



Diseño e implementación de un sistema de bombeo para extracción de sal basado en energía fotovoltaica

Design and implementation of a pumping system for salt extraction based on photovoltaic energy

Erik Eduardo Vázquez Fernández¹ , Ramón Antonio Félix Cuadras¹ , Jorge Armando Ojeda Sánchez² , Alejandro Regalado Escobedo¹ , Arturo Rincón Pulido¹ 

¹Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Colima, Km. 9 Ctra. Colima-Coquimatlán, Coquimatlán 28400, Colima, México.

²Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Km. 9 Ctra. Colima-Coquimatlán, Coquimatlán 28400, Colima, México.

Autor de correspondencia: Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Coquimatlán, Colima, México. E-mail: jojeda1@ucol.mx. ORCID: 0000-0002-5026-5459.

Recibido: 02 de Diciembre del 2020

Aceptado: 20 de Enero del 2021

Publicado: 25 de Enero del 2021

Resumen. - *La producción de sal marina en México utiliza sistemas tradicionales para el llenado, tratamiento de la salmuera y almacenamiento. El acceso a la red de distribución eléctrica generalmente no está disponible debido a la salinidad del suelo. En la Laguna de Cuyutlán en el suroeste del estado de Colima, México, el proceso de producción exige que el bombeo de agua de mar se realice mediante equipos electrógenos para su uso en motobombas en horarios específicos de la madrugada, debido a la alta exposición solar. En el presente trabajo, se desarrolla un sistema fotovoltaico aislado con respaldo de baterías aplicado a los sistemas de bombeo, controlado semiautomáticamente mediante el uso de la tarjeta Arduino. El objetivo es mejorar la infraestructura industrial y aumentar la eficiencia de los procesos tradicionales de producción de sal. A partir de la implementación de un sistema fotovoltaico aislado (SFVA), se mejora el proceso de bombeo de agua de mar de manera semiautomática, en comparación con el proceso tradicional, evitando el gasto de combustible en equipos electrógenos.*

Palabras clave: Producción de sal, Control, Sistema de bombeo, Sistema fotovoltaico.

Abstract. Sea salt production in Mexico uses traditional systems for filling, brine treatment and storage. Access to the electrical distribution network is generally not available due to the salinity of the soil. In the Laguna de Cuyutlán in the southwest of the state of Colima, Mexico, the production process requires that the pumping of seawater be carried out by means of generator equipment for use in motor pumps at specific hours of the morning, due to the high solar radiation exposure. In the present work, an isolated photovoltaic system with battery backup applied to the pumping systems is developed, controlled semi-automatically by using the Arduino board. The goal is to improve industrial infrastructure and increase the efficiency of traditional salt production processes. From the implementation of an isolated photovoltaic system (IPVS), the process of pumping seawater is improved in a semi-automatic way, compared to the traditional process, avoiding the expense of fuel in generator equipment.

Keywords: Salt production, Control, Seawater pumping system, Photovoltaic system.



1. Introducción

El mercado internacional de producción de sal, se encuentra dominado por China con 58 millones de toneladas, seguido de Estados Unidos con 48 millones de toneladas, produciendo conjuntamente el 39.8% de la producción mundial anual, en la que México contribuye con 8.9 millones de toneladas anuales, según datos reportados al 2016 por la Secretaría de Economía del Gobierno de México [1]. En México, el principal productor se encuentra en Guerrero Negro, Baja California Sur, quien produce el 82% de la sal para exportación y restando un 18% para el mercado interno. Se concentra el 94% de esta producción en los estados de Veracruz (63.5%), Nuevo León (17%) y Sonora (13.5%) siendo un 6% producido en el resto del país.

En el estado de Colima, México, la principal zona de extracción de sal se encuentra ubicada entre los municipios costeros de Manzanillo y Armería. La producción de sal a partir del proceso de evaporación solar prevalece en la actualidad de manera artesanal en la región suroeste de Colima, México. Los productores de sal se localizan principalmente en Cuyutlán, este último ubicado en el municipio de Armería, Colima, México. La producción de salmuera se genera mediante el llenado de estanques denominados *eras*, donde, a partir de la evaporación del agua de mar se obtiene la sal y minerales asociados como el sulfato de calcio, cloruro de calcio, entre otros. La producción de sal es una actividad industrial importante en la región, realizada principalmente por la Sociedad Cooperativa de Salineros de Colima S.C.L., el área del municipio de Armería es de 4283 hectáreas de las que las salineras de Cuyutlán presentan una superficie de 3360 hectáreas

dedicadas a la extracción de sal [1]. El periodo de producción es limitado a seis meses aproximadamente, dos meses de preparación y cuatro de recolección comprendidos entre marzo y junio, debido al inicio de la temporada de lluvias que, por la situación geográfica de la Laguna de Cuyutlán, es clasificada como zona de riesgo, debido a la presencia de fenómenos meteorológicos, como huracanes y fuertes tormentas [2].

