seguridad del sitio
Autonomía	1 día

Ahora bien, el diseño del sistema general es aislado de la red eléctrica convencional, debido a los problemas de suministro eléctrico en la zona. De esta manera, el sistema fotovoltaico está conformado por paneles o módulos de celdas fotovoltaicas, sus soportes, inversores, reguladores de carga de batería y un banco de baterías.

Requerimientos generales del proyecto

En fin, los requerimientos generales del proyecto se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Requerimientos generales del proyecto.

Requerimientos
Diseño de un sistema de extracción de agua en un pozo, con una bomba eléctrica alimentada con energía solar fotovoltaica.
Detección de la calidad del agua almacenada en el tanque, de acuerdo a los parámetros mostrados en la tabla 4.
Sistema de alarmas con comunicación remota que cumpla con los requerimientos mostrados en la tabla 5.
Diseño de la iluminación en los alrededores de la instalación de la estructura destinada al bombeo.

Es importante mencionar que la etapa de implementación de este sistema de bombeo solar en la comunidad de Los Ángeles, está fuera del desarrollo de este proyecto. Se realizaron pruebas en laboratorio que verifican el correcto funcionamiento del sistema de detección de la calidad del agua. Además de la comprobación de un adecuado envío de mensajes de alerta.

Capítulo 4: Descripción e implementación del diseño

Sistema de bombeo de agua

Este sistema está dimensionado para el caso crítico de suministro de agua potable. Para esto, el propietario de la propiedad donde se va realizar la instalación, ha analizado que el consumo de agua, en un día promedio, en su vivienda y lechería está en un rango de 10 metros cúbicos. Considerando que en la implementación de este proyecto se dispone de un tanque de 1100 L, se determinó que se debe tener energía suficiente para el llenado de este tanque aproximadamente 10 veces al día.

Es importante mencionar que existe una serie de riesgos asociados a la forma de construcción, operación y mantenimiento de los tanques de almacenamiento. Gran cantidad de estos son construidos de tal manera que se generan grandes limitaciones para realizar labores de limpieza o mantenimiento en los mismos, debido a las dimensiones de la estructura en donde estos se ubican. Además, la mayoría de estos no cuentan con protección a la luz solar, lo que propicia el crecimiento de algas y deteriora la calidad del agua que se almacena. Sin embargo, para el desarrollo de este proyecto se decidió utilizar un tanque tricapa, es decir cuenta con protección de los rayos ultravioleta.

Bomba sumergible

En cuanto al llenado de este tanque, se optó por extraer el agua del pozo con una bomba solar 4SP2-16, sumergible, de la marca Samking. Entre sus características principales se encuentran:

- Motor 2.5 HP
- Caudal máximo 90 L/min
- Profundidad máxima 160 m
- Potencia de entrada máxima 2.6 kW
- 90-360 VDC
- 1 x 90-240 VAC
- 50/60 Hz
- Diámetro de apertura máximo 4"

A pesar de que el caudal máximo de la bomba es de 90 L/min, esta no siempre va brindar este valor, ya que el caudal obtenido depende tanto de la profundidad del pozo como de la potencia de entrada en la bomba (ver anexo A).

Con una potencia de entrada de 2600 W, la bomba brinda un caudal máximo de 85 L/m, a una profundidad de 30 m. Bajo estas condiciones, el tanque tarda en llenarse 13 minutos. Ya que el consumo total en la vivienda es de aproximadamente 10 m³, este tanque se debe llenar 10 veces al día produciendo un consumo aproximado de 5 460 Wh/día tras un funcionamiento de la bomba de 2 h 10 min.

En una posterior instalación de esta bomba, esta bomba puede producir una fuerza de elevación significativa. Sin embargo, es importante mencionar que el sistema de bombeo se encarga únicamente del llenado del tanque de almacenamiento, no la conducción o distribución. Lo anterior, debido a que el pozo comunal ubica en uno de los sitios más altos de la comunidad de Los Ángeles con el propósito de abastecer el poblado mediante un sistema por gravedad.

Además, ya que esta bomba solar trabaja en un rango de 90-240 VAC, es necesario utilizar un regulador de tensión. Teniendo en consideración que la potencia de entrada máxima en la bomba es de 2.8 kW, se decidió utilizar un regulador (ver figura 13) con las siguientes características:

$$P_{nominal} = 3 \text{ kA}$$

$$V_{entrada,nominal} = 220 \text{ V}$$

$$V_{salida,nominal} = 0 - 250 \text{ V}$$

$$I_{salida,nominal} = 12 \text{ A}$$

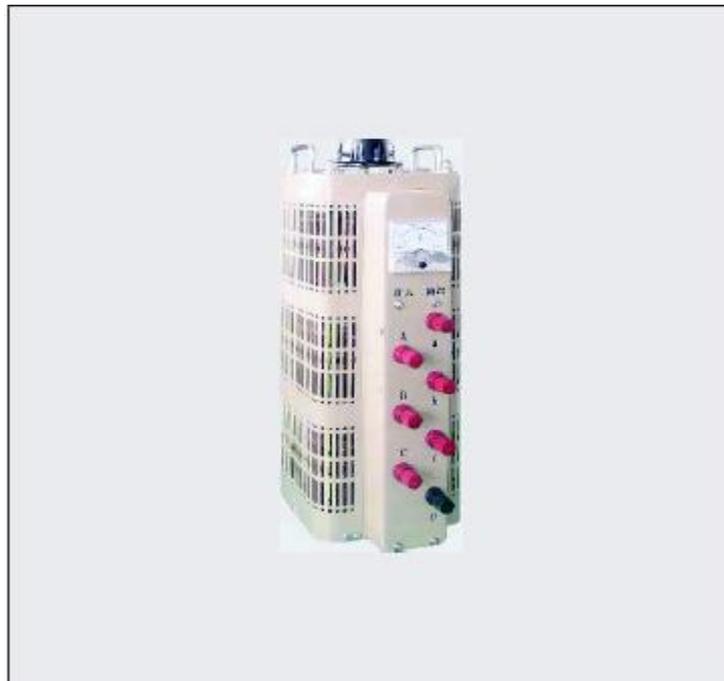


Figura 13. Regulador de tensión monofásico de 3 kVA.

Fuente: tomado de Maz A y S, 2018

Este sistema de bombeo también cuenta con un sensor de caudal, un sensor ultrasónico y una válvula de fluido, en la tubería de salida del agua para su distribución:

Sensor de caudal COM-CB0214A

Es un práctico medidor de flujo de líquido/agua para proyectos solares, de refrigeración por computadora o de jardinería. Este sensor se coloca en línea con el flujo de agua midiendo la cantidad de líquido que se mueve a través de él.

Este sensor de caudal tiene una carcasa de bronce y un rotor con paletas en su interior. Al atravesar el fluido por su interior, el sensor hace girar el rotor con una velocidad de giro que se determina mediante un imán fijado al rotor, el cual es detectado mediante un sensor *hall* externo a la carcasa. Por lo tanto, ninguna parte eléctrica está en contacto con el fluido.

La salida del sensor es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal atravesado:

$$f \text{ (Hz)} = K * Q \left(\frac{L}{min} \right) \quad (1)$$

$$Q \left(\frac{L}{min} \right) = \frac{f \text{ (Hz)}}{K} \quad (2)$$

El factor K de conversión depende de los parámetros constructivos del sensor, por lo que su valor es suministrado por el fabricante en la hoja de datos. En este caso, el sensor tiene un factor de conversión $K = 7.5$. A partir de estos, se realizó la implementación del código, donde se declaró una variable volátil que mide los flancos ascendentes de la señal, lo que corresponde a la frecuencia del pulso que se menciona en la ecuación 2. Este valor dividido por el factor de conversión K, da como resultado los litros por minuto que atraviesan el sensor, es decir el caudal en la salida del tanque de almacenamiento.

Sensor ultrasónico HC-SR04

Además del sensor de caudal, se utilizó un sensor ultrasónico el cual mide la distancia que existe entre él y el nivel del agua en el tanque de almacenamiento. Se debe conocer la capacidad máxima del tanque a utilizar y la medida cuando éste se encuentra lleno y cuando esté vacío. Con estos datos, es posible obtener la base matemática para calcular el nivel de líquido en el recipiente y aplicar dichos cálculos en el sketch para su respectiva implementación.

A nivel de código, se definió la distancia cuando el tanque está lleno y cuando está vacío, se colocó el pin *Trig* en modo salida y el pin *Echo* en modo de entrada. Posteriormente, se inicia con las lecturas, se obtiene la distancia en cm y se calcula la media del total de las muestras, en

este caso 100. Por último, con los datos anteriores, se obtiene la cantidad de líquido almacenado en el tanque. Una vez obtenido el nivel de agua en el tanque, se determina si existe peligro de desborde del líquido o si por el contrario, el nivel agua es bajo.

Válvula de fluido

Para evitar que el tanque quede sin agua, se cuenta con una válvula solenoide la cual interrumpe el flujo hasta que se apliquen 12V a sus conectores. Ya que el solenoide es una carga inductiva, es necesario incluir un diodo amortiguador en los contactos. Este diodo ayuda a eliminar los voltajes transitorios causados cuando una bobina magnética (como las que se encuentran en un motor, relé o solenoide) pierde energía repentinamente. Sin este diodo, los picos de voltaje transitorios pueden dañar otros elementos del circuito.

Además, debido a que el consumo de corriente de este solenoide es más alto de lo que puede manejar un transistor estándar, se utilizó un transistor de potencia Darlington TIP120, el cual es en realidad un par de transistores que actúan como un solo transistor con una alta ganancia de corriente.

Tras armar el circuito con los elementos antes mencionados y realizar el código que permita definir el pin digital del arduino, con el que se realizó la conexión, como la salida, se estableció que cuando el pin esté en alto, se conecte el colector al emisor del transistor, activando el solenoide y por ende, permitiendo que el agua fluya. Caso contrario, cuando se desee que el agua deje de fluir, se colocó el pin en bajo.

En fin, los dispositivos necesarios para el sistema de bombeo son los siguientes:

Tabla 8. Dispositivos requeridos para el sistema de bombeo.

Descripción	Cantidad
Bomba 4SP2-16	1
Tubería	1
Cable	30 m
Tanque de almacenamiento	1
Sensor de caudal	1
Sensor ultrasónico	1
Válvula de fluido	1

Sistema electrónico de detección de la calidad del agua

Selección del microcontrolador

Para el diseño de este sistema de detección de la calidad del agua, se debe tener en cuenta las principales especificaciones de cada uno de los sensores que se van a utilizar. Dichas especificaciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Especificaciones de los sensores seleccionados.

Componente	Tensión de operación (V)	Comunicación	Tiempo de respuesta (s)	Exactitud
Sensor turbidez	5	Analógica/ digital	≤ 0.5	± 0.1 UNT
Sensor pH	5	Analógica	≤ 60	± 0.1 pH
Sensor ORP	5	Analógica	≤ 20	± 10 mV
Sensor conductividad eléctrica casero	5	Analógica	≤ 150	± 25 μ S/cm
Sensor temperatura	2.3-5.5	Digital	≤ 30	± 0.5 °C

Ahora bien, para determinar el microcontrolador a utilizar, se consideró necesario analizar cuál opción (Raspberry Pi y Arduino Mega), cumple de mejor manera con los requerimientos de este proyecto. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10. Comparación entre Raspberry Pi y Arduino Mega.

Característica	Raspberry Pi modelo B	Arduino Mega 2560
Memoria	512 MB	0.002 MB
Velocidad de reloj	700 MHz	16 MHz
Multitarea	Si	No
Tensión de entrada	5 V	7 a 12 V
Memoria Flash	Tarjeta SD (2 a 16 GB)	32 KB
Puertos USB	2	1
Entorno de desarrollo integrado (IDE)	Scratch, IDLE, cualquiera con soporte Linux	Arduino
Entrada/salida digital	22	54 (15 PWM)
Entradas analógicas	-	16
UART	4	4

Fuente: tomado de las hojas de datos de la Raspberry Pi y el Arduino Mega, 2018

Asimismo, la raspberry cuenta con cámara y es capaz de reproducir videos en HD, pasando por una salida de audio así como una salida de video compuesto. No obstante, estas funciones no son necesarias para el desarrollo de este proyecto.

Además, es importante mencionar que la comunicación en 4 de los 5 sensores, del sistema de detección de calidad de agua, es analógica y las entradas de la raspberry son digitales. En la raspberry, si se desea realizar un muestreo analógico, se debe construir un circuito ADC con varios pines GPIO o una tarjeta de sonido, según la aplicación requerida. Por el contrario, el arduino cuenta con 16 entradas analógicas.

Se decidió utilizar un microcontrolador Arduino Mega 2560 para adquirir y procesar los datos, ya que es un producto open source, de bajo costo y con los suficientes pines analógicos y digitales para las aplicaciones necesarias en este proyecto. Los demás pines se pueden utilizar en un futuro para hardware adicional y otros sensores, de ser necesario.

Una vez escogido el microcontrolador, se deben seleccionar los sensores para medir los parámetros de calidad de agua. En este proyecto se utilizaron los siguientes sensores:

Sensor de ORP SEN0165

Este es un medidor del potencial de oxidación-reducción (ORP), el cual es una medida de la capacidad de oxidación y reducción de la solución acuosa, caracterización de la oxidación o reducción del grado relativo. Este es un sensor analógico que cuenta con un monitoreo compacto que se adapta fácilmente a un microcontrolador, además sigue una relación lineal y no necesita ajuste del instrumento ni mantenimiento del electrodo.

