

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
CONCENTRACIÓN DE CLORO EN UN TANQUE PULMÓN
DE 20000 LITROS**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Bruno Guillermo Cassinelli Chiamulera

ASESOR: Mg. Willy Eduardo Carrera Soria

Lima, Enero del 2018



Agradecimientos:

A mis padres, Julio y Marina, por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi aprendizaje, y por todo el esfuerzo y los sacrificios que hicieron para mantenerme estudiando; por las cuantiosas horas que pasamos en la planta, los desvelos, los consejos y por toda la ayuda que me impulsó a terminar la carrera.

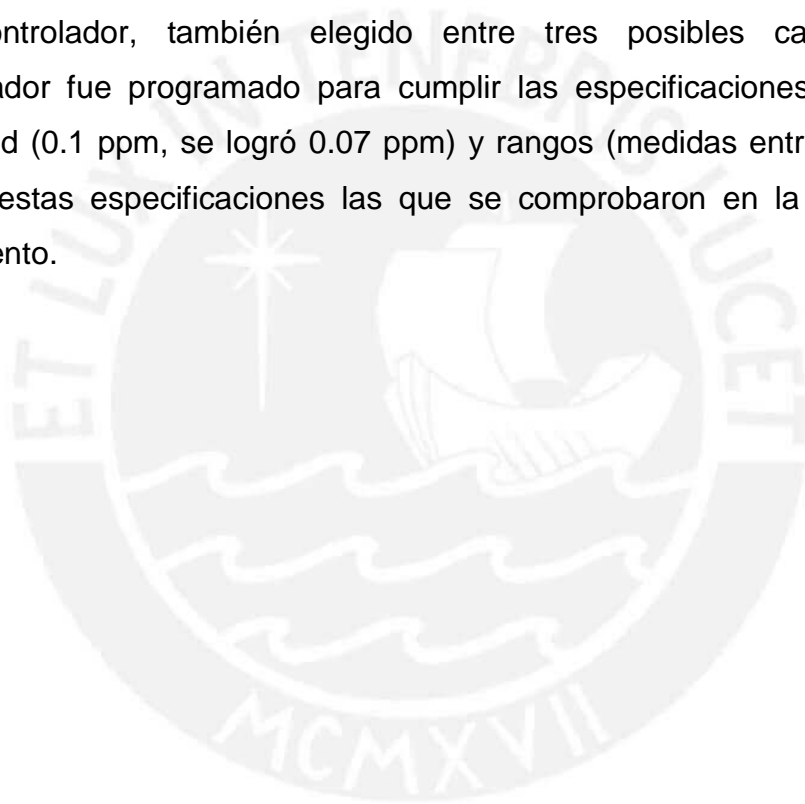
A mi hermana Verónica, por los pequeños detalles que me permitían continuar las largas sesiones de trabajo.

Al profesor Willy Carrera, por ayudarme a hacer realidad este proyecto.

A mis compañeros Blanca, Selene, César y Juan, quienes colaboraron con el proyecto con sus ideas y su paciencia.

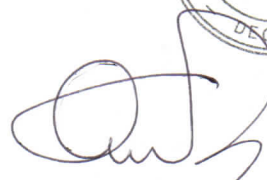
Resumen

El objetivo a perseguir de este proyecto era crear un sistema automatizado de monitoreo y control de la concentración de cloro en un tanque de 20000 litros. Para tal fin, se analizaron dos opciones nacionales y más de diez opciones internacionales de sensores de concentración de cloro, así como sensores de nivel y dosificadores de solución. Luego de haber elegido los elementos de interacción, se procedió a diseñar los circuitos controladores de estos dispositivos, así como los elementos de potencia del mismo sistema hidráulico. Todos estos controladores se enlazaron al bloque de control, gobernado por un microcontrolador, también elegido entre tres posibles candidatos. Este controlador fue programado para cumplir las especificaciones requeridas de exactitud (0.1 ppm, se logró 0.07 ppm) y rangos (medidas entre 0 y 5 ppm), y fueron estas especificaciones las que se comprobaron en la etapa final del documento.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Automatización de un Sistema de Control de Concentración de Cloro en un Tanque Pulmón de 20000 litros
Área : Circuitos y Sistemas Electrónicos #1325
Asesor : Ing. Willy Carrera
Alumno : Bruno Guillermo Cassinelli Chiamulera
Código : 20100331
Fecha : 13 de Junio de 2016