La zona geográfica donde se encuentran los campos de producción de sal no cuenta con un suministro de energía de la red eléctrica, debido a la salinidad del suelo. El proceso de producción exige el llenado de estanques de evaporación (*eras*), que se realiza por medio del uso de motobombas con equipo electrógeno a base de gasolina. Este proceso limita la producción ya que el llenado es manual y es realizado horas antes del amanecer, para evitar la exposición a la radiación solar, de igual manera, representa un alto costo en el consumo de combustible, además de la contaminación generada por los residuos de la combustión y aceites empleados en el proceso. Ante esta condición, no es posible mantener una producción sostenida para atender la demanda comercial de sal [3]. En contra parte, debido a las condiciones geográficas, se presenta una alta incidencia de irradiación global horizontal de aproximadamente 5.4 kWh/m^2 [4] durante el periodo de zafra o extracción de sal, comprendido entre los meses de marzo a junio, condición que permite utilizar dicho recurso para producción de energía eléctrica mediante tecnología fotovoltaica. La aplicación de tecnología fotovoltaica en la producción de sal solar, es incipiente, se reporta principalmente métodos para



mejorar la eficiencia de producción por métodos tradicionales, donde el llenado de los estanques es principalmente por gravedad [5], desalinización de agua y producción de sal [6]. El uso de sistemas fotovoltaicos es una alternativa en áreas remotas donde el recurso solar es abundante, para aplicaciones como la alimentación de sistemas de bombeo en procesos de ósmosis inversa para la desalinización de agua [7].

La caracterización de un sistema de energía solar paralelo de campo de sal en Corea del Sur es reportada por Bongsuck, K, et. al [8], donde se combina el proceso de producción de sal con la generación de energía eléctrica en un mismo sitio. Los paneles fotovoltaicos conforman la base del estanque, con una altura de agua salinizada de 20 cm. El agua de mar contenida tiene un efecto de enfriamiento en el panel fotovoltaico, mejorando el desempeño global del arreglo de paneles. Por otro lado, en el proceso de producción de energía eléctrica, se genera calor por lo que incrementa el proceso de evaporación del agua de mar. El desempeño de dicho arreglo es similar a las plantas convencionales de producción de energía eléctrica.

Los sistemas de bombeo son susceptibles de control a partir de tecnología fotovoltaica mediante diferentes técnicas de dimensionamiento [9], por lo que su aplicación en el proceso de extracción de sal del agua de mar permite mejorar el desempeño de una de las etapas de producción de sal.

En el presente trabajo se describe el proceso de extracción de sal empleado por los salineros de Cuyutlán y el uso de equipos electrógenos para la distribución de la

salmuera, así como los inconvenientes y restricciones que se presentan al utilizar estos equipos, ante esta problemática, a solicitud del Socio número 143 de la Sociedad Cooperativa de Salineros de Colima S.C.L., se desarrolló un prototipo que permite facilitar el proceso de extracción artesanal de sal por evaporación sin afectar el proceso artesanal, aprovechando de una mejor manera los recursos materiales y humanos.

2. Proceso de extracción de sal

La metodología que se empleó para el desarrollo de este trabajo está basada en el análisis del proceso de extracción artesanal de sal por evaporación utilizado en la Laguna de Cuyutlán, Colima, México; siendo el objetivo principal el incidir en la mejora del proceso sin alterar las condiciones de recolección de la sal.

Para definir la metodología del trabajo, es necesario comprender el proceso de producción de la sal a partir de la evaporación del agua de mar, también denominado *sal solar*. Este proceso se inicia con la captación de agua de mar mediante bombeo hacia estanques de almacenamiento abiertos a la atmósfera, donde el agua de mar pasa por dos etapas básicas: *concentración*: exposición a la radiación solar que provoca la evaporación del exceso de agua, obteniendo una solución de salmuera saturada rica en cloruro de sodio. La siguiente etapa, *crystalización*: la salmuera saturada generada se conduce a un estanque donde se presenta la cristalización del cloruro de sodio. La sal producida en esta área se somete a un proceso de eliminación de impurezas por medio de lavado, se clasifica y apila por tamaños y calidades, para su envasado y



comercialización. En la Figura 1, se puede apreciar un esquema del proceso de producción de sal.

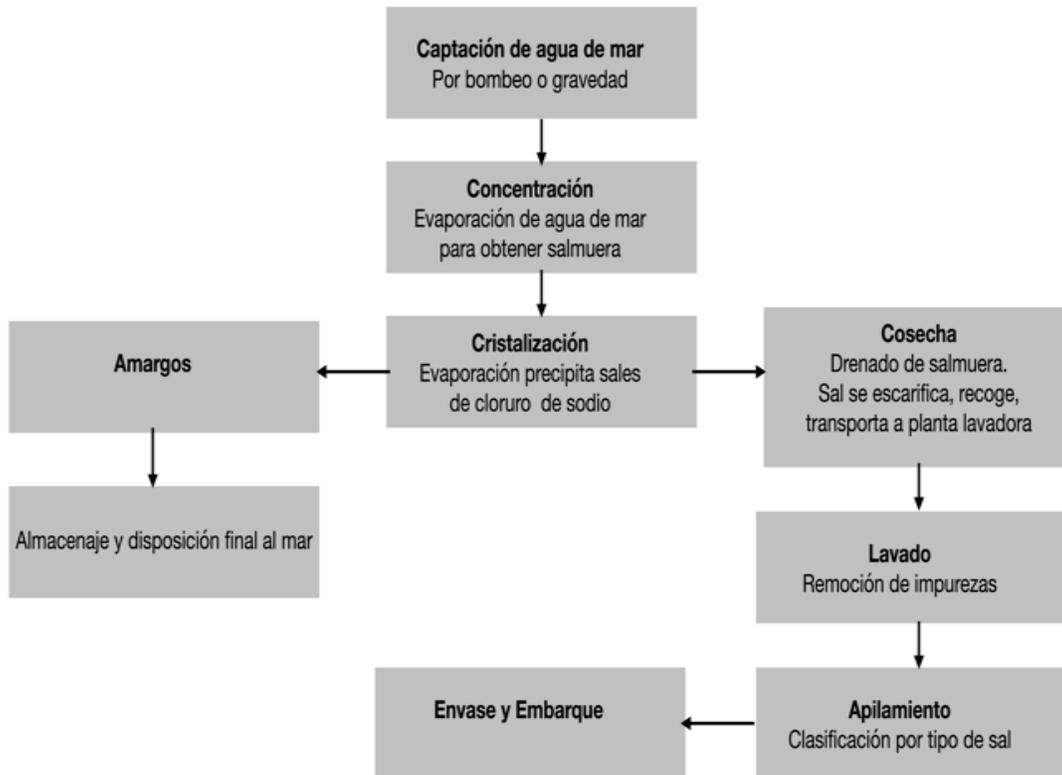


Figura 1. Método de evaporación solar empleado en México.