Conexión del sensor con el microcontrolador

1. Se conecta la sonda al circuito acondicionador por medio de un BNC.
2. Se conecta el circuito acondicionador al microcontrolador de la siguiente manera: el cable rojo se conecta al pin de alimentación de 5V, el cable negro se conecta al pin GND y el cable azul se conecta al pin analógico A3 del arduino.

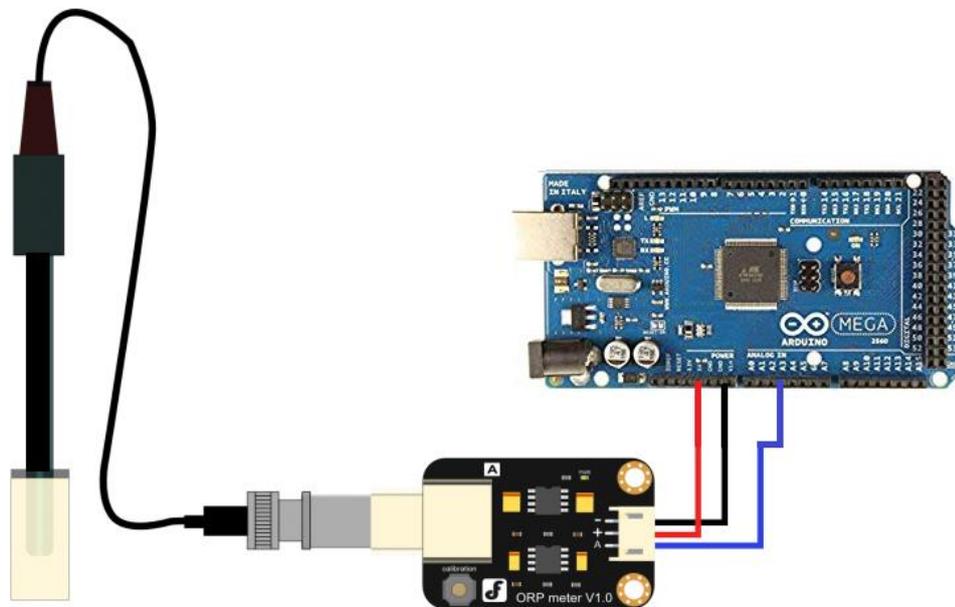


Figura 14. Diagrama de conexión del sensor de potencial de oxidación-reducción (ORP) y microcontrolador

Implementación del código

Primeramente se realizó una función que se encarga de tomar 10 medidas, las ordena de menor a mayor y descarta las dos menores y las dos mayores. Luego, se saca un promedio de las mediciones restantes.

Se realiza la lectura del valor del pin analógico A3, valor el cual es utilizado en conjunto con la tensión del sistema y el offset del sensor (29 mV), para calcular el valor de ORP del agua. Una vez obtenida esta medición, se define que si el valor está en un rango de 650 a 800 mV, el potencial de oxidación-reducción es recomendado, es decir se provoca una desactivación casi instantánea de los virus. Por el contrario, si el ORP es mayor a 800 mV, el tratamiento del agua no resulta ser eficaz, al igual que el caso de un ORP menor a 200 mV. El rango de 200-650 mV está definido como un rango permitido, más no recomendado.

Sensor de turbidez SEN0189

Este sensor utiliza la luz para detectar partículas suspendidas en el agua al medir la transmitancia de la luz y la tasa de dispersión, que cambia con la cantidad de sólidos suspendidos totales (TSS) en el agua. Es importante mencionar que a medida que aumenta el TTS, aumenta el nivel de turbidez del líquido.

Conexión del sensor con el microcontrolador

1. Se conectan los cables de la sonda al circuito acondicionador.
2. Se conecta el circuito acondicionador al microcontrolador de la siguiente manera: el cable rojo se conecta al pin de alimentación de 5V, el cable negro se conecta al pin GND y el cable azul se conecta al pin analógico A5 del arduino.

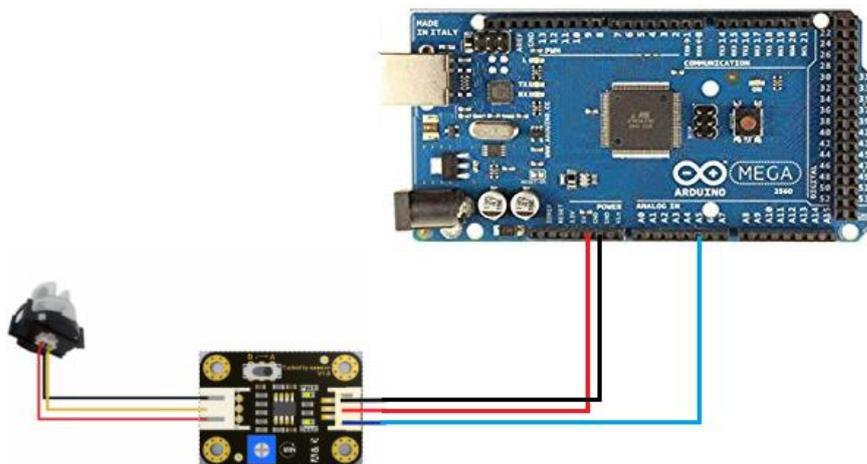


Figura 15. Diagrama de conexión del sensor de turbidez y microcontrolador

Descripción del diseño

Para comprender el comportamiento de este sensor, es necesario acudir a la hoja de datos donde se muestra la siguiente figura:

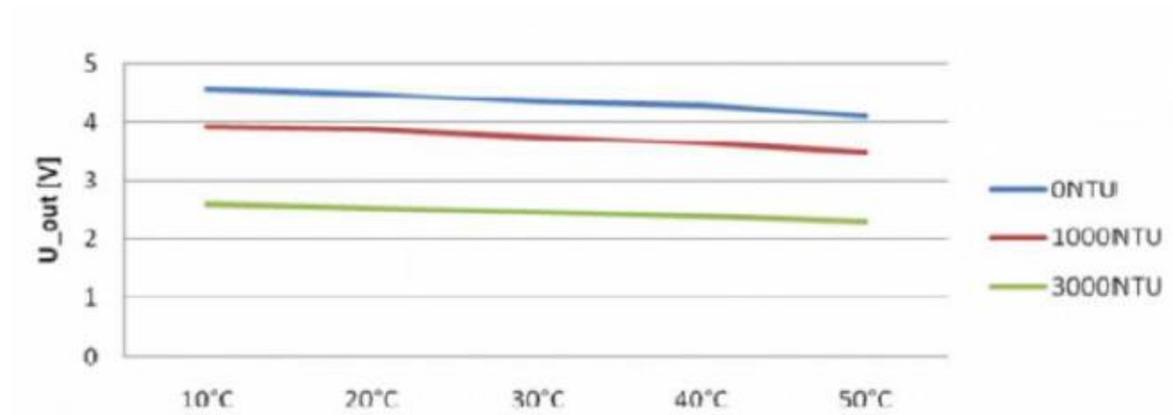


Figura 16. Variación de la tensión de salida en función de la temperatura en soluciones con distinta turbidez.

Fuente: tomado de hoja de datos, 2018.

Además, el fabricante menciona que la diferencia de tensión entre las soluciones de 0 y 3000 UNT es de 1.9 V. Por lo que si se considera una relación lineal entre la tensión y la turbidez, es posible calcular la siguiente variación:

$$\Delta \text{Concentración} = \frac{3000 \text{ UNT}}{1900 \text{ mV}} \quad (3)$$

$$\Delta \text{Concentración} = 1.579 \frac{\text{UNT}}{\text{mV}}$$

Con esto, se obtuvo que una variación de 1 mV en la tensión de salida equivale a un cambio de 1.579 UNT en la solución. Ya que en Costa Rica, el rango de turbidez permitido para agua potable es de 0-5 UNT, se puede analizar cuál es el cambio máximo en la tensión de salida que puede existir sin salirse de dicho rango:

$$\Delta \text{máximo de tensión de salida} = \frac{5 \text{ UNT}}{1.579 \frac{\text{UNT}}{\text{mV}}} \quad (4)$$

$$\Delta \text{máximo de tensión de salida} = 3.167 \text{ mV}$$

Por lo que se estimó que un cambio mayor a 3 mV, implica que el agua no es potable.

Implementación del código

Al igual que para el caso del sensor de pH, se utilizó una función que toma 10 medidas, descarta los extremos y saca el promedio de las restantes para obtener mayor precisión en las medidas. Además, se convirtió el valor del pin analógico 5 a voltios, multiplicando por 5 y dividiendo por 1024.

Por último, se definió que si la turbidez está en un rango de 0-5 UNT, el agua tiene una turbidez permitida. Por el contrario, si la turbidez es mayor a 5 UNT, el agua está turbia.

Sensor de pH SEN0161

Es en realidad una sonda la cual está compuesta por un sensor y un circuito acondicionador. El sensor le proporciona al microcontrolador una señal analógica directamente proporcional a la medición del pH a través de un conector BNC (ver figura 17).

Conexión del sensor con el microcontrolador

1. Se conecta la sonda al circuito acondicionador por medio de un BNC.
2. Se conecta el circuito acondicionador al microcontrolador de la siguiente manera: el cable rojo se conecta al pin de alimentación de 5V, el cable negro se conecta al pin GND y el cable azul se conecta al pin analógico A7 del arduino.

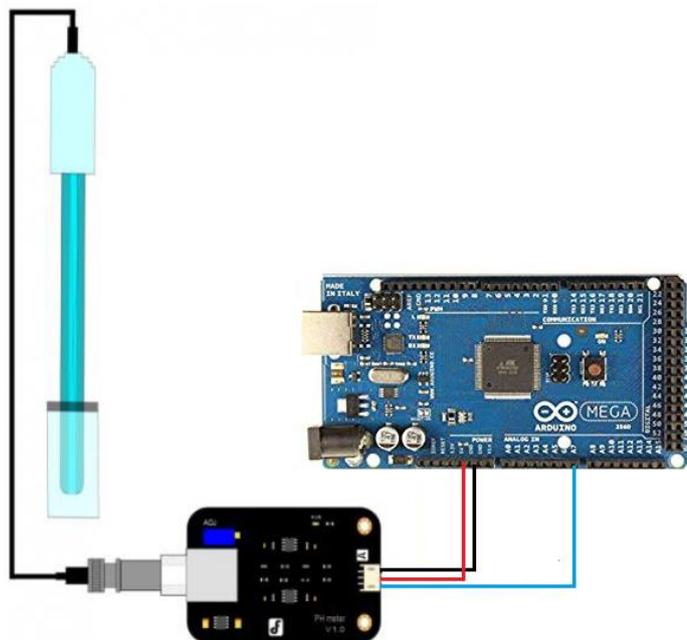


Figura 17. Diagrama de conexión del sensor de pH y microcontrolador.

Es importante mencionar que el circuito acondicionador que se muestra en la figura 17, se encarga de adaptar el valor de la tensión para que la lectura en el microcontrolador se encuentre dentro del rango que trabaja la placa, es decir 0-5 V.

Implementación del código

Para obtener una mayor precisión en las mediciones obtenidas, primeramente se realizó una función que se encarga de tomar 10 medidas, una cada 10 segundos, las ordena de menor a mayor y descarta las dos menores y las dos mayores. De esta manera, se asegura que si se presenta un error en alguna de las medidas obtenidas, no afectará el resultado final. De las seis medidas restantes, se saca un promedio y este es el resultado que se muestra. Este valor se convierte en voltios dividiendo por 1024 y multiplicando por 5. Luego, se realiza la conversión de voltios a pH mediante la siguiente ecuación:

$$pH = media\ pendiente * tensión\ medida\ (V) + offset \quad (5)$$

Donde la media de la pendiente y el offset del sensor serán obtenidos por medio de pruebas de calibración.

Una vez obtenido el valor de pH, el código determina si este valor se encuentra dentro de los rangos permitidos en Costa Rica. Si el pH tiene un valor entre 6.0-8.0, el agua tiene un pH normal, por el contrario, si el pH es menor a 6, se define como un pH bajo (agua ácida) y si el pH es mayor a 8, se trata de un pH alto (agua alcalina).

Sensor de temperatura DS18B20

Es uno de los sensores más versátiles en el mercado. Este es idóneo para realizar mediciones en ambientes húmedos e incluso dentro del agua, requisito necesario para el desarrollo de este proyecto. Este sensor viene en forma de sonda impermeable, lo cual facilita la toma de mediciones tras sumergirlo en agua.

Conexión del sensor con el microcontrolador

1. Se conecta el cable de la alimentación del sensor (cable rojo) a uno de los extremos de la resistencia de 4.7 k Ω y además al pin de alimentación de 5V del arduino.
2. El cable negro se conecta al pin GND.
3. Se conecta el cable de los datos del sensor (cable verde) al otro extremo de la resistencia de 4.7 k Ω y al pin digital 5 del Arduino Mega.