Descripción y Objetivos

En el mundo actual, el uso del cloro como desinfectante de agua está ampliamente difundido. Para las empresas de embotellamiento de agua de consumo humano, la clorificación es una etapa previa que asegura la completa ausencia de microorganismos en su producto. Por esta razón, las plantas de embotellamiento de agua poseen una etapa de desinfección de agua que, de manera automática, regula la cantidad de cloro en los tanques de la planta. A nivel nacional, solo las grandes empresas poseen un método automático para la clorificación de sus reservorios. Las empresas más pequeñas, como la que se menciona en este documento, normalmente controlan el nivel de cloro de manera manual, perdiendo eficiencia en el proceso.

El objetivo general de esta tesis es diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo de la concentración de cloro en el agua de un tanque pulmón de 20 000 litros. Para esto, se necesitará:

- Elegir e implementar los elementos de hardware que el sistema necesite, como lo son el sensor de concentración de cloro y los sensores de nivel de líquido (con sus acondicionadores de señal), la electrobomba de agua y las dos electroválvulas (con sus circuitos de excitación) y el dosificador de solución, así como el visualizador de estados y el selector de modo.
- Controlar todos los dispositivos de hardware mediante un programa ordenado y claro en un microcontrolador, que obtenga todos los datos suministrados por los sensores, los procese, determine una acción a realizar y comande a los circuitos de potencia a cumplir esta acción.
- Evaluar los resultados obtenidos al implementar este sistema en la planta y corroborar que el problema original presente actualmente se solucione con la implementación de este proyecto.

MÁXIMO 50 PÁGINAS



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATAÑO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Automatización de un Sistema de Control de Concentración de Cloro en un Tanque Pulmón de 20000 litros

Índice

Introducción

1. Clorificación del Agua Potable
2. Problemática de la Clorificación en la Planta
3. Diseño e Implementación del Sistema de Clorificación
4. Ensayos, Pruebas y Resultados

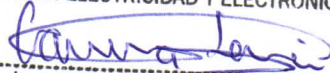
Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA



Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATAÑO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



Índice de la tesis:

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 1 |
| 1. Clorificación del Agua Potable..... | 2 |
| 1.1. Presentación del Asunto de Estudio..... | 2 |
| 1.2. Estado del Arte..... | 2 |
| 1.2.1. El Agua como recurso en el Perú y el mundo..... | 2 |
| 1.2.2. Enfermedades relacionadas con el agua de consumo humano..... | 5 |
| 1.2.3. Clorificación y calidad del agua..... | 6 |
| 1.2.4. Trihalometanos..... | 8 |
| 1.2.5. El proceso de clorificación en una planta de agua..... | 8 |
| 1.3. Síntesis del asunto de estudio..... | 9 |
| 1.4. Modelo Teórico..... | 11 |
| 2. Problemática de la clorificación en la planta..... | 14 |
| 2.1. Insumos disponibles en el mercado..... | 14 |
| 2.1.1. Sensores de concentración de cloro..... | 14 |
| 2.1.2. Sensores de nivel..... | 17 |
| 2.2. Variables Internas..... | 18 |
| 2.3. Problemas identificados..... | 20 |
| 2.4. Declaración del Marco Problemático..... | 21 |
| 3. Diseño y Desarrollo del Sistema de Clorificación..... | 23 |
| 3.1. Alcances..... | 23 |
| 3.2. Objetivos..... | 23 |
| 3.2.1. Objetivo general..... | 23 |
| 3.2.2. Objetivos específicos..... | 23 |
| 3.3. Diseños y esquemáticos..... | 25 |
| 3.3.1. Planta..... | 25 |
| 3.3.2. Bloque de Potencia..... | 26 |
| 3.3.3. Bloque Excitador..... | 28 |
| 3.3.3.1. Electrobomba..... | 28 |
| 3.3.3.2. Electroválvulas..... | 30 |
| 3.3.4. Bloque Dosificador de Solución de Cloro..... | 31 |
| 3.3.5. Bloque Sensor..... | 33 |
| 3.3.5.1. Sensor de concentración de cloro..... | 33 |
| 3.3.5.2. Sensor de Nivel de Agua en el Tanque Pulmón..... | 36 |
| 3.3.5.3. Sensor de Nivel de Solución de Cloro en el Tanque de 20 litros..... | 38 |
| 3.3.6. Bloque Acondicionador de Señal..... | 39 |
| 3.3.6.1. Sensor de presión del tanque de solución..... | 39 |
| 3.3.6.2. Sensor de presión del tanque pulmón..... | 42 |
| 3.3.6.3. Sensor de concentración de cloro..... | 43 |
| 3.3.7. Interfaz de Usuario..... | 44 |
| 3.3.7.1. Visualizador (Display)..... | 44 |
| 3.3.7.2. Selector de modo..... | 47 |
| 3.3.7.3. Pulsador de reset error..... | 48 |
| 3.3.8. Bloque de Control..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 3.3.9. Fuentes de Alimentación..... | 52 |
| 3.3.10. Programación..... | 55 |
| 4. Ensayos, pruebas y resultados..... | 61 |
| 4.1. Sensor de nivel del tanque de solución..... | 67 |
| 4.2. Sensor de nivel en el tanque pulmón..... | 70 |
| 4.3. Sensor de concentración de cloro..... | 73 |
| 4.4. Bomba dosificadora..... | 74 |
| 4.5. Controladores de elementos de potencia..... | 76 |
| 4.6. Fuente de alimentación..... | 76 |
| 4.7. Secuencia de funcionamiento del equipo..... | 77 |
| 5. Conclusiones y Recomendaciones..... | 81 |
| 6. Bibliografía..... | 84 |
| 7. Anexos | |
| 7.1. AWWA manual: water chlorination/chloramination practices and principles | |
| 7.2. M3000 IEC Low-voltage Induction Motors 400 V 50 Hz | |
| 7.3. Medición de Nivel en un tanque usando presión de aire en una manguera | |
| 7.4. Demostración de fórmula para el cálculo del volumen de solución | |
| 7.5. Manual del ARCL200 | |
| 7.6. Manual de bomba dosificadora SmartProducts | |
| 7.7. Especificaciones de dosificador Acquatron | |
| 7.8. Código completo del programa del bloque de control | |
| 7.9. Método de Fairchild Semiconductos para la elección de circuito Snubber | |
| 7.10. Video de funcionamiento del sistema por casos | |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.2: Problemas identificados en el proceso de clorificación de una planta de agua..... | 20 |
| Tabla 3.1: Selección del excitador de la electrobomba..... | 28 |
| Tabla 3.2: Selección de dosificador de solución de cloro..... | 31 |
| Tabla 3.3: Selección del sensor de nivel de agua en el tanque pulmón..... | 37 |
| Tabla 3.4: Selección de amplificador de instrumentación para sensor de 10 KPa..... | 40 |
| Tabla 3.5: Selección de indicadores luminosos..... | 46 |
| Tabla 3.6: Selección de microcontrolador..... | 49 |
| Tabla 3.7: Distribución de pines usados por el sistema de control..... | 51 |
| Tabla 3.8: Consumo de corriente según voltaje de alimentación..... | 52 |
| Tabla 4.1: Respuesta del sensor de 10 KPa versus volumen de líquido..... | 67 |
| Tabla 4.2: Respuesta del sensor de 10 KPa ante una cierta presión administrada..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Tabla 4.3: Cálculo de error del sensor de 10 KPa..... | 69 |
| Tabla 4.4: Respuesta del sensor de 50 KPa ante variación de volumen..... | 71 |
| Tabla 4.5: Respuesta del sensor de 50 KPa ante una presión dada..... | 72 |
| Tabla 4.6: Cálculo de error del sensor de 50 KPa..... | 73 |
| Tabla 4.7: Cálculo de error del sensor de concentración de cloro..... | 74 |