Con el objetivo de identificar los elementos necesarios para el diseño del sistema fotovoltaico, es necesario describir el proceso artesanal de extracción de sal empleado en la Laguna de Cuytlán, Colima, México. El proceso de producción es el siguiente:

1. *Elaboración de los estanques de almacenamiento.* En este punto normalmente se realizan entre 8 a 10 estanques de 50 x 7.6 x 0.13 m y de separación 0.15 m. Los estanques están conectados entre sí a través de una franja o canal para facilitar el llenado.

2. *Elaboración de pozos para la salmuera.* El pozo, o tajito, tiene un diámetro de 40 cm y una profundidad de 2 a 3 m. La elaboración del pozo se realiza a un costado del primer estanque donde da inicio el llenado de los demás.

3. *Extracción de agua hacia los estanques de almacenamiento.* Una vez hecho el tajito se extrae el agua por medio de una motobomba. En esta parte del llenado del estanque es donde las diferentes sales se dividen del cloruro de sodio.

4. *Elaboración de eras.* En este paso se raspa la arena y se arrastra para formar bordes que delimitan la era de 7.6 x 9 m x



3.5 cm. Esta *era* será llenada una vez que haya pasado la primera etapa de concentración, el número de *eras* es generalmente de 64 por campo.

5. *Llenado de eras.* Teniendo las *eras*, se miden los grados de salinidad que se tienen en los estanques de almacenamiento y una vez que se llega a los 20 grados, se utiliza una motobomba para descargar el agua almacenada de los estanques a las *eras*.

6. *Tiempo de cristalización de la salmuera.* Para tener un proceso de cristalización, es necesario dejar dos días completos para que el agua de las *eras* se evapore para que de esta manera se empiece a decantar la sal en el fondo de las *eras*.

7. *Recolección de la sal.* En este proceso se cepilla todo el cloruro de sodio ya formado en grano con 98 grados de salinidad y se almacena en un costado de la *era*. Como segundo paso de este proceso se traslada por carretilla para su almacenamiento e inventario.

Una vez analizado el proceso de extracción de sal empleado en Cuyutlán, Colima, México, se detectaron áreas de oportunidad en los puntos 3 y 5, en las cuales la extracción y distribución mediante motobombas de la salmuera son susceptibles de mejora sin afectar el proceso artesanal de producción. Por ello se propone realizar las siguientes etapas para la obtención de un prototipo funcional:

1. Diseño e implementación de un sistema hidráulico, este sistema sustituirá la manguera como medio de distribución de la salmuera entre los estanques de concentración y las *eras*, a través de un sistema de bombeo y válvulas controladas, el cual permitirá controlar el flujo de llenado y, por ende, dependiendo de las condiciones climatológicas, de recolección de la sal por parte del usuario, minimizando las pérdidas

en la distribución y disminuyendo los tiempos de llenado.

2. Diseño, pruebas e implementación de un dispositivo de control semiautomatizado, el cual servirá de interface entre el usuario y el sistema de bombeo, a su vez permitirá ejecutar diversas rutinas programadas cuyo fin es el realizar el llenado de las *eras* y distribución de salmuera entre estanques de manera controlada con lo cual el usuario dispondrá de mayor tiempo para realizar otras actividades, esto porque se puede programar el llenado de los estanques y éste se realizará sin necesidad de que se encuentre presente.

3. Diseñar e implementar un SFVA con respaldo de baterías, el cual sustituirá los equipos electrógenos que se emplean actualmente, eliminando el costo y el uso de combustibles y sus residuos de aceite por la combustión, este sistema suministrará de la energía que requiera el prototipo de bombeo y distribución de salmuera. El SFVA deberá contar con una autonomía de al menos 2 días para poder operar en caso de baja radiación producida por nubosidad, sin embargo, es importante mencionar que los meses de marzo a junio son los de mayor radiación solar, por lo que el recurso solar está garantizado en cada periodo de zafra.

4. Pruebas del prototipo en condiciones controladas y en campo, en estas pruebas se determinó la funcionalidad del prototipo y se evaluó de manera preliminar el impacto en la producción de sal, siendo los resultados obtenidos satisfactorios. Finalmente, se determinaron los trabajos futuros para enriquecer el prototipo y realizar una prueba piloto en un sistema completo.

A continuación, se describirán cada una de las etapas con base en sus requerimientos de diseño.