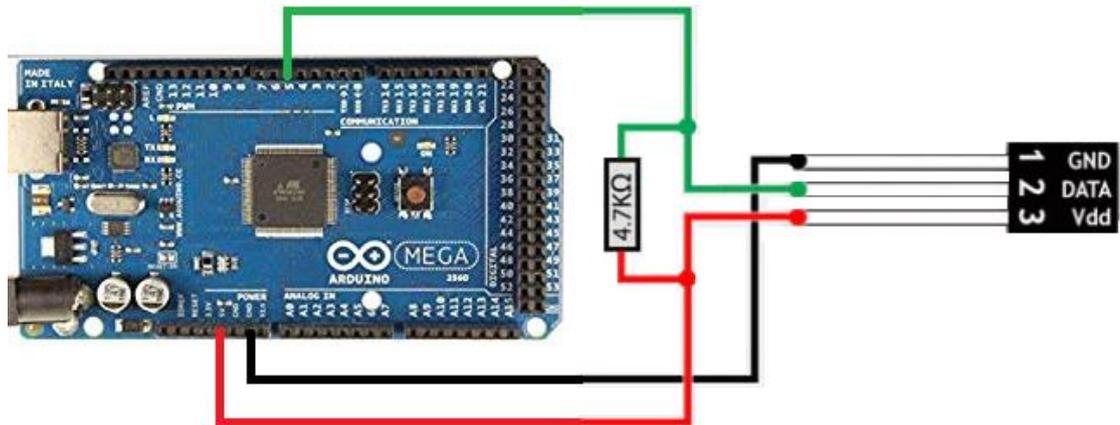


Figura 18. Diagrama de conexión del sensor de temperatura y microcontrolador.

Es importante mencionar que la resistencia de 4.7 kΩ funciona como una resistencia de *pull-up*, para evitar que se realicen lecturas erróneas cuando no se está recibiendo una señal. El valor de esta resistencia ha sido recomendado por el fabricante

Implementación del código

Este sensor DS18B20 cuenta con una librería *DallasTemperature.h*, además de la librería *OneWire.h* para la comunicación. Es importante incluir ambas librerías en el código, para evitar mediciones erróneas o problemas de conexión entre el sensor y el microcontrolador que impidan el inicio de las lecturas.

Una vez incluidas las librerías, se definió una variable de tipo *OneWire* a la cual se le asigna el pin digital del arduino con el que se realizó la conexión como línea de datos, en este caso sería el pin 5. Posteriormente, llamó a una función de la librería *DallasTemperature.h* y se obtuvieron directamente las medidas de temperatura en °C.

Por último, se analiza el valor obtenido mediante la medición. Si la temperatura del agua está en un rango de 18-30 °C, la temperatura es normal. No obstante, si el valor de la medición es menor a 18 °C, la temperatura es baja o, si el valor es mayor a 30 °C, la temperatura del agua es alta.

Sensor de conductividad eléctrica

Descripción del diseño del sensor

Se decidió construir un sensor de conductividad eléctrica casero con un enchufe típico que al otro lado tiene dos cables separados. Cada uno de estos cables se conectó a un electrodo del enchufe en un lado y al microcontrolador en el otro extremo; de esta manera el enchufe funciona como sonda en el agua y la información de la conductividad eléctrica se extrae de los valores leídos en los cables. Lo único que se añadió para la conexión son dos cables del microcontrolador para que los extremos sean compatibles con la placa.

Como la conductividad eléctrica es inversa a la resistencia eléctrica, se obtuvo la conductividad del fluido, midiendo la resistencia cuando el enchufe está sumergido en el líquido de interés, en este caso el agua. Para obtener el valor de la resistencia del agua, se armó un divisor de tensión como el que se muestra en la siguiente figura:

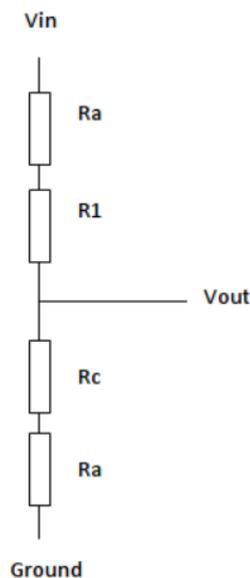


Figura 19. Circuito para obtener la resistencia eléctrica del agua.

Donde:

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$

R_a = Resistencia en el pin de alimentación (se asumió un valor de 25Ω)

R_c = Resistencia eléctrica del agua (valor por obtener)

Conexión del sensor con el microcontrolador

1. Se conecta una resistencia de 1 k Ω entre los pines A0 y A4.
2. Se conecta una de las terminales del enchufe al pin A0.
3. La otra terminal del enchufe se conecta a A1.

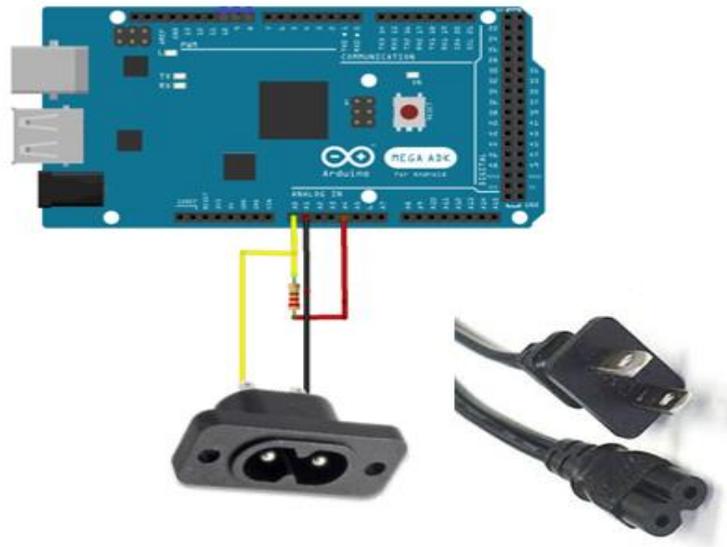


Figura 20. Diagrama de conexión del sensor de conductividad y microcontrolador.

Implementación del código

Para obtener los valores de conductividad eléctrica del agua, primero se realizó la lectura del pin analógico A0, valor el cual es convertido en Voltios tras multiplicarlo por la tensión del sistema y dividirlo por 1024. Este valor es utilizado para obtener la resistencia eléctrica, en conjunto con el valor de R1 y la tensión del sistema, mediante la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{V * R_1}{V_{in} - V} \quad (6)$$

Donde:

R1 = 1 k Ω

V = valor de la lectura del pin analógico convertido en Voltios

Vin = tensión del sistema (5 V)

No obstante, se debe tomar en cuenta la resistencia del pin por lo que el valor final de Rc se obtiene de la siguiente manera:

$$R_c = R_c - R_a \quad (7)$$

Finalmente, se realiza la conversión a conductividad eléctrica y se analiza el valor obtenido. Si la conductividad eléctrica es menor a $400 \mu\text{S/cm}$, está dentro del rango permitido en Costa Rica. Caso contrario, el agua tiene conductividad eléctrica alta.

Diagrama completo del hardware

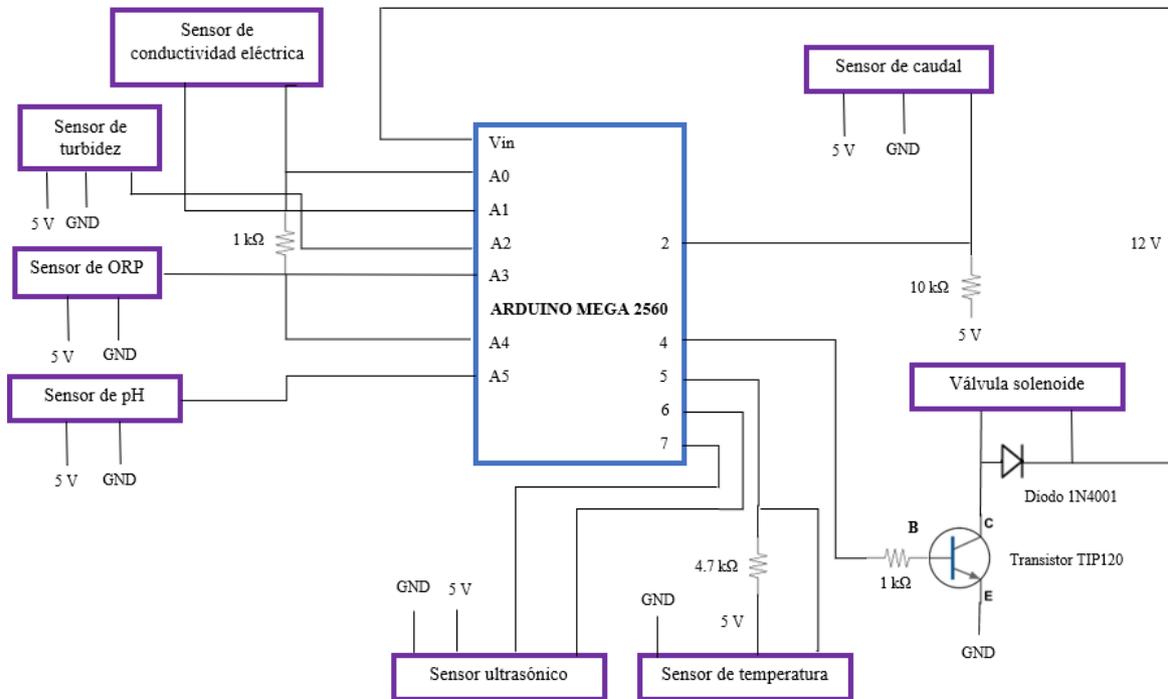


Figura 21. Diagrama completo del hardware del sistema

Sistema de comunicación

Este sistema está compuesto principalmente por un módulo SIM900 el cual es un escudo GSM/GPRS para Arduino (ver figura 22). Este se controla mediante los comandos AT (GSM 07.07, 07.05 y los comandos AT mejorados de SIMCOM). Con este módulo se envían mensajes SMS, siempre y cuando, alguno o varios de los parámetros de detección de calidad de agua se encuentren fuera de los rangos permitidos en Costa Rica, según el Decreto N° 38924-S-MINAE (2015). Asimismo, se envían mensajes cuando no hay suministro eléctrico en la bomba y cuando el sensor ultrasónico detecta que el tanque está con un nivel de agua bajo o, por el contrario, existe peligro de desborde de agua en el tanque.



Figura 22. Módulo SIM900 GSM/GPRS. Fuente: CrCibernética.

Conexión SIM900

La conexión entre el microcontrolador y el módulo SIM900 es sencilla. Únicamente se debe colocar la SIM900 sobre el arduino, introduciendo los pines del módulo en los espacios correspondientes en el arduino (ver figura 23):



Figura 23. Conexión entre el módulo SIM900 y Arduino Mega

Además, es necesario realizar la conexión de los pines correspondientes al transmisor y receptor, la cual se realiza en el multiplexor UART de la SIM900 (ver figura 24). El transmisor, el cual corresponde a la primera línea de pines, se debe conectar a la patilla 2 de la segunda línea. En cuanto al receptor, tercera línea de pines, este se conecta al pin 3 de la segunda línea. Realizando esta conexión, es posible comunicar el módulo SIM con el arduino y enviar los mensajes de texto para advertir del fallo presente.

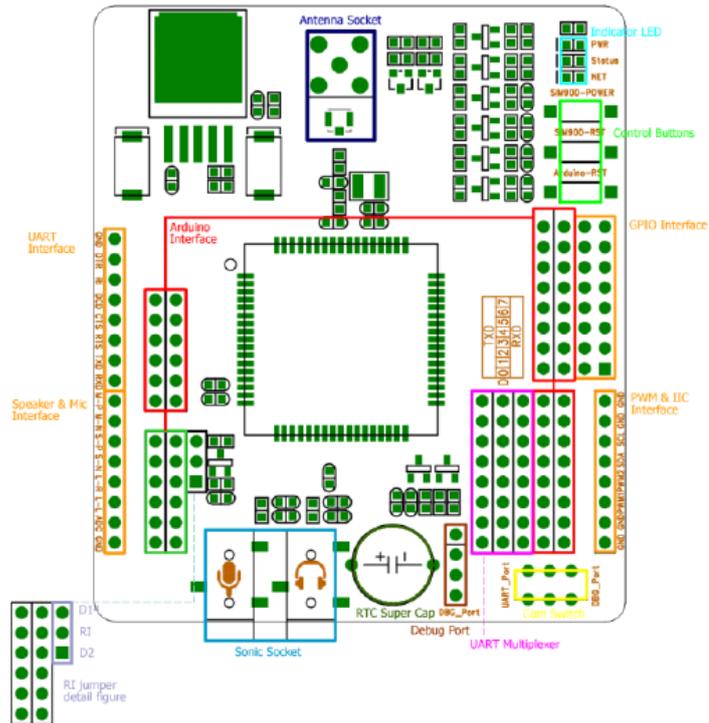


Figura 24. Hardware del módulo SIM900. Fuente: hoja de datos del módulo SIM900

Iluminación

Para brindar iluminación en los alrededores de la instalación, se utilizan 2 bombillos LED de 9W, 12/24 VDC.