Índice de figuras:

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Situación hídrica mundial..... | 3 |
| Figura 1.2: Disponibilidad hídrica según la cuenca respectiva..... | 4 |
| Figura 1.3: Uso de agua dulce en el Perú..... | 5 |
| Figura 1.4: Gráfico estadístico de la mortalidad por tifoidea en Estados Unidos..... | 7 |
| Figura 1.5: Modelo teórico..... | 13 |
| Figura 2.1: Vista general del equipo controlador de pH y cloro TIGHSA..... | 14 |
| Figura 2.2; Diagrama de instalación del equipo controlador de cloro TIGHSA..... | 15 |
| Figura 2.3: Vista sin tapa del equipo monitor de nivel de cloro HF Scientific..... | 15 |
| Figura 2.4: Distintas versiones del medidor electroquímico Goldpoint..... | 16 |
| Figura 2.5: Modo de uso de un sensor de presión diferencial..... | 18 |
| Figura 2.6: Diagrama de flujo del proceso de clorificación en una planta de agua.. | 19 |
| Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema..... | 25 |
| Figura 3.2: Fotografía del tanque pulmón..... | 26 |
| Figura 3.3: Fotografía del tanque de solución..... | 26 |
| Figura 3.4: Esquemático del arreglo de optotriac y triac de potencia..... | 29 |
| Figura 3.5: Esquemático del dosificador de solución de cloro..... | 32 |
| Figura 3.6: Vista sin tapa del equipo monitor de nivel de cloro HF Scientific..... | 34 |
| Figura 3.7: Distintas versiones del medidor electroquímico Goldpoint..... | 35 |
| Figura 3.8: Vista del módulo del sensor de concentración de cloro ARCL200..... | 36 |
| Figura 3.9: Sensor de presión absoluta de 50 KPa MPXM2053GS..... | 38 |
| Figura 3.10: Esquemático del acondicionador de señal del sensor de 10 KPa..... | 42 |
| Figura 3.11: Esquemático de la adaptación de señal entregada por el módulo del sensor de cloro..... | 44 |
| Figura 3.12: Esquemático de la adaptación de los indicadores luminosos..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.13: Esquemático de la adaptación del selector de modo..... | 47 |
| Figura 3.14: Esquemático de la adaptación del pulsador de reset error..... | 48 |
| Figura 3.15: Esquemático del microcontrolador Atmega 2560, incluido en la tarjeta del Arduino Mega 2560..... | 51 |
| Figura 3.16: Esquemático de la solución para el sistema de clorificación..... | 54 |
| Figura 3.17: Diagrama de flujo del lazo principal..... | 56 |
| Figura 3.18: Diagrama de flujo de interrupción de llenado..... | 58 |
| Figura 3.19: Diagrama de flujo de interrupción de ciclo normal..... | 59 |
| Figura 3.20: Diagramas de flujo de interrupciones de reset error y parpadeo..... | 59 |
| Figura 4.1: Diagrama de pistas de la tarjeta principal..... | 62 |
| Figura 4.2: Vista superior de la tarjeta principal..... | 62 |
| Figura 4.3: Diagrama de pistas de las tarjetas de los sensores de presión..... | 63 |
| Figura 4.4: Fotografía del frente del tablero..... | 63 |
| Figura 4.5: Fotografía de la celda de flujo con la sonda..... | 64 |
| Figura 4.6: Fotografía de válvula reguladora de flujo..... | 64 |
| Figura 4.7: Fotografía de distribución de electroválvulas..... | 65 |
| Figura 4.8: Fotografía de sistema de dosificación de solución..... | 66 |
| Figura 4.9: Fotografía de la bifurcación de mangueras..... | 66 |
| Figura 4.10: Gráfico de la respuesta del sensor de 10 KPa versus volumen de líquido..... | 67 |
| Figura 4.11: Gráfico de la respuesta del sensor de 10 KPa ante presión..... | 68 |
| Figura 4.12: Gráfico de la respuesta del sensor de 50 KPa ante variación de volumen en el tanque pulmón..... | 71 |
| Figura 4.13: Gráfico de la respuesta del sensor de 50 KPa ante presión..... | 72 |
| Figura 4.14: Chorro de agua arrojado al orificio superior del tanque pulmón..... | 75 |
| Figura 4.15: Chorro de agua impulsado a una altura superior al tanque pulmón.... | 75 |
| Figura 4.16: Fotografías de las pruebas a los excitadores de potencia..... | 76 |
| Figura 4.17: Pruebas de la fuente de alimentación..... | 77 |
| Figura 4.18: Estado inicial del tablero..... | 78 |
| Figura 4.19: Sistema en estado de clorinación..... | 78 |
| Figura 4.20: Sistema señalizando falta de solución de cloro..... | 79 |