3. Diseño de solución mediante un sistema fotovoltaico

Una vez detectadas las áreas de oportunidad en las etapas 3 y 5 descritas en la sección anterior, se propone sustituir el equipo electrógeno por un sistema fotovoltaico aislado con respaldo de energía, eliminando la contaminación producida por efecto de combustión. La generación de energía eléctrica del sistema fotovoltaico se almacena en un banco de baterías de ciclo profundo, que podrá ser utilizada para la operación del prototipo de distribución de salmuera y el sistema de iluminación. Consecuentemente se reducirán tanto el costo asociado al combustible como a la sustitución de los equipos cada tres años, esto debido a que los módulos fotovoltaicos operarán durante 25 años al 80% de su eficiencia y las baterías de ciclo profundo tendrán una vida útil mayor debido a que serán empleadas únicamente de cuatro a cinco meses durante el año, manteniéndose en régimen de carga solo una vez al mes para que se conserven en óptimo estado. El sistema de distribución de la salmuera a base de una manguera acoplada a un grupo electrógeno se sustituye por un prototipo de distribución semiautomático conformado por una red de tuberías de PVC, una bomba de corriente directa, un caudalímetro, válvulas eléctricas con las que se controlará

tanto el llenado como la selección de las *eras*, y finalmente, un dispositivo de control programable en el que usuario tendrá el control del sistema de distribución y llenado. Con la integración de este prototipo se prevé una mejora en el desempeño del llenado de las *eras*, al reducir las pérdidas de salmuera al mover la manguera entre *eras* y el tiempo de trabajo del usuario en esta actividad. En la Figura 2 se muestra un diagrama general del prototipo propuesto, en el diagrama la sección verde representa el SFVA con respaldo de energía y el regulador CD/CD, la sección azul contempla el sistema hidráulico de distribución, el cual incluye la bomba de diafragma de CD, el caudalímetro y las cuatro electroválvulas, el bloque de control se representa en naranja y se observa la interacción de los componentes entre sí, siendo las líneas de alimentación mostradas en color rojo sólido para 24 VCD y rojo punteado para 5 VCD, internamente el dispositivo de control incluye un módulo STEP DOWN a 12 VCD y una etapa de acondicionamiento de tensión para el resto de los componentes electrónicos, las líneas de control están marcadas en negro y se observa que todo el sistema hidráulico está referenciado al dispositivo de control, por lo que el prototipo se encuentra semiautomatizado.



Figura 2. Diagrama esquemático del prototipo propuesto.



Los requerimientos particulares del sistema de distribución se describen en las siguientes subsecciones.

3.1 Requerimiento del sistema hidráulico

El prototipo desarrollado abastece un sistema conformado por un estanque de almacenamiento y cuatro *eras*. El volumen total de las cuatro *eras* es de 9.576 m³, siendo el volumen de una *era* de 2.3894 m³. Debido a las características físicas de la salmuera, el sistema de bombeo debe cumplir con los siguientes requerimientos: a) no deberá contener partes metálicas que estén en contacto con la salmuera, b) alimentación en corriente directa (CD), c) la altura dinámica máxima deberá ser de 5 mca. La bomba que cumple con dichos requerimientos mínimos es una bomba de agua de CD de tipo diafragma modelo N40-EDSD [4]. Debido a la configuración de llenado de las *eras*, no existe un cambio de altura hidráulica, por lo que la bomba opera en condiciones de potencia nominal. El circuito hidráulico consta de dos ramificaciones, ambas con dos electroválvulas [10] y al final una válvula manual de purga. El sistema hidráulico tiene una distancia 16 m lineales, esto tomando en cuenta el tamaño de las *eras* y el estanque de alimentación y un diámetro de 3.81 cm.

3.2 Diseño de control del sistema de bombeo

El sistema de control del sistema compuesto de una bomba, cuatro válvulas y un caudalímetro, es implementado mediante el hardware de código abierto de una tarjeta Arduino UNO, que cuenta con las capacidades requeridas para recibir señales analógicas y activar una etapa de potencia que controla el apagado y encendido de la bomba de CD, apertura y cierre de las válvulas, lo anterior tomando como referencia la lectura adquirida del caudalímetro, así como los procesos propios de la automatización de las tres configuraciones de operación de prototipo [11]. De igual manera, tanto la programación de las instrucciones de control, entrada-salida, así como el despliegue de menús de operación, a través de un visualizador LCD. La selección de los componentes electrónicos para realizar el sistema de control se muestra en la Tabla 1, el sistema de alimentación de la tarjeta es de 12VCD, finalmente, se realizaron las tarjetas de adquisición de señales para habilitar las entradas y salidas, analógicas y digitales, de la tarjeta Arduino UNO.

Tabla 1. Componentes electrónicos del sistema de control.

Cantidad	Nombre
1	Tarjeta de Arduino UNO
1	Display LCD alfanumérico 16x4
5	Relevador Bosch 0 332 209 151
5	Transistor TIP41
5	Transistor BC548
5	Diodo 1N4148
3	Botón pulsador normalmente abierto
1	Regulador de voltaje DC/DC LM2596 STEP-DOWN



El prototipo cuenta con dos etapas de alimentación, la primera es de potencia a 24 VCD, la cual alimenta los contactos que activan tanto las cuatro válvulas del sistema como la bomba de CD, y la segunda de control a 12 VCD, que es proporcionado a través de un módulo convertidor *STEP-DOWN*, que alimenta las bobinas de los

relevadores y la tarjeta de control Arduino UNO. En la Figura 3, se puede apreciar el circuito de activación de los relevadores, que se aplica a todos los componentes de potencia descritos anteriormente, formándose el circuito con una configuración *Darlington*, con corrientes de colector $I_c=3.6$ A y de emisor $I_e=3.6036$ A.