Diseño del sistema fotovoltaico

Evaluación del recurso solar

Para realizar este diseño, es importante comenzar con un análisis del recurso solar de la zona. Para esto, se debe contar con un resumen climático suministrado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). En este caso, la zona de interés no cuenta con resúmenes climáticos, pero dicho instituto brindó información referente a la Estación Meteorológica ubicada en Puerto Viejo de Sarapiquí, Cantón al que pertenece el distrito La Cureña. En la siguiente figura se muestran los datos de dicha estación para un día promedio de cada mes:

ESTACION: 69 681 LA REBUSCA

Latitud: 10 ° 29 ' N Longitud: 84 ° 01 ' O Altitud. 40 m.s.n.m

Elementos	Periodos		Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sot.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
	1999	2016														
LLUVIA	1999	2016	337.3	205.3	169.8	148.1	331.2	387.6	451.6	336.8	254.4	282.5	411.8	444.9	313.4	3761.3
TEM.MAX.	1999	2016	28.7	29.5	30.3	31.0	31.2	30.9	30.0	31.0	32.0	31.6	29.4	28.8	30.4	
TEM.MIN.	1999	2016	20.6	20.5	21.0	21.6	22.4	22.6	22.4	22.4	22.3	22.3	21.8	21.2	21.8	
TEM.MED.	1999	2016	24.7	25.0	25.6	26.3	26.8	26.8	26.2	26.7	27.1	27.0	25.6	25.0	26.1	
HUMEDAD	1999	2016	87.2	84.4	83.5	83.5	86.0	87.7	89.0	87.9	86.1	87.3	89.2	88.9	86.7	
VIENTO VEL.	1999	2016	4.6	5.3	5.4	5.0	3.9	3.4	3.5	3.2	3.2	2.8	2.9	3.5	3.9	
RADIACION	1999	2016	14.2	14.2	12.1	12.9	8.6	10.7	10.2	10.8	11.8	12.6	10.6	12.3	11.7	
PRESION	2015	2017				649.2	650.9	697.8	636.0	917.3	1007.0	1005.5	1006.3	1007.6	842.0	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	5	3	Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.	26	19	18	17	22	24	26	24	22	24	24	27	273

Lluvia en milímetros: 1mm = 1 litro de agua por m². Radiación Solar global en Megajulios(MJ/m²)
 Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).
 VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste, 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noreste, 9 Variable
 Brillo Solar en horas y décimas de horas. Presión hPa.

Figura 25. Resumen climático de Puerto Viejo de Sarapiquí.
 Fuente: tomado de IMN, 2018.

A partir de la posición geográfica (latitud y longitud) de la zona de interés, es posible obtener un diagrama cilíndrico de la zona. El Laboratorio de Radiación Solar de la Universidad de Oregon cuenta con una aplicación que permite obtener estos diagramas. Para la zona de estudio, se obtienen los siguientes:

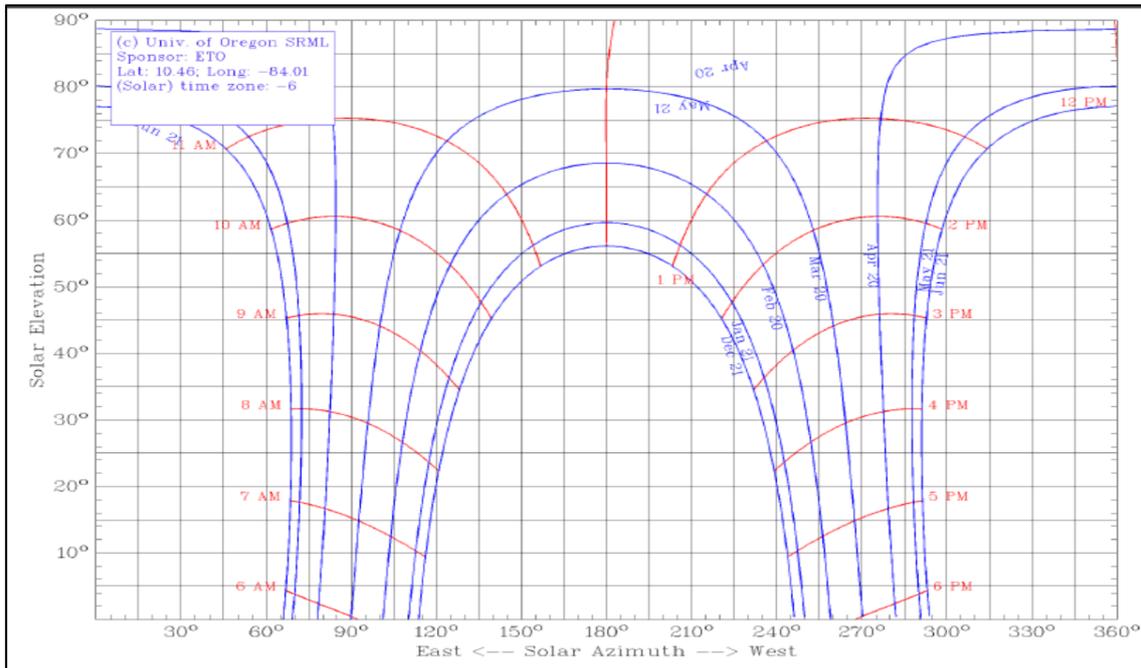


Figura 26. Diagrama cilíndrico de Puerto Viejo de Sarapiquí (latitud: 10.46 N, longitud: -84.01 O correspondiente a los meses de Enero-Junio).
 Fuente: tomado de <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

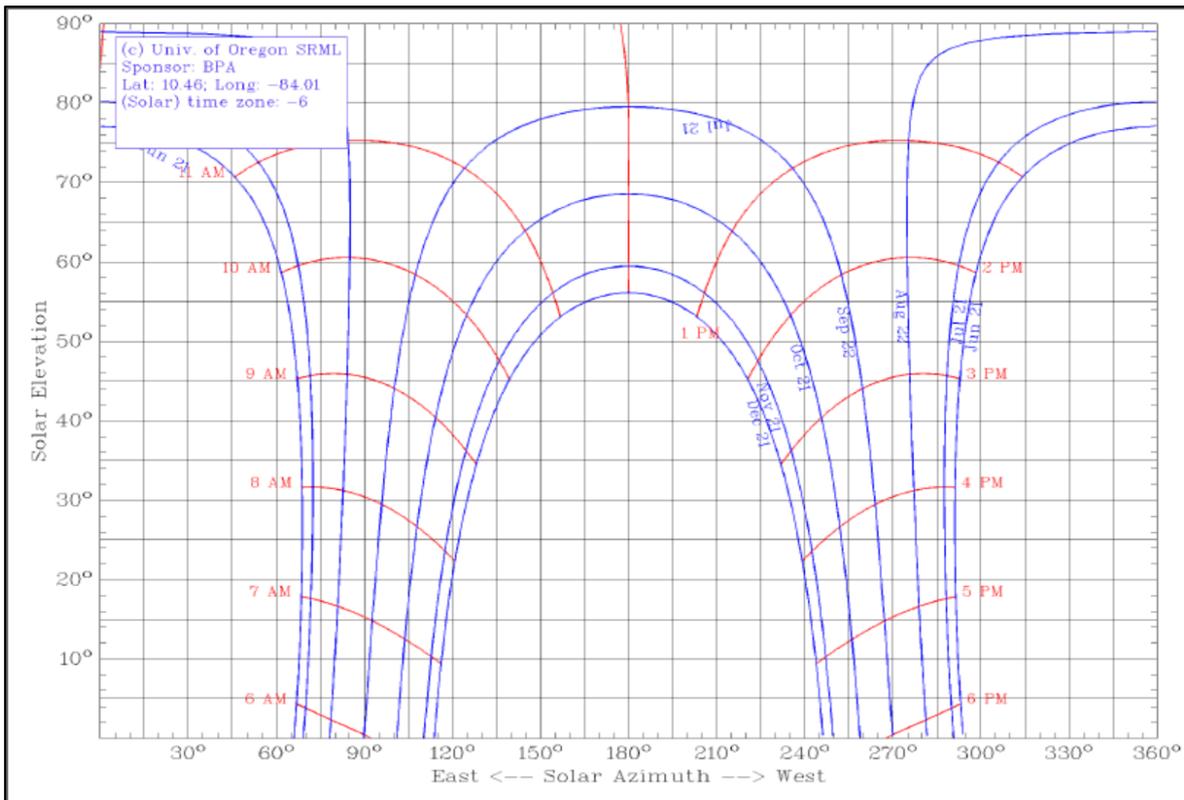


Figura 27. Diagrama cilíndrico de Puerto Viejo de Sarapiquí (latitud: 10.46 N, longitud: -84.01 O correspondiente a los meses de Julio-Diciembre).

Fuente: tomado de <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

Mediante los diagramas solares mostrados anteriormente se obtuvo que en la zona de Puerto Viejo de Sarapiquí, el Sol se encuentra únicamente orientado hacia el norte en los meses de mayo, junio y julio. Por el contrario, los meses en los que el Sol se encuentra únicamente orientado hacia el sur son enero, febrero, marzo, setiembre, octubre, noviembre y diciembre. En cuanto a los meses de abril y agosto, el Sol se encuentra perpendicular. A partir de estos datos, se determinó que la mejor captación solar en la zona se da con una orientación hacia el sur.

Una vez determinada cuál es la mejor orientación, se analizó cuál es el ángulo de inclinación óptimo. Para esto, se realizaron cálculos que permiten obtener la energía obtenida por año, para los distintos grados de inclinación. En este caso, se analizaron los siguientes ángulos: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y 40°. Los cálculos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 11. Cálculos de la radiación mensual en Puerto Viejo de Sarapiquí.

	Ene ro	Febr ero	Marz o	Abri l	May o	Juni o	Julio	Agos to	Setie mbre	Octu bre	Novi embr e	Dicie mbre
Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Radiaci ón diaria (MJ/m²)	14.2	14.2	12.1	12.9	8.6	10.7	10.2	10.8	11.8	12.6	10.6	12.3
Radiaci ón mensua l (kWh/ m²)	122. 3	110. 4	104. 2	107. 5	74.1	89.2	87.8	93.0	98.3	108. 5	88.3	105.9

Para realizar los cálculos mostrados en la tabla anterior, se debe tener presente que:

$$3.6 \frac{MJ}{m^2} = 1 \frac{kWh}{m^2} \quad (8)$$

Ahora bien, a partir de la radiación mensual y los coeficientes de corrección por inclinación (k) (ver anexo B), se determinó la radiación anual para los distintos ángulos de inclinación. Estos resultados se muestran a continuación:

Tabla 12. Radiación anual en Puerto Viejo de Sarapiquí a distintos ángulos de inclinación.

Ángulo de inclinación (°)	Radiación anual (kWh/m²)
0	1189.56
5	1201.46
10	1201.71
15	1197.43
20	1182.80
25	1163.06
30	1136.18
35	1100.50
40	1055.69

A partir de los valores mostrados en la tabla anterior, se determinó que el ángulo de inclinación con el que se puede obtener más energía en un año en Puerto Viejo de Sarapiquí es

10°, con un valor de 1201.71 kWh/m². Por lo tanto, en la zona de Puerto Viejo de Sarapiquí se puede obtener mayor energía solar por unidad de área (radiación) con un ángulo de inclinación de 10° y con una orientación hacia el sur.

Finalmente, se calcularon las horas solares pico en la zona mediante la ecuación 10. Para esto, se analizó el caso crítico, el cual corresponde al mes de mayo, ya que la radiación diaria es de tan sólo 8.6 MJ/m². Con un ángulo de inclinación de 10°, orientación hacia el sur y analizando la radiación de un día promedio de mayo, se obtiene que:

$$Rad_{diaria,kWh/m^2} = Rad_{diaria,MJ/m^2} \times \frac{1 kWh/m^2}{3.6 MJ/m^2} \times k \quad (9)$$

$$Rad_{diaria,kWh/m^2} = 8.6 MJ/m^2 \times \frac{1 kWh/m^2}{3.6 MJ/m^2} \times 0.95$$

$$Rad_{diaria,kWh/m^2} = 2.27 \frac{kWh}{m^2}$$

$$HSP = \frac{Rad_{diaria}}{1 kW/m^2} \quad (10)$$

$$HSP = \frac{2.27 kWh/m^2}{1 kW/m^2}$$

$$HSP = 2.27 \text{ h}$$

Además, para el diseño del sistema fotovoltaico, es fundamental conocer el consumo energético de los componentes que se utilizan en este proyecto:

Evaluación de los consumos

Cuando se realiza el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica aislada se toman en cuenta todas las cargas en corriente directa (CD) y corriente alterna (CA) que estarán conectadas, en este caso solo se cuenta con cargas en CD. Con la potencia nominal de cada uno de los componentes/equipos y el tiempo de funcionamiento de cada uno de estos, se obtuvo la energía necesaria por mes, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Evaluación de los consumos generales en el proyecto “Sistema de bombeo solar en un pozo con detección automática de la calidad del agua para la comunidad de Los Ángeles, La Cureña”.

Cantidad	Componente/ equipo	Potencia nominal (W)	Horas de funcionamiento	Consumo diario (Wh)
1	Sensor de pH	0.175	0.5	0.088
1	Sensor de ORP	0.250	0.5	0.125
1	Sensor de temperatura	0.018	0.5	0.009
1	Sensor de conductividad eléctrica	0.100	0.5	0.050
1	Sensor de turbidez	0.200	0.5	0.100
1	Sensor de caudal	0.075	24	1.800
1	Sensor ultrasónico	0.010	24	0.2400
1	Válvula solenoide 12V	48	22	1056
1	Arduino Mega	0.465	24	11.16
1	SIM900	2.75	24	66
1	Bomba sumergible	2 600	2.1	5460
2	Bombillo LED	18	6	108
	Otros consumos	50	0.5	25
Total				6 728.57

Como se puede observar en la tabla anterior, el consumo energético total es de aproximadamente:

$$E_{CC} = 6.729 \text{ kWh}$$

Sin embargo, debido a las posibles pérdidas presentes, este no es el consumo energético real en el sistema. En corriente continua, las pérdidas se calculan por medio de la ecuación 11:

$$K_{T,CC} = (1 - (K_B + K_R + K_x)) \left(1 - \frac{K_A * D_{aut}}{P_{D,max}} \right) \quad (11)$$

Donde:

$K_{T,CC}$: pérdidas totales en corriente continua

K_B : pérdidas por rendimiento de las baterías. Se considera un 5% en baterías nuevas.