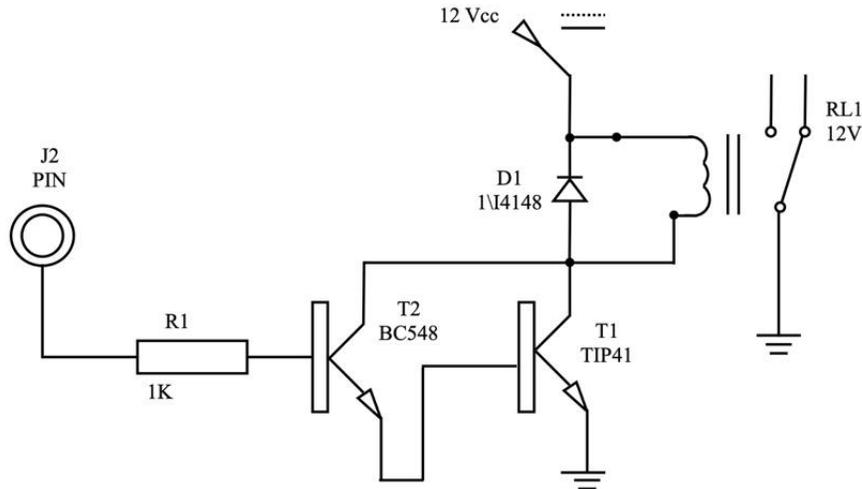


Figura 3. Circuito de activación de la bobina del relevador.

La comunicación entre el prototipo y el usuario es a través de un display LCD alfanumérico, donde se despliegan los menús de operación del prototipo, en la

Figura 4 se observa la configuración de alimentación y comunicación del display LCD, en donde se muestran ambos bloques con respecto al Arduino UNO.

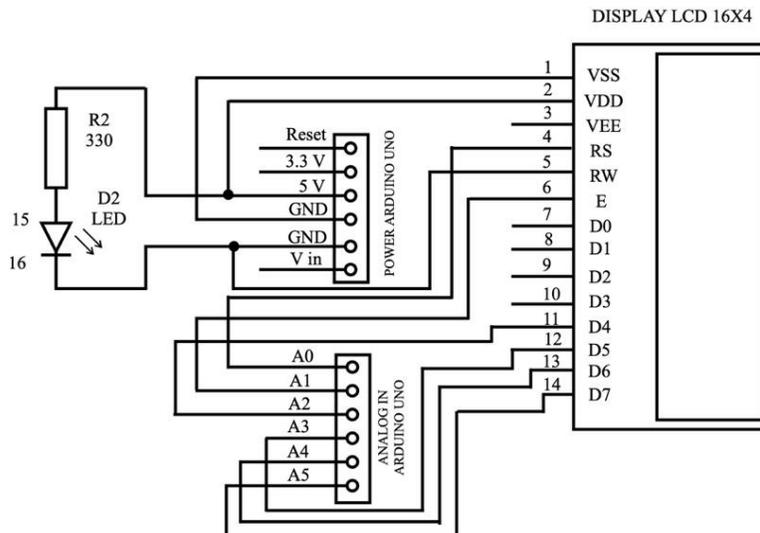


Figura 4. Circuito de conexión display LCD alfanumérico de 16x4 al Arduino UNO.



La habilitación del sistema de control se realiza en primera instancia activando un interruptor principal y posteriormente con tres botones pulsadores para la selección de los comandos programados, estos botones son de configuración normalmente abiertos, siendo la asignación de pines, Botón 1 pin 8, Botón 2 pin 7 y Botón 3 pin 6. De igual manera, el caudalímetro está conectado a la tarjeta Arduino UNO con una alimentación de 5VCD, empleando el pin digital 2 para la comunicación del sensor con la tarjeta. El

sistema de control del prototipo puede apreciarse en la Figura 5 de manera modular, donde la etapa de potencia se ubica a la derecha y contempla la alimentación, control de las cuatro válvulas y la bomba, a la izquierda se observa el módulo de control, que contempla la salida del caudalímetro como medio de control del sistema, al cuantificar los litros que serán suministrados a las *eras* en función de la opción de llenado que se seleccione.

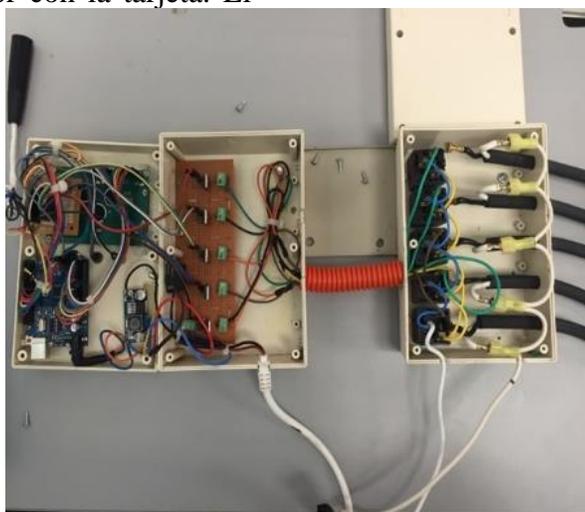


Figura 5. Conexión interna del circuito de control.

3.3 Programación del prototipo

Las diferentes tareas de control se programaron en el entorno de la tarjeta Arduino UNO, las instrucciones se despliegan a partir de un menú en el display LCD, donde se cuenta con tres opciones a elegir por el usuario: *precarga*, *carga libre* y *carga controlada*. La opción *precarga*, habilita el sistema con una purga de aire a través de las válvulas en la tubería mediante el llenado de agua del sistema hidráulico. En la opción de *carga libre*, el usuario

selecciona la *era* a llenar y pone en operación el sistema, con opción a detener el sistema manualmente, una vez que decide que la cantidad de agua suministrada a la *era* es suficiente. Finalmente, en la opción *carga controlada* por litros, el usuario selecciona la *era* y asigna la cantidad de litros que el prototipo suministrará de manera automática, apagándose el sistema una vez que se complete la acción programada. En la Figura 6 se muestra un diagrama en el que se observan las tres rutinas que realiza el prototipo.