K_R : pérdidas en el regulador. Se acepta un 10%.

K_x : pérdidas por caída de tensión. Se acepta un 10%.

K_A : pérdidas por autodescarga diaria de la batería. Aproximadamente un 0.5%.

D_{aut} : días de autonomía. En este proyecto es 1 día.

$P_{D,max}$: profundidad máxima de descarga. Se considera un 75%.

Por lo que:

$$K_{T,CC} = (1 - (0.05 + 0.1 + 0.1)) \left(1 - \frac{0.005 * 1}{0.75} \right)$$

$$K_{T,CC} = 0.745$$

La energía que se necesita para cubrir el consumo y las pérdidas en este proyecto es:

$$E_{CC,total} = \frac{E_{CC}}{K_{T,CC}} \quad (12)$$

$$E_{CC,total} = \frac{6\,729}{0.745}$$

$$E_{CC,total} = 9\,032 \text{ Wh}$$

Balance de energía

Se calculó la relación entre los consumos y el recurso, para determinar la potencia máxima que se puede producir en el campo fotovoltaico en la comunidad de Los Ángeles:

$$P_{campo} = \frac{E_{diaria,requerida}}{HSP} \quad (13)$$

$$P_{campo} = \frac{9\,032}{2.27}$$

$$P_{campo} = 3\,978.86 \text{ W}$$

Y la cantidad de módulos de Jinko Solar de 325 W necesarios son:

$$N_{mod} = \frac{1.1 * \square\square\square\square\square}{P_{mod}} \quad (14)$$

$$N_{mod} = \frac{1.1 * (3\,978.86)}{325}$$

$$N_{mod} = 13.47$$

Una vez determinada la cantidad de módulos requeridos (14), se debe determinar las características del sistema de almacenamiento:

Dimensionamiento de batería

La capacidad de la batería se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{1.1 * E_{diaria} * D_{aut}}{V * \square\square\square\square} \quad (15)$$

Donde:

V : tensión de trabajo de la instalación (24V)

Por lo tanto:

$$Q = \frac{1.1 * 9\,032 * 1}{24 * 0.75}$$

$$Q = 551.96 \text{ Ah}$$

Por lo tanto, si se utilizan baterías 120 Ah 24VDC, disponibles en el mercado costarricense, se necesita un total de 5 baterías.

Cálculo del regulador

Además, se decidió utilizar un regulador con las siguientes características:

$$V_{max,reg} = 150V$$

$$I_{max,reg} = 80A$$

$$Rango V para MPPT = 30 - 130V$$

Hay que tener en cuenta que este regulador asegura el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia si la tensión está dentro de un rango de tensiones (30 – 130 Vcc), por lo tanto se debe calcular el valor de esa corriente de entrada para ambos valores extremos de tensión mediante la fórmula 16:

$$i_{reg} = \frac{P_{max,FV}}{V_{reg}} \quad (16)$$

Donde:

i_{reg} : corriente que entra al regulador

$P_{max,FV}$: potencia máxima que puede proporcionar el campo fotovoltaico

V_{reg} : tensión que existe en los bornes de entrada del regulador

Intensidad máxima de entrada (con 130 Vcc):

$$i_{reg} = \frac{4550}{130}$$

$$i_{reg} = 35A$$

Intensidad máxima de entrada (con 30 Vcc):

$$i_{reg} = \frac{4550}{30}$$

$$i_{reg} = 151.7 A$$

Debido a que la corriente máxima que puede entrar por el regulador de carga es de 80A, no es posible utilizar solo un regulador en este proyecto. Por lo tanto, se necesitan:

$$N_{reg} = \frac{227.5}{80}$$

$$N_{reg} = 2.84$$

Es decir, se necesitan 3 reguladores de estos, los cuales se pueden conectar de la siguiente manera:

- 2 reguladores FLEmax 80 con 5 módulos fotovoltaicos cada uno, donde:

$$i_{reg} = \frac{1625}{30}$$

$$i_{reg} = 54.2 \text{ A}$$

- 1 regulador FLEmax 80 con 4 módulos fotovoltaica cada uno, donde:

$$i_{reg} = \frac{1300}{30}$$

$$i_{reg} = 43.3 \text{ A}$$

Conexión entre módulos

El número de módulos que forman cada cadena, se calcula de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{V_{min,reg}}{V_{oc}} \quad (17)$$

$$N_s = \frac{20}{46}$$

$$N_s = 0.43$$

$$N_s = \frac{V_{max,reg}}{V_{oc}}$$

$$N_s = \frac{130}{46}$$

$$N_s = 2.83$$

Por lo tanto, se pueden conectar de 1-2 módulos por cada cadena.

Y la cantidad de cadenas que se deben conectar en paralelo son:

$$N_p = \frac{I_{min,reg}}{I_{sc}} \quad (18)$$

$$N_p = \frac{35}{9.2}$$

$$N_p = 3.8$$

$$N_p = \frac{I_{min,reg}}{I_{sc}}$$

$$N_p = \frac{65}{9.2}$$

$$N_p = 7.1$$

Por lo tanto, se pueden conectar de 3-7 cadenas en paralelo.

Selección y comprobación

Combinaciones posibles

Opción 1: 14 módulos con 3 cadenas en paralelo: $14/3 = 4.7$

Opción 2: 14 módulos con 4 cadenas en paralelo: $14/4 = 3.5$

Opción 3: 14 módulos con 5 cadenas en paralelo: $14/5 = 2.8$

Opción 4: 14 módulos con 6 cadenas en paralelo: $14/6 = 2.3$

Opción 5: 14 módulos con 7 cadenas en paralelo: $14/7 = 2$

Por lo que la única opción es conectar 7 cadenas en paralelo, con dos módulos cada una.

Comprobación

La tensión V_{mp} de cada cadena es:

$$V_{mp} = 37V$$

El regulador opera en un rango de 30-130 V, por lo que es aceptable este valor de tensión.

La tensión V_{oc} es 46V, valor de tensión más alta que puede presentar el campo fotovoltaico. Ya que este valor de tensión se encuentra dentro de la tensión máxima soportada por el regulador, es posible realizar esta conexión.

Por último, la corriente de corto circuito es:

$$I_{sc} = 2 (9.2)$$

$$I_{sc} = 18.4 A$$

Es decir, la corriente de cada cadena es menor a la corriente máxima que soporta el regulador. Por lo tanto, se comprueba que la conexión se puede realizar de esta manera.

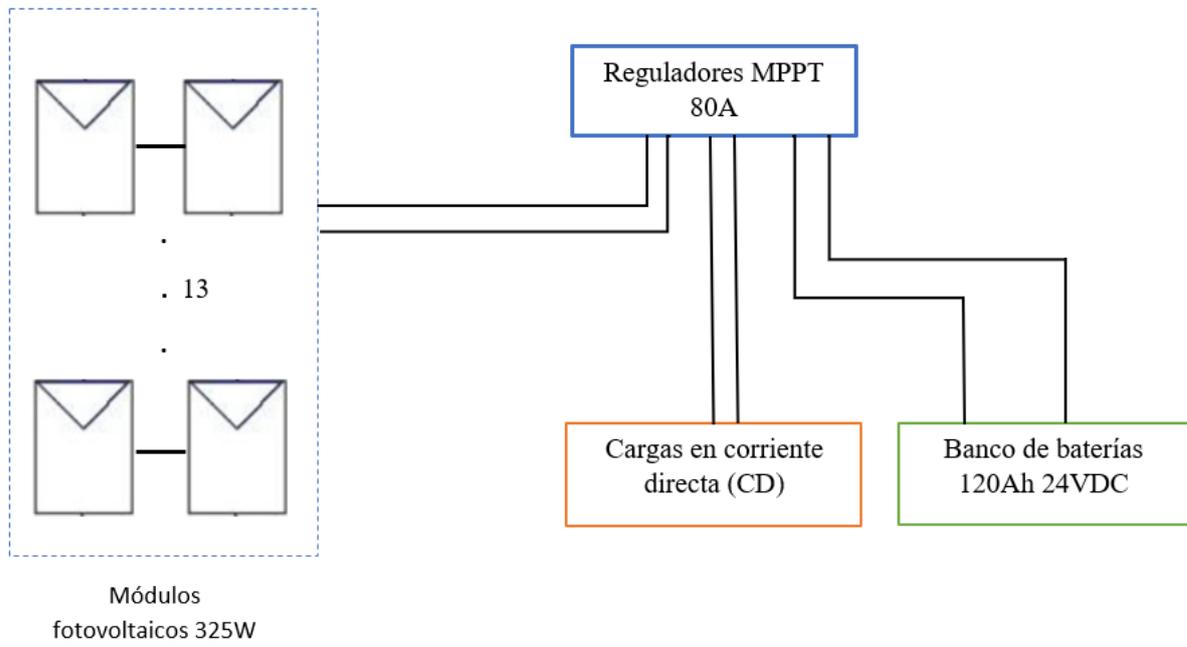


Figura 28. Diagrama de conexión del sistema fotovoltaico

Capítulo 5: Desarrollo de pruebas

Las primeras pruebas que se realizaron en este proyecto estaban relacionadas con la calibración de los sensores, procedimiento el cual se explicará a continuación:

Pruebas de calibración

Sensor de pH SEN0161

Las pruebas de calibración de este sensor fueron realizadas en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (CEQIATEC).

Para realizar la calibración de este sensor, se parte del supuesto de una respuesta lineal. Se procedió a utilizar 3 soluciones facilitadas por CEQIATEC, con valores de pH de 4.01, 7.01 y 10.01.

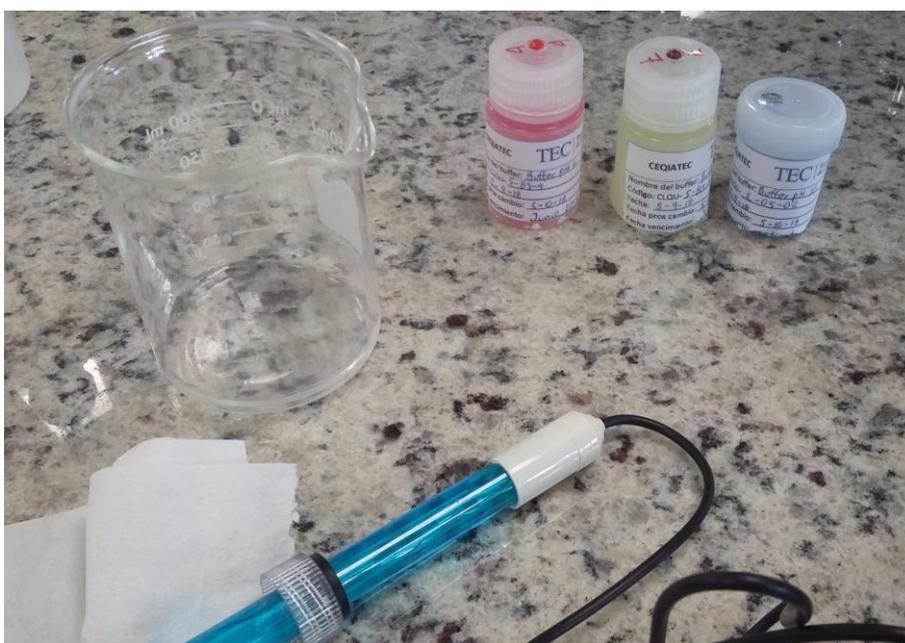


Figura 29. Soluciones con distintos valores de pH.

Tras realizar la conexión tal como se muestra en la figura 17, se sumergió el electrodo en cada una de las soluciones, de tal manera que quedara cubierto por completo, sin tocar las paredes del recipiente. Una vez realizadas las mediciones con cada una de las soluciones, se procedió a limpiar el electrodo con agua destilada para evitar contaminación en las demás mediciones. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 14. Resultados obtenidos a partir de mediciones a soluciones con distintos valores de pH.

Solución	pH	Medición	Tensión (V)	Pendiente m''
1	4.01	1	1.20	3.342
		2	1.21	3.314
2	7.01	1	1.92	3.651
		2	1.92	3.651
3	10.01	1	2.64	3.792
		2	2.64	3.792
Media de pendientes				3.590

Los valores de pendiente “m” mostrados en la tabla 14 fueron calculados a partir de la fórmula 19, con el fin de parametrizar el pH en función de la tensión:

$$m = \frac{pH_{medido} - pH_o}{V_{medido} - V_o} \quad (19)$$

Se calculó la media de las pendientes, la cual tiene un valor de 3.590, valor que corresponde a la pendiente de la recta lineal de calibración. Ahora bien, la intersección de esta recta corresponde al valor del offset del sensor, el cual se obtuvo tras analizar el caso de la solución con un pH de 7.01. Se decidió analizar esta solución, ya que el agua para consumo humano debe tener un pH entre un rango de 6.0-8.0. De esta manera, se obtendrá una mejor precisión en el rango de interés para este proyecto. Por lo tanto, para que la recta de calibración pase por el punto de pH 7.01, el offset tiene un valor de 0.1172. No obstante, es importante mencionar que conforme el pH de la solución se aleja de un valor de 7, la precisión de la medida disminuye (ver figura 30).

En fin, la recta de calibración para el sensor de pH SEN0161es:

$$pH = \text{media pendiente} * \text{tensión medida (V)} + \text{offset} \quad (20)$$

$$pH = 3.59 * \text{tensión medida (V)} + 0.1172$$

Esta recta se puede representar gráficamente, mostrando además los puntos de las soluciones de calibración suministradas por el CEQIATEC, como se aprecia en la siguiente figura:

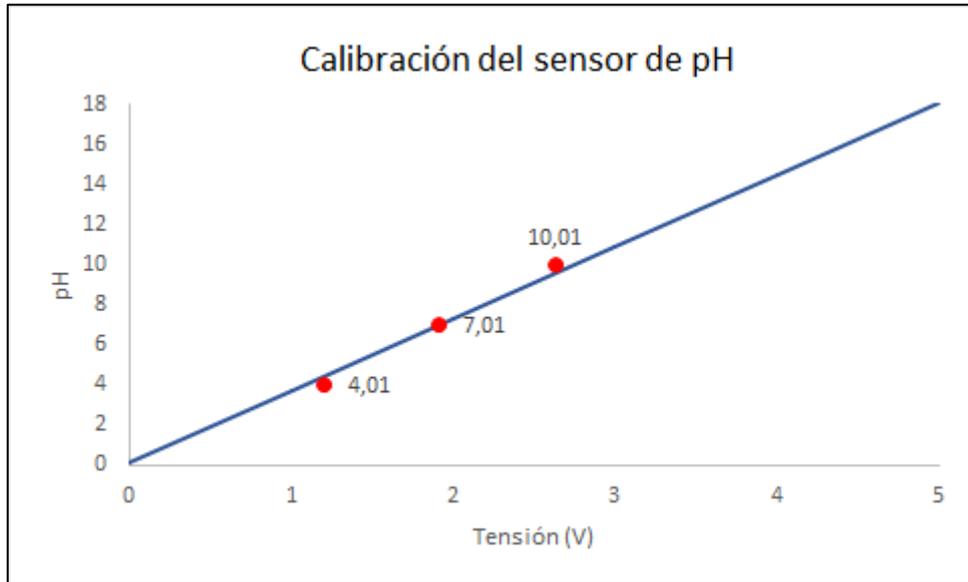


Figura 30. Recta de calibración del sensor de pH SEN0161.

Sensor de turbidez SEN0189

Estas pruebas se realizaron con 3 soluciones con distinta turbidez (0.096, 15.2 y 100 UNT), las cuales fueron facilitadas por el CEQIATEC. Estas soluciones se muestran en la siguiente figura:

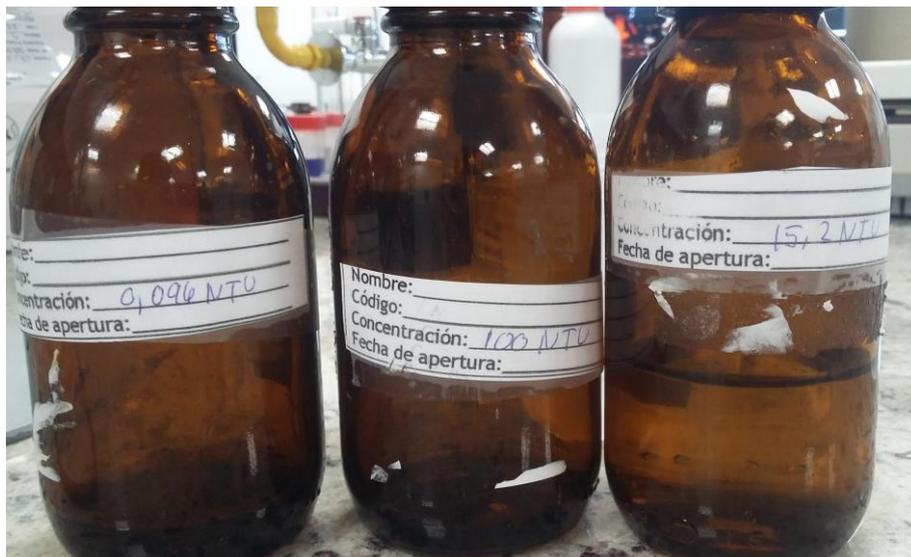


Figura 31. Soluciones con distintos valores de turbidez.

Se realizaron mediciones de tensión a cada una de las soluciones y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados obtenidos a partir de mediciones a soluciones con distintos valores de turbidez.

Solución	UNT teórico	Tensión medida (V)
1	0.096	4.212
2	15.2	4.684
3	100	2.697

Según datos del fabricante, si deja el sensor en el agua pura, este debe emitir $4.1 \pm 0.3V$. Para el caso de este sensor, se obtuvo un valor de 4.21 V. Con este valor, es posible realizar un análisis de los datos mostrados en la tabla 15. En el caso de la solución 1, se obtuvo una diferencia de 2 mV, es decir, una diferencia en la tensión de salida menor a 3 mV, por lo que se comprueba que se trata de agua potable. En el caso de las soluciones 2 y 3, se obtiene una diferencia en la tensión de salida de 474 mV y 1.513 V, respectivamente. En ambos casos se comprueba que el agua no es potable, ya que las diferencias de tensión son mucho mayores a 3 mV.

Sensor de potencial de oxidación-reducción SEN0165

Para calibrar este sensor se carga el código de muestra en el microcontrolador y posteriormente se presiona el botón de calibración. Se abre el monitor serie de Arduino IDE y el valor que se muestra en pantalla, corresponde el valor del offset que se debe incluir en el código de implementación explicado en la sección anterior. En este caso, el sensor de ORP tiene un offset de 29 mV.

Sensor de temperatura DS18B20

Esta como tal no es una prueba de calibración, más bien se trata de una prueba para comprobar el tiempo de respuesta del sensor, especificado por el fabricante, el cual es $\leq 30s$. Estas pruebas fueron realizadas con agua a diferente temperatura, el primer recipiente contenía cubos de hielo y el otro recipiente contenía agua recién hervida.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura:

```
COM6 (Arduino/Genuino Mega or Mega 2560)
Enviar
C 11.19 F 52.14
C 11.19 F 52.14
C 11.13 F 52.03
C 11.13 F 52.03
C 11.06 F 51.91
C 11.06 F 51.91
C 11.06 F 51.91
C 13.75 F 56.75
C 31.69 F 89.04
C 45.81 F 114.46
C 55.13 F 131.23
C 61.38 F 142.48
C 66.00 F 150.80
C 69.56 F 157.21
C 72.31 F 162.16
Autoscroll Sin ajuste de línea 9600 baudio Clear output
```

Figura 32. Cambio abrupto en medición de la temperatura del agua.

El código está desarrollado de tal manera que se realizan mediciones cada 7 segundos, por lo que si se analizan los datos mostrados en la figura anterior, se observa que el sensor detectó el cambio abrupto en la temperatura del agua (11-31 °C) en un lapso aproximado de 2 mediciones, es decir 14 segundos. Ante esto, se comprueba que este sensor de temperatura tiene un buen tiempo de respuesta.

Integración del código

Una vez concluidas las pruebas de calibración, se procedió a unificar los códigos que permiten el funcionamiento de los 5 sensores para la detección de la calidad del agua. Para comprobar que no se obtienen valores erróneos en las lecturas, se realizaron las mediciones utilizando el código general y se compararon los resultados con los obtenidos mediante el código implementado en cada sensor por aparte.

En las siguientes figuras se observan algunas de las pruebas realizadas:

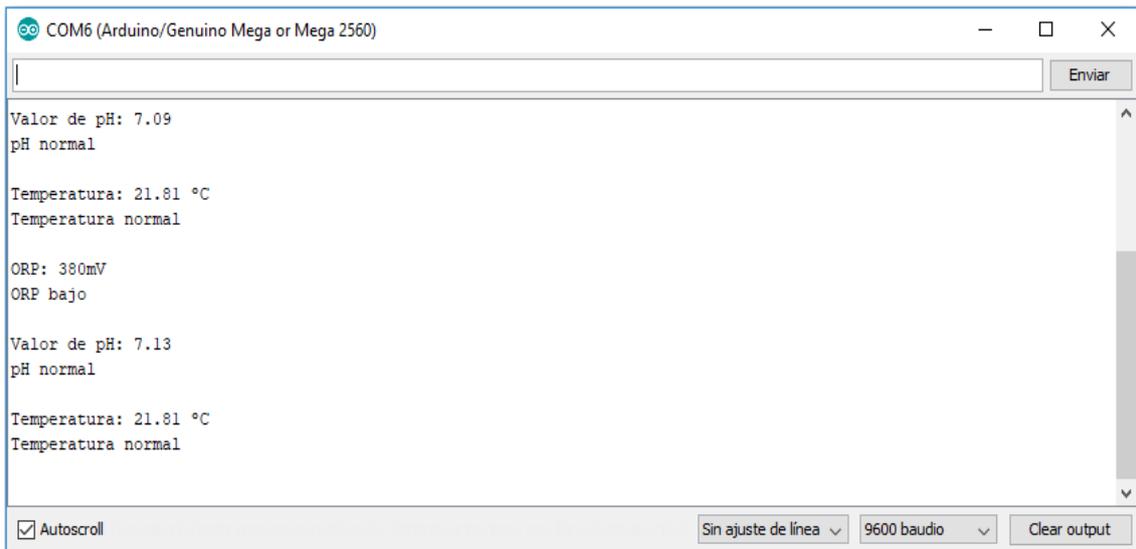


Figura 33. Mediciones simultáneas de ph, temperatura y ORP a agua de grifo.



Figura 34. Mediciones simultáneas de ph, temperatura, conductividad eléctrica, ORP y turbidez en agua de grifo.

Adaptación de sensores a la tubería

Para realizar las pruebas en laboratorio que permitan verificar el correcto funcionamiento del sistema de detección de la calidad del agua, se trabajó con un tanque de almacenamiento con una capacidad de 250 litros, el cual pertenece a la Escuela de Ingeniería Ambiental. La entrada y salida de este tanque es de un diámetro de 1". Considerando el diámetro de la salida, se decidió adaptar los 5 sensores en un tubo con el mismo diámetro, como se muestra a continuación:



Figura 35. Adaptación de sensores a la tubería de la salida del tanque.

Una vez incorporados estos sensores se realizó una reducción en la tubería de 1" a $\frac{3}{4}$ ", ya que el siguiente sensor a incorporar es el de caudal el cual tiene entrada y salida roscada de $\frac{3}{4}$ ". Por último, fue necesario realizar una reducción de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " para adecuar la válvula solenoide. En un inicio, se decidió utilizar una válvula con el mismo diámetro de entrada y salida que el sensor de caudal, sin embargo tras realizar las primeras pruebas, uno de los extremos de la válvula (plástico) quedó incrustado en la tubería provocando la partición de la misma. Debido a lo anterior, se decidió utilizar una válvula solenoide de 12V de bronce.

Pruebas del sistema de comunicación remota

Estas pruebas se realizaron con una tarjeta SIM cuyo número corresponde al 8480-0253. Se realizaron mediciones con agua, en la cual se alteraron algunos de sus parámetros con el fin de comprobar la detección del parámetro fuera del rango permitido, además del envío del mensaje de alerta. En la siguiente figura se comprueba el funcionamiento del sistema de comunicación remota:

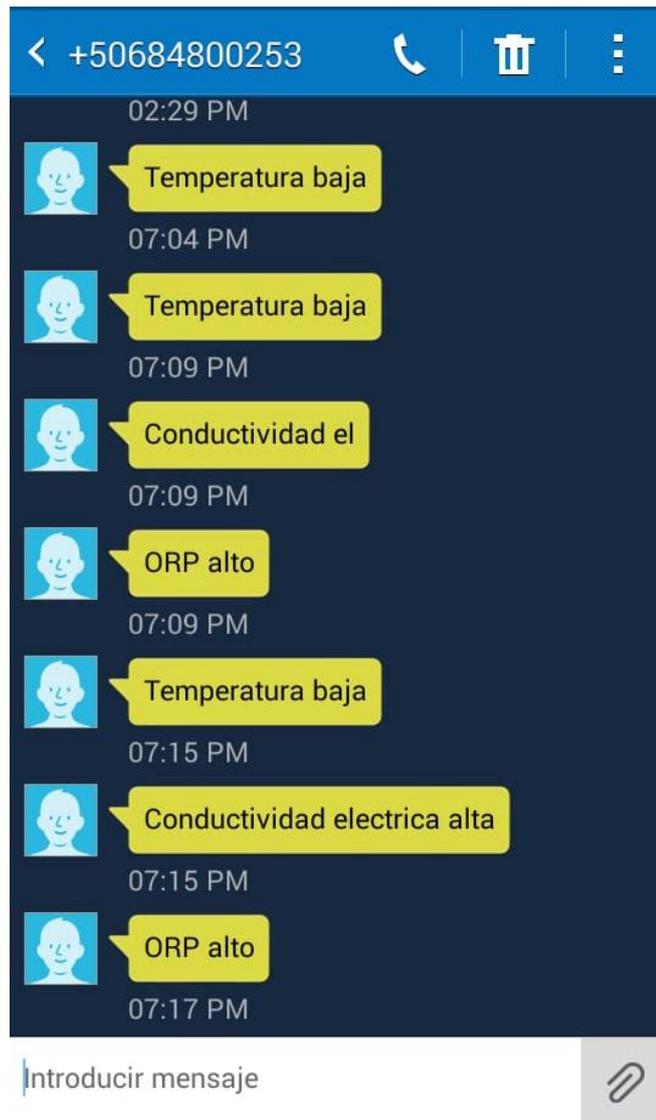


Figura 36. Envío de mensajes de texto con alerta por fallo en indicadores de la calidad del agua