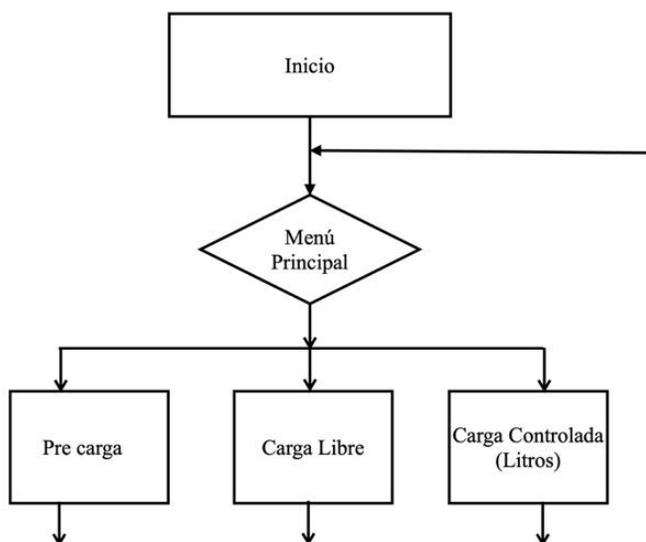


Figura 6. Conexión interna del circuito de control.

4. Circuito de potencia – Sistema Fotovoltaico Aislado (SFVA)

Las energías renovables son actualmente una opción viable para implementar sistemas de generación de energía eléctrica en zonas en que el acceso a la red de suministro eléctrico está restringido [12], es por ello que se decidió alimentar el prototipo de extracción de sal a través de un SFVA con almacenamiento de energía, el

cual posee las características de ser autónomo y sustentable. El principal requisito de diseño del SFVA, entre otros tales como las horas solares pico, las cuales están cubiertas al ser la época de zafra coincidente con los meses de mayor radiación promedio diaria, es el conocer el consumo total del equipo que integra el prototipo durante su periodo de operación, en la Tabla 2 se muestra el concentrado total del consumo del prototipo.

Tabla 2. Consumo energético del prototipo.

Descripción	Capacidad instalada	Corriente	Voltaje	Tiempo de operación	Consumo
Llenado de las 4 <i>eras</i>	172 Watts	7.16 A	24 V	6 hrs	1.031 kWh/carga

El llenado de las *eras* se realiza principalmente en la madrugada, por lo que es indispensable contar con la capacidad de corriente requerida para operar el prototipo durante el tiempo necesario para el llenado. Durante el día se podrá emplear el prototipo para realizar el llenado a discreción y de forma asincrónica de las *eras* de acuerdo a

los requerimientos de llenado de cada una, esto debido a que el agua se evapora de manera diferente debido a las condiciones de concentración de minerales y tiempo de exposición. Debido a lo anterior, el prototipo está diseñado para abastecer cuatro *eras* y brindar dos días de autonomía, esto a través del SFVA y el sistema de



almacenamiento de energía. Los elementos que conforma el SFVA en el prototipo se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Equipo que conforma el SFVA.

Equipo	Modelo	Cantidad	Capacidad Nominal	Capacidad Instalada
Panel Fotovoltaico	MC-60@36 V	2	235 W	470 W
Batería	190 Ah@12 V	2	190 Ah	190 Ah@24 V
Regulador de carga	80 Ah@24 V	1	80 Ah	80 Ah

El prototipo funciona a 24 VCD, de acuerdo a las condiciones geográficas y climáticas donde está ubicado el campo de producción salina, se tiene la capacidad de suministrar

la corriente consumida por el prototipo diariamente. En la Tabla 4 se muestra la capacidad de la etapa de potencia del prototipo con respecto a su consumo.

Tabla 4. Capacidad del SFVA.

Equipo	HSP	Tiempo de uso	Generación	Consumo
PSF	5	-	2.35 kWh/día	-
Prototipo	-	6 hrs	-	1.031 kWh/carga
Banco de baterías	-	6 hrs	-	42.96 Ah@24 V

De la Tabla 4 se observa que el banco de baterías opera al 50% de su capacidad de descarga en condiciones normales, otorgando dos días de autonomía al prototipo, por lo que en un caso extremo se podría extender a cuatro días de autonomía descargándolas al 100%, con la capacidad del SFVA de autoabastecer el banco de baterías en dos días con condiciones favorables de radiación.

5. Implementación y pruebas del prototipo

El prototipo está conformado por tres subsistemas que fueron implementados para la realización de las pruebas en condiciones

controladas y en campo, el primer subsistema es el módulo electrónico, que integra la etapa de potencia y control; el segundo subsistema es el sistema hidráulico compuesto por la tubería, válvulas, caudalímetro y la bomba de diafragma; finalmente, el tercer subsistema es el SFVA compuesto por un arreglo de los paneles fotovoltaicos en paralelo con dos baterías de almacenamiento conectadas en serie para obtener el voltaje de operación a 24 VCD, el regulador de carga conectado a ambos componentes y que permite la regulación de la corriente generada al sistema de almacenamiento. Como medida de seguridad para evitar contaminación, el compartimento de baterías está confinado y



revestido para evitar derrames de ácido de las baterías en la arena, así mismo la pintura del módulo es especial para ambientes salinos.

Las pruebas en condiciones controladas de la etapa de control se realizaron en el Laboratorio de Microelectrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima, Colima, México. Para las pruebas del prototipo, se consideraron los requerimientos mínimos de operación en campo, probándose los tres subsistemas de manera independiente con el

objetivo de identificar las adecuaciones necesarias para mejorar el desempeño de los mismos y comprobar la funcionalidad en su conjunto, para esto último se realizaron las pruebas de las rutinas automatizadas, obteniéndose resultados satisfactorios en las rutinas de precarga y carga libre. Los resultados preliminares y representativos de la operación del prototipo en la rutina de carga controlada, para las dos condiciones de prueba que se llevaron a cabo, promediándose diez eventos para cada condición, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Pruebas de rutina a carga controlada.