También se realizaron pruebas para comprobar el envío de sms cuando existe peligro de desborde en el tanque de almacenamiento. En el monitor serie del arduino, se percibe el envío de los mensajes de texto de la siguiente manera (ver figura 37):

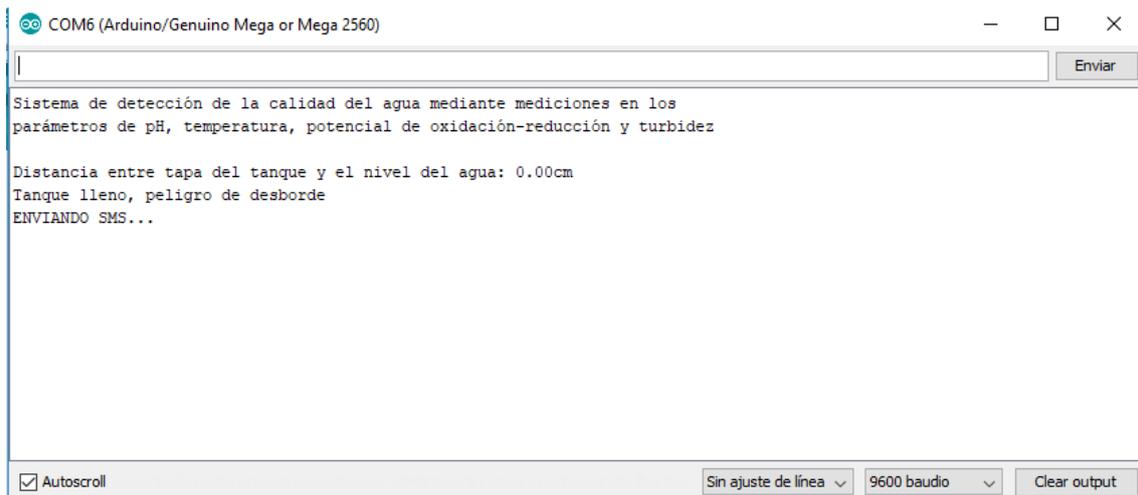


Figura 37. Envío de mensaje de texto ante peligro de desborde del agua en el tanque

Para realizar pruebas que comprueben el envío de mensajes ante un fallo en el suministro eléctrico en la bomba, se utilizó un sensor de corriente (ver figura 38). Este sensor se asignó a un pin del Arduino Mega y este se encarga de realizar la lectura del dato. Cuando el valor del dato obtenido es menor a 32A, se envía un mensaje de texto con la alerta de este fallo:



Figura 38. Sensor de corriente para simular la corriente que circula por la bomba sumergible

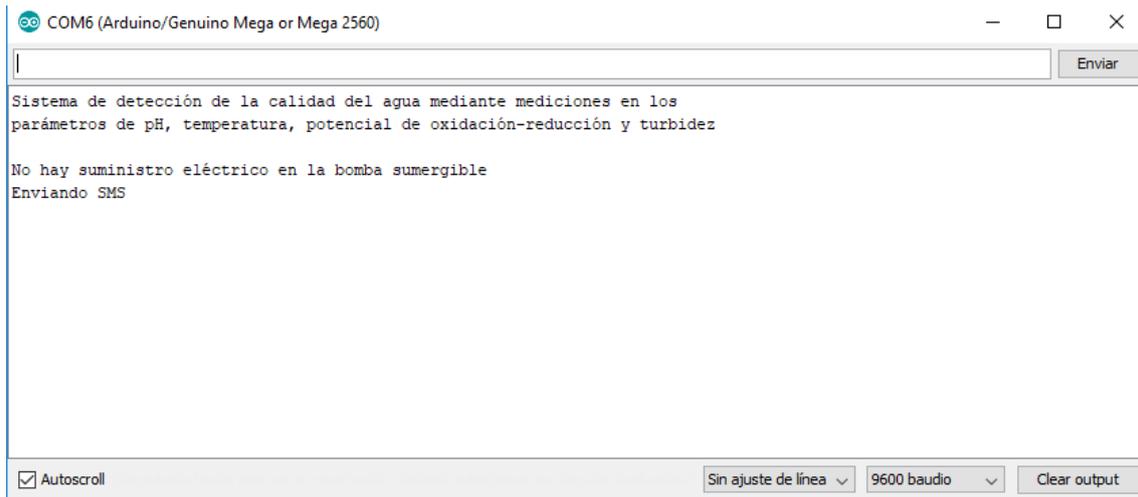


Figura 39. Envío de mensaje de texto con advertencia de fallo en el suministro eléctrico en la bomba sumergible

Capítulo 6: Análisis

Según el Decreto Ejecutivo No 38924-S-MINAE (2015), los entes operadores del servicio de agua potable deben realizar un control operativo a través de mediciones periódicas de parámetros de calidad de agua. Es decir, deben contar con el equipo básico de laboratorio para el monitoreo en cada fuente o en la mezcla de todas las fuentes y en la red de distribución.

Para este proyecto, se definieron como parámetros mínimos la turbidez, pH, conductividad eléctrica y temperatura. Además, a pesar de que no está definido como un parámetro de detección de calidad de agua en Costa Rica, se decidió monitorear el potencial de oxidación-reducción (ORP). Este índice representa la actividad del desinfectante en el agua, dicho en otras palabras, permite que se evalúe la eficacia del tratamiento del agua, sin importar el tipo de oxidante ni la combinación de la fórmula desinfectante u otras condiciones variables del agua que puedan existir, razón por la que se decidió monitorear también este parámetro.

Estos 5 parámetros (temperatura, conductividad eléctrica, pH, ORP y turbidez) son monitoreados mediante sensores, los cuales fueron adecuados a la tubería en la salida del tanque de almacenamiento, de tal manera que se puede realizar la sustitución de estos si es necesario.

Asimismo, se debe tener presente que estos sensores tienen un tiempo de vida útil, por lo que concluido este periodo, se debe realizar su sustitución. En el caso de los sensores de pH y ORP, el fabricante menciona que el electrodo que utiliza estos sensores debe ser reemplazado por uno nuevo, después de aproximadamente un año de uso. En cuanto al sensor de turbidez, este se debe sustituir después de 2 años de uso constante, para evitar errores en las mediciones de la transmitancia de la luz y la tasa de dispersión. En el caso del sensor de conductividad eléctrica, se considera que el enchufe se debe reemplazar cada 6 meses para evitar la corrosión provocada por su contacto permanente con el agua, impidiendo también la afectación en la calidad del agua.

Este sistema de detección de calidad de agua trabaja en conjunto con una válvula solenoide la cual condiciona la salida del agua en el tanque de almacenamiento, ya que interrumpe el flujo de agua hasta que se apliquen 12V a los conectores en el solenoide. Cuando se interrumpe la salida de agua, el solenoide pierde energía repentinamente, provocando voltajes transitorios los cuales pueden dañar otros elementos del circuito, como por el ejemplo el microcontrolador. De ahí la importancia de utilizar un diodo amortiguador en los contactos que elimine dichos voltajes.

Además, el funcionamiento de esta válvula se puede ver afectado si se utiliza un transistor estándar, ya que el consumo de corriente de este solenoide es de 4A, es decir más alto de lo que puede manejar un transistor común. Ante esto, es necesario utilizar un transistor de potencia como


```
Potencial de oxidación-reducción (ORP): 2029mV
ORP alto

Turbidez: 4.79 NTU
Turbidez permitida

Caudal: 3 L/min

Distancia entre tapa del tanque y el nivel del agua: 10.28cm
Tanque lleno, peligro de desborde
Válvula abierta

Valor de pH: 6.78
pH normal

Temperatura: 23.06 °C
Temperatura normal

Conductividad eléctrica: 0.48 µS/cm
Valor recomendado

Potencial de oxidación-reducción (ORP): 232mV
ORP recomendado

Turbidez: 4.79 NTU
Turbidez permitida
```

Figura 41. Mediciones de los parámetros de calidad de agua con válvula abierta.

Comparando las mediciones en ambos casos, se tiene que cuando la válvula está cerrada el pH tiene un valor de 8.04 y la conductividad eléctrica es de 67.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por el contrario, cuando la válvula está abierta, el pH tiene un valor de 6.78 y la conductividad eléctrica es de 0.48 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El cambio brusco en la velocidad de movimiento del agua que está siendo sensada afecta el tiempo de respuesta de los sensores, provocando variaciones en las lecturas mostradas. Para evitar obtener valores erróneos, se deben realizar las mediciones de los parámetros de calidad de agua cuando la válvula está cerrada. De esta manera, no se enviarán mensajes de alerta debido a datos alterados.

Es importante mencionar que este sistema de comunicación remota se encarga de enviar mensajes de texto con información del parámetro que se encuentra fuera de los rangos permitidos en Costa Rica. Sin embargo, es responsabilidad del ente operador del servicio, el tratamiento del agua para regresar el parámetro a los rangos permitidos.

Además, este sistema alerta cuando no existe suministro eléctrico en la bomba. Para representar esta situación, ya que todavía no se contó con la bomba sumergible en la etapa de pruebas, se trabajó con un sensor de corriente. Cuando por este sensor no circule corriente, se informa del fallo por medio de un mensaje de texto. Ahora bien, en una eventual instalación de todo el sistema que abarca este proyecto, si la bomba no cuenta con suministro eléctrico, se advertirá del fallo de la misma manera, ya que el sensor utilizado fue dimensionado de tal manera que represente la corriente que circula por la bomba, la cual es aproximadamente 32A.

Este sistema de bombeo fue dimensionado para el caso crítico de suministro de agua potable en una vivienda en la comunidad de Los Ángeles, en la cual tienen una lechería, por lo que el consumo diario es de aproximadamente 10 000 litros. Si bien este consumo es mucho menor en comparación con el consumo total de la comunidad, esta bomba está en la capacidad para extraer del pozo el agua necesaria para abastecer todas las viviendas. No obstante, sería necesario utilizar un tanque de almacenamiento con mayor capacidad, por ejemplo 5000 litros.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, este sistema de bombeo también cuenta con un sensor de caudal. A pesar de que este sensor no brinda información directa acerca de algún fallo o advertencia, su uso es importante ya que permite determinar los litros por minuto (caudal) que están fluyendo por la tubería de salida del tanque de almacenamiento. De esta manera se puede, estimar el consumo que se está teniendo en las viviendas, y además, qué tan rápido el tanque estará vacío.

Para realizar las pruebas que comprobaran el funcionamiento del sistema de detección de calidad de agua, se incorporó en la tubería de salida un sensor de caudal que detecta como máximo 30 L/min. No obstante, en la futura instalación del sistema general que abarca este proyecto, será necesario utilizar un sensor que detecte un mayor caudal, por ejemplo 85 L/min, ya que este es el máximo caudal que va brindar la bomba a una profundidad de 30 m. Este tipo de sensores no están disponibles en el mercado costarricense, por lo que se debe realizar la importación del mismo.

Como ya se ha mencionado, el sistema de detección de la calidad del agua y el sistema de comunicación remota, serán alimentados con energía solar fotovoltaica. Ante esto, fue necesario realizar el diseño del sistema que brinde la alimentación de todas las cargas que estos subsistemas requieren. Además de evaluar los consumos, se debió estimar el recurso solar disponible en la zona, para realizar un balance de energía que permitiera determinar la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios (14). Con estos cálculos, fue posible dimensionar la batería que permite que el sistema sea aislado de la red eléctrica. El dimensionamiento de esta batería varía de acuerdo a los días de autonomía que se desean en el sistema, en este caso se trata de 1 día. Conforme se deseen mayores días de autonomía, el precio de esta batería aumenta

considerablemente. Debido a lo anterior, se estimó que en este proyecto un día de autonomía es suficiente.

Si bien es cierto, en este proyecto no se realizó la instalación del sistema fotovoltaico, el diseño se realizó de tal manera que se consideraron todas las posibles pérdidas presentes en el sistema, desde las pérdidas en el regulador hasta las pérdidas por caída de tensión y por autodescarga diaria de la batería, además de la profundidad máxima de descarga. Tomando en consideración todas estas variables, sería posible realizar en un futuro la instalación del sistema fotovoltaico diseñado en este proyecto y poner en funcionamiento los subsistemas, con plena seguridad de que tendrán la energía necesaria para alimentar las cargas involucradas.

Conclusiones

- Una variación mayor a 3 mV en la tensión de salida del sensor de turbidez equivale a un cambio de 5 UNT en el agua, por lo que esta pierde su calidad como potable.
- Mediante pruebas de calibración se obtuvo que una constante de ampliación de 0.45 permite realizar pruebas de conductividad eléctrica en el agua con una exactitud de ± 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Una razón de conversión de 3.59 en la tensión medida en el sensor de pH, implica una varianza de 1.67% en el valor de pH, razón por la cual se consideró un offset de 0.1172 en el sensor.
- Para transmitir los datos del Arduino Mega al módulo SIM900 es fundamental conectar el transmisor en el pin 2 y el receptor en el pin 3, en el multiplexor UART de la SIM900.
- El uso de un sensor de corriente de 100A : 50mA permite simular la corriente necesaria en la bomba sumergible y advertir fallos en el suministro eléctrico que no permiten el correcto funcionamiento de esta.
- Para solventar la demanda eléctrica total del proyecto son necesarios 14 módulos fotovoltaicos de 325W cada uno y 5 baterías de 120Ah, las cuales le dan una autonomía al sistema de un día.
- Se verificó que el sistema de comunicación remota envía mensajes de alerta cuando alguno o varios de los parámetros de calidad de agua se encuentran fuera de los rangos permitidos en Costa Rica.

Recomendaciones

- Durante las pruebas de calibración de los sensores, se recomienda utilizar una mayor cantidad de soluciones de calibración o considerar las no linealidades que pueden existir en el funcionamiento de estos componentes electrónicos. Con esto, es posible mejorar la precisión en las mediciones realizadas con el sistema de detección de calidad del agua.
- Para realizar las mediciones de los parámetros de calidad de agua, la válvula debe estar cerrada. Caso contrario, es posible obtener valores alterados debido a la velocidad con la que circula el agua por la tubería de salida y la consecuente afectación en el tiempo de respuesta de los sensores.
- El estado del sensor de conductividad eléctrica diseñado e implementado en este proyecto puede llegar a deteriorarse por oxidación y contaminar el agua, ya que a diferencia de otros sensores, este no tiene una sonda para el agua, sino que se trata de los electrodos de un enchufe. Por lo tanto, se propone utilizar un encapsulado resistente al agua y conductor para cubrir los bornes de la sonda u otra opción es emplear un sensor con mayor durabilidad en el agua.
- Se recomienda el uso de una válvula solenoide que no necesite una presión mínima para permitir el flujo de agua. Lo anterior para evitar interrupciones en el flujo del líquido, a pesar de que se aplique la tensión en sus conectores.
- Los materiales con los que están fabricados los sensores y la válvula deben ser de buena calidad, ya que estos componentes están en contacto directo y constante con el agua, lo cual puede llegar a procesos de oxidación que afectan las mediciones realizadas.
- En este proyecto se utilizó una placa de inserción para la conexión de los sensores, resistencias y demás componentes. No obstante, se sugiere utilizar un circuito impreso (PCB) para evitar conexiones erróneas y ganar fiabilidad.
- Para determinar de manera correcta el caudal que suministra la bomba sumergible, es indispensable considerar la profundidad del pozo y la potencia que está consumiendo la bomba.
- La estructura donde se coloca el tanque de almacenamiento debe ser diseñada de tal manera que permita el acceso al tanque para realizar labores de mantenimiento y limpieza.
- Debido a la eventual instalación en campo de todos los sistemas que abarca este proyecto, se recomienda considerar otros posibles consumos en el diseño del sistema fotovoltaico, debido a la incorporación de otros subsistemas que permitan mejorar este proyecto.

Referencias bibliográficas

- [1] Arias, A. (2010) *Décimo sexto informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Informe Final Situación de Potabilización y Saneamiento en Costa Rica*. (Informe final). San José, 2010. 36 p.
- [2] Aznar, A. (2001). *Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas*. Madrid: Universidad Carlos III.
- [3] Ballesteros, M. (2008). *Agua potable y saneamiento con enfoque de GIRH en Costa Rica: situación y sistematización de algunas experiencias*. Global Water Partnership.
- [4] CEPAL. (2005). *Administración del agua en América Latina: situación actual y perspectivas*. 76 p. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6286/S053163.pdf?sequence=1>
- [5] Chán, M. (2012). *Métodos de almacenamiento del agua*. [En línea]. Recuperado el 27 de octubre del 2018 de <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/10/Chan-M-M%C3%A9todos-de-almacenamiento-de-agua-versi%C3%B3n-final.pdf>
- [6] Comisión Nacional del Agua de México. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. [En línea]. Recuperado el 24 de octubre del 2018 de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/13DisenoConstruccionyOperacionDeTanquesDeRegulacion.pdf>
- [7] El Eléctrico <osibaja@electrico.com>. “Hoja de datos de bomba 4SP2-16”. [Correo electrónico]. 25 de septiembre del 2018.
- [8] Hybrid Turkeys. (2016). *Potencial de reducción de oxidación (ORP): una herramienta nueva para monitorear el agua*. [En línea]. Recuperado el 29 de junio del 2018 de <http://www.resources.hybridturkeys.com/system/resources/W1siZiIsIjIwMTYvMTEvMjUvMTNfMzJfMzhfNDI2X0luZm9zaGVldF9PU1BfU1BOX05vdjIwMTYucGRmIl1d/Infosheet%20ORP%20SPN%20Nov2016.pdf>
- [9] Instituto Tecnológico de Canarias. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Primera edición. [En línea]. Recuperado el 19 de octubre del 2018 de <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
- [10] Laboratorio de Calidad Ambiental. (2009). *Procedimiento de muestreo de agua superficial*. Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo. [En línea]. Recuperado el 29 de setiembre del 2018 de

https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/PROC_EDIMIENTO_DE_MUESTREO_DE_AGUA_SUPERFICIAL.pdf

[11] Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). (2010). *Acceso a agua para consumo humano y saneamiento: Evolución en el periodo 1990-2010 en Costa Rica*. 28 p. [En línea]. Recuperado el 25 de octubre de <https://www.aya.go.cr/centroDocumentacion/catalogoGeneral/Acceso%20a%20agua%20para%20consumo%20humano%20y%20saneamiento%20evoluci%C3%B3n%20en%20el%20per%C3%ADodo%201990%20-%202010%20en%20Costa%20Rica.pdf>

[12] Lambrou, T, Anastasiou, C. et al (2014). *A Low-Cost Sensor Network for Real-Time Monitoring and Contamination Detection in Drinking Water Distribution Systems*. [En línea]. Recuperado el 6 de junio del 2018 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6786370>

[13] Marcó, L. Azario, R. et al. (2004). *La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)*. [En línea]. Recuperado el 23 de setiembre del 2018 de [http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82(2004).pdf)

[14] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). *Índice de Desarrollo Social (IDS) 2013*. [En línea]. Recuperado el 15 de mayo del 2018 de <https://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/ab677d6c-fafd-4128-86df-a6aa04ab70ef/IDS%202013%20resumen.pdf?guest=true>

[15] Orellana, G. (2017). *Monitorización de calidad de aguas y control de procesos mediante sensores químicos de fibra óptica*. Universidad Complutense de Madrid, España. [En línea]. Recuperado el 25 de setiembre del 2018 de https://www.researchgate.net/publication/316318743_MONITORIZACION_DE_CALIDAD_DE_AGUAS_Y_CONTROL_DE_PROCESOS_MEDIANTE_SENSORES_QUIMICOS_DE_FIBRA_OPTICA

[16] Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías para la calidad del agua potable* [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición. Recuperado el 29 de julio del 2018 de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf

- [17] Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable*. Lima, Perú. Recuperado el 15 de octubre del 2018 de <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/agua/161esp-diseno-estbombeo.pdf>
- [18] Organización Panamericana de la Salud, Ministerio de Salud. *Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. San José, C.R. : OPS, 2003. 40 p
- [19] Pavón R. V. M. (2001). *Diseño y construcción de estructuras de concreto para contener líquidos*. México. Fundación ICA AC, Universidad Autónoma del Estado de México, se, 225 p.
- [20] Pérez, E. (2016). *Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica*. Tecnología en Marcha. Vol. 29, N° 3. Pág 3-14. DOI: 10.18845/tm.v29i3.2884
- [21] Pino, M. Zúñiga, M. (2017a). *Factibilidad del recurso hídrico para abastecer de agua potable a través de un acueducto comunal para la comunidad de Los Ángeles; Distrito La Cureña; Cantón de Sarapiquí*. Cartago: Proyectos Universitarios Regionales PUR y de Extensión Universitaria, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 50 p
- [22] Pino, M. Zúñiga, M. (2017b). *Mejora de las condiciones de los sistemas de abasto de agua, para consumo humano y para atender actividades productivas en las comunidades indígenas del distrito Telire y Bratsi, Cantón de Talamanca y comunidades del distrito La Cureña, Cantón Sarapiquí*. Cartago: Proyectos Universitarios Regionales PUR y de Extensión Universitaria, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 46 p
- [23] Presidencia de la República de Costa Rica. (12 de enero del 2015). *Decreto No 38924-S. Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. San José, Costa Rica. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- [24] Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (2017). *Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales*. [En línea]. Recuperado el 30 de agosto del 2018 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd57/riesgo.pdf>
- [25] Rodríguez, J. (2015). *Manual de muestreo de aguas*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- [26] Sala, G. (Ed). (2002). *Energía Solar fotovoltaica*. Madrid, España: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. 123 p. Recuperado el 31 de octubre de 2018, de https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/energia_solar_fotovoltaica.pdf

Anexos

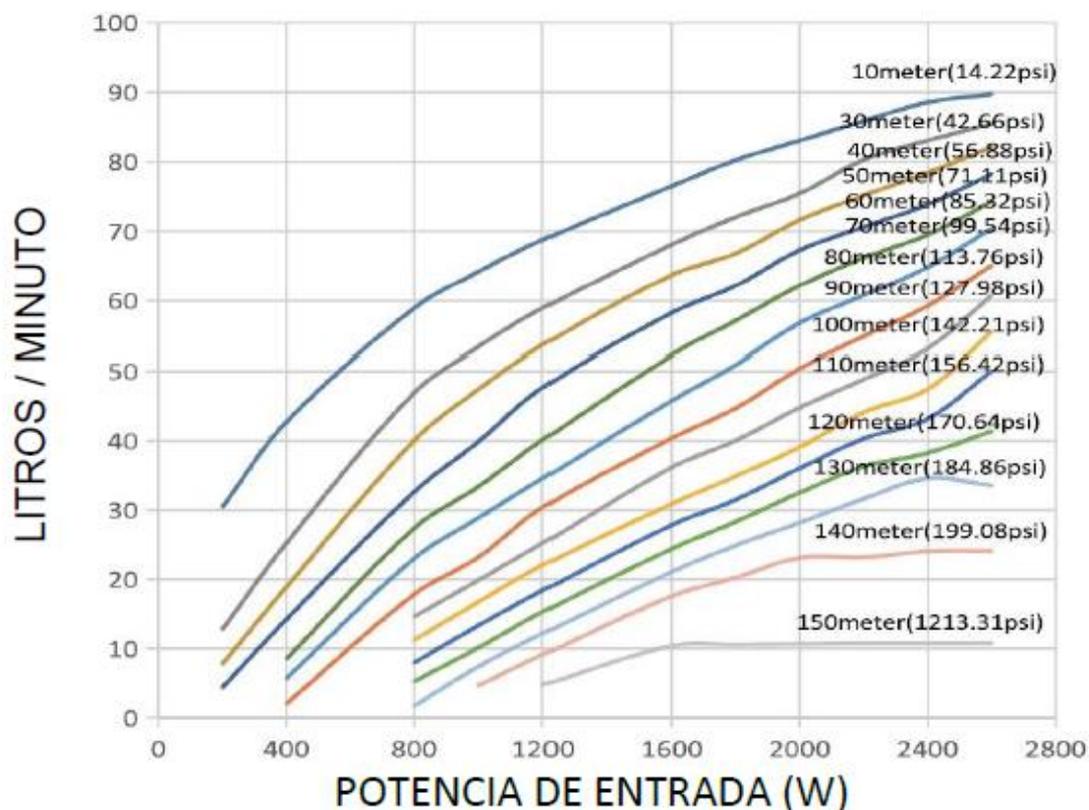
Anexo A. Características técnicas de la bomba 4SP2-16

Anexo A.1 Caudal suministrado por la bomba 4SP2-16 de acuerdo con su potencia de entrada y la profundidad del pozo

	Potencia de entrada (W)										
	200	400	800	1000	1200	1600	1800	2000	2200	2400	2600
Prof (m)	Caudal (L/min)										
10	30	43	59	64	69	77	80	83	86	89	90
30	13	25	47	53	59	68	72	75	80	83	85
40	8	19	40	47	54	64	67	72	75	78	82
50	4	14	33	40	48	58	62	67	71	74	78
60		9	27	33	40	52	57	62	66	70	74
70		6	23	29	35	46	51	57	61	65	70
80		2	18	23	30	40	45	50	55	59	65
90			15	20	25	36	40	45	49	53	61
100			11	17	22	31	35	39	44	47	56
110			8	13	18	28	32	36	40	43	50
120			5	10	15	24	28	33	36	38	41
130			2	7	12	21	25	28	32	35	35
140				5	9	18	20	23	23	24	24
150					5	10	11	11	11	11	11

Fuente: tomado de El Eléctrico, 2018

Anexo A.2 Potencia de entrada (W) necesaria en la bomba 4SP2-16 vs litros/minuto suministrados



Fuente: tomado de El Eléctrico, 2018

Anexo B. Tabla de coeficientes de corrección por inclinación (k).

Inclinación	Coeficiente de corrección por inclinación k											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5°	1,03	1,02	1,01	0,99	0,98	0,98	0,98	0,99	1,01	1,03	1,04	1,04
10°	1,05	1,04	1,01	0,98	0,95	0,94	0,95	0,98	1,01	1,04	1,06	1,07
15°	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,91	0,92	0,96	1,01	1,05	1,09	1,09
20°	1,08	1,04	0,99	0,94	0,88	0,86	0,88	0,93	0,99	1,06	1,1	1,1
25°	1,09	1,04	0,97	0,9	0,84	0,81	0,83	0,89	0,98	1,06	1,11	1,11
30°	1,08	1,03	0,95	0,87	0,79	0,76	0,78	0,85	0,95	1,05	1,11	1,12
35°	1,08	1,01	0,92	0,82	0,73	0,70	0,73	0,81	0,92	1,03	1,10	1,11
40°	1,06	0,99	0,88	0,77	0,67	0,63	0,66	0,76	0,88	1,00	1,09	1,10