Bomba	Válvulas	Volumen	Tiempo calculado	Tiempo real
Activa	1 a la vez programada por el usuario	20 lts	32.70 s	34 s
Activa	4 en total (1 a la vez programada por el usuario)	9600 lts	65 min/era 260 mins/4 eras	67 mins/era 268 mins/4 eras

6. Implementación de prototipo en la Laguna de Cuyutlán, Colima, México

Las pruebas en campo se realizaron en tres periodos de cosecha de sal, comprendidos entre los meses de marzo y junio de los años 2016, 2017 y 2018, siendo el 2019 el último año en que se realizaron actividades con el Socio 143 y la Sociedad Cooperativa de Salineros de Colima S.C.L., iniciándose éstas con un periodo de capacitación tanto en el uso como en el mantenimiento

preventivo y almacenaje del prototipo, tanto en periodos de zafra como de suspensión de actividades durante el año.

A continuación, se muestran las pruebas realizadas en mayo de 2018 en las instalaciones habilitadas, consistentes en un estanque de concentración y cuatro *eras*, así como un sistema espejo para contrastar los resultados que se obtengan. En la Figura 7, se aprecian los estanques y *eras* donde se vierte la salmuera para la posterior evaporación y obtención de sal.



Figura 7. Estanque y eras de prueba en Cuyutlán.

En la Figura 8 se puede apreciar la implementación del prototipo, en la sección a) se observa el sistema de distribución, y en la sección b) el SFVA, la bomba de CD y el dispositivo de control. Se realizaron diversas pruebas durante el periodo de zafra obteniéndose resultados satisfactorios, la

prueba final se programó de la siguiente manera: válvula 1 en carga controlada, programada a 2400 l, válvula 2 en carga libre controlada por el usuario, válvula 3 en carga controlada se programaron 2400 l, finalmente válvula 4 carga libre mediante la bomba de diafragma.



Figura 8. a) Implementación de sistema de tuberías de alimentación a las eras y estanques, b) Sistema Fotovoltaico Aislado.

Los resultados de la prueba controlada por el usuario haciendo uso del menú del prototipo se muestran en la Tabla 6, sin embargo, es importante mencionar que los resultados obtenidos difieren a los programados debido a que las eras de

prueba se encontraban en producción de sal, por lo que la cantidad de salmuera distribuida se ajustó a los requerimientos de cada una de ellas, obteniéndose resultados acordes a lo programado de manera satisfactoria.

Tabla 6. Resultados del prototipo en el campo de producción de la laguna de Cuyutlán.

Bomba	Válvula	Volumen programado	Volumen suministrado	Tiempo calculado	Tiempo real
Activa	Era 1	2400 lts.	1600 lts (usuario)	65 mins	43 mins
Activa	Era 2	Libre	800 lts	-	22 mins
Activa	Era 3	2400 lts.	800 lts (usuario)	65 mins	22 mins
Activa	Era 4	-	200 lts.	-	30 mins



Los resultados mostrados en el apartado de la *era* 4 difieren con el resto de los mostrados en la Tabla 6 debido a que en esa prueba se probó un prototipo de bomba de diafragma de menor capacidad diseñada y construida en la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de Colima con resultados aceptables que permitieron la implementación en campo en el llenado adecuado de las *eras*.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos por el prototipo en las pruebas realizadas en el último periodo de zafra con respecto al sistema espejo que fue implementado por el usuario, fueron parciales debido a la cantidad de *eras* y periodos de cosecha, sin embargo, éstos fueron satisfactorios al haber reducido los tiempos de recolección de la sal y de llenado de las *eras* para que la producción de sal fuera constante, obteniéndose una *era* más de sal en un periodo de tres cosechas de sal con respecto al proceso de llenado con grupos electrógenos y manguera. Por otro lado, el uso del prototipo proporcionó en promedio tres horas diarias a los usuarios para llevar a cabo otras actividades tendientes a incrementar la producción de sal, como cosechar la sal de otras *eras* debido a que ya no tuvieron que desplazarse para ir por combustibles, aditivos y refacciones para operar los equipos electrógenos. El impacto real del uso del prototipo podrá ser cuantificado cuando el prototipo sea implementado en un campo completo y sea operado durante toda la temporada de zafra. Actualmente serán presentados los resultados del proyecto al pleno de la Sociedad Cooperativa de Salineros de Colima S.C.L. para solicitar el apoyo para su implementación en una

prueba piloto y evaluar el desempeño del prototipo de manera global.

7. Conclusiones

El prototipo diseñado, implementado y probado para apoyar el proceso de extracción artesanal de sal por evaporación en la Laguna de Cuyutlán, Colima, México, cumplió con el objetivo planteado al detectar las áreas de oportunidad en dicho proceso, siendo la más relevante el sustituir el equipo electrógeno y de distribución de salmuera empleados actualmente por un sistema de bombeo y distribución semiautomatizado de salmuera alimentado por un SFVA con respaldo de energía, sin afectar el proceso artesanal de extracción sal e incrementado la sustentabilidad del mismo al eliminar el impacto ambiental generado por los residuos de la combustión.

El periodo que comprende la zafra de sal, entre marzo y junio, coincide con el periodo de mayor insolación solar, llegando a tener 5.4 kWh/m² al día, aunado a la falta de red de energía eléctrica en la laguna, justifica plenamente el uso de un SFVA para satisfacer la demanda de energía en la zona, es por ello por lo que se determinó emplear esta tecnología para alimentar el prototipo y de esta manera ser autosuficiente energéticamente, que junto a un buen manejo de las baterías reduce la potencial contaminación originada por estos sistemas. Por otro lado, se propuso dar valor agregado al tiempo que emplean los usuarios en el llenado de los estanques y las *eras*, desarrollado un sistema de bombeo semiautomatizado para la distribución de la salmuera, el cual no modifique el proceso de extracción de la sal. Lo anterior se llevó a cabo desarrollando un dispositivo de control



que le permite al usuario programar el llenado de las *eras* sin necesidad de estar presente para que se ejecute el proceso programado, con lo cual se dispone de tiempo para realizar otras actividades, así mismo, dicho sistema de bombeo y distribución está conformado de PVC, al igual que las mangueras con que operan actualmente, con lo que no se altera de manera alguna el proceso de extracción de la sal.

Los resultados obtenidos en la serie de pruebas realizadas en tres periodos de zafra son satisfactorios, al reducir la emisión de gases contaminantes por el efecto de la combustión de los equipos electrógenos, se disminuyó el costo por la sustitución de estos equipos, el combustible y refacciones necesarios para su operación, constatándose que la vida útil de éstos es de tres años, por otro lado, la extracción de sal se incrementó en el equivalente a una *era* por cada tres cosechas en comparación con el método de extracción actual, de igual manera, se obtuvo una ganancia de tres horas en promedio diario en el llenado de las *eras* a través del prototipo con respecto al proceso actual de llenado, finalmente, el usuario se adaptó rápidamente al uso del prototipo por su diseño intuitivo y de fácil operación.

En cuanto a los trabajos futuros más relevantes en este proyecto se encuentran: optimizar el diseño de PCB para reconfigurar el dispositivo de control y hacerlo más compacto, inclusive vía inalámbrica, en cuanto a resultados, es importante realizar una prueba piloto en un campo completo para poder evaluar el desempeño del prototipo en su totalidad y determinar el apoyo real en el proceso de extracción de la sal y su viabilidad financiera durante la vida útil de éste.

Este proyecto puede ser replicado en las zonas en que el proceso de extracción de sal sea similar al llevado a cabo en la Laguna de Cuyutlán, Colima, México, contando con el potencial de ser protegido ante el IMPI debido a que no hay desarrollos de este tipo reportados a nivel nacional ni internacional, actualmente se está en el proceso de escritura del documento de protección. Por último, es de suma importancia realizar la vinculación con los diversos sectores productivos para desarrollar soluciones sustentables que aporten un impulso a la economía empleando para ello el potencial de energías alternativas con que cuenten las zonas en que se requiera el apoyo.

Referencias

- [1] Coordinación General de Minería, "Reporte del Perfil de Mercado de la Sal", Secretaría de Economía, Dirección General de Desarrollo Minero, México, 2018. https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/mineria/GuiadeProcedimientosMineros.pdf
- [2] E. Janneth y R. Padilla, "Vulnerabilidad post-desastre en Cuyutlán, Colima 1900-1959" Culturales, vol. 6, pp. 1-34, 2018. <https://doi.org/10.22234/recu.20180601.e371>
- [3] O. Z. Gaytán y J. M. Orozco, "Investigación: La historia de la sal en México, las salinas de Cuyutlán y el caso de la cooperativa de salineros de Colima" Ciencias Económicas, vol 1, num. 12, pp. 25-38, 2015. <https://doi.org/10.14409/ce.v1i0.4979>
- [4] T. W. B. Group, Global Photovoltaic Power Potential by Country, num. Junio.



World Bank, Washington, DC, 2020.
<http://hdl.handle.net/10986/34102>

[5] G. Guntur, A. A. Jaziri, A. A. Prihanto, D. M. Arisandi, and A. Kurniawan, "Development of salt production technology using prism greenhouse method," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 106, no. 1, 2018.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012082>

[6] I. G. Wenten, D. Ariono, M. Purwasasmita, and Khoirudin, "Integrated processes for desalination and salt production: A mini-review," AIP Conf. Proc., vol. 1818, no. March, 2017.
<https://doi.org/10.1063/1.4976929>

[7] S. Abdallah, M. Abu-Hilal, and M. S. Mohsen, "Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions," Desalination, vol. 183, no. 1-3, pp. 95-104, Nov. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.030>

[8] B. Kim et al., "Aquavoltaic system for harvesting salt and electricity at the salt farm floor: Concept and field test," Sol.

Energy Mater. Sol. Cells, vol. 204, no. October 2019, p. 110234, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110234>

[9] D. H. Muhsen, T. Khatib, and F. Nagi, "A review of photovoltaic water pumping system designing methods, control strategies and field performance," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 68, no. August 2016, pp. 70-86, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.129>

[10] Neumak, "Neumak " Acceso en Agosto 2019. [En línea]. Disponible en:
<http://www.neumak.com/index.html>.

[11] Arduino, Reference manual-Playground, Acceso en Agosto 2019. [En línea]. Disponible en:
<https://www.arduino.cc/>

[12] A. Reinders, P. Verlinden, W. van Sark, y A. Freundlich, Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications. Wiley, 2017.
<https://doi.org/10.1002/9781118927496>

Derechos de Autor (c) 2022 Erik Eduardo Vázquez Fernández, Ramón Antonio Félix Cuadras, Jorge Armando Ojeda Sánchez, Alejandro Regalado Escobedo, Arturo Rincón Pulido



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)