Introducción:

Hoy en día, el tratamiento de agua es algo muy importante para todas las personas. El agua por sí sola, aunque necesaria para la vida humana, puede contener microorganismos que pueden generar diversas enfermedades al estómago y que pueden tener consecuencias aún peores. Por ello, se han desarrollado distintos métodos de desinfección de agua, siendo el más común y extendido el uso de cloro, o clorificación del agua.

Este método consta de la aplicación de cloro, en diversas modalidades y presentaciones, a los depósitos de agua comunales, como parte del proceso de potabilización. Luego es esta agua la que se usa tanto para higiene personal como para el consumo humano directo. Sin embargo, para el tratamiento de agua bebible, la desinfección es uno de los tantos procesos que se debe seguir para garantizar la pureza del agua.

Por ello, en las plantas de embotellado de agua normalmente se encuentra un proceso de desinfección de agua, donde se eliminan los posibles microorganismos que puedan existir. Estos procesos requieren de la medición del nivel actual de cloro en el agua, para saber si se encuentra en el rango correcto. Todavía es muy usado el método manual de medición de cloro residual libre, pero cada vez más las empresas se están orientando al uso de sensores para determinar la concentración de cloro en agua. Esto se debe a que el método manual, por su misma naturaleza, es un método inexacto, lo que no permite planear de manera precisa estrategias para mantener el nivel de cloro residual libre en una misma concentración por un largo periodo de tiempo. Además, cuando se detecta una variación de cloro en el reservorio recién se puede comenzar la clorificación, lo que puede llegar a causar tiempos muertos en la producción de agua, algo indeseable en cualquier industria que no debe tener el proceso detenido.

Por todo lo antes mencionado, dado que el proceso actual de clorificación en una planta de embotellado es un proceso manual (con las consecuencias antes mencionadas), y dado que se necesita que el agua en un tanque pulmón se encuentre siempre en 2.3 ± 0.2 ppm de concentración de cloro; entonces un proceso de control automático de la concentración de cloro que detecte tanto el nivel de agua como la concentración actual de cloro, y genere una respuesta según estos datos gracias a una dosificadora de solución preparada, y controle la bomba de recirculación para homogenizar la mezcla recién ingresada sería la manera más óptima de solucionar los problemas existentes con el método anterior y de garantizar la correcta clorificación del agua de tanque pulmón en todo momento, sin llegar a picos o valles en los niveles para no dañar los equipos posteriores o tener un nivel tan bajo que no garantice la ausencia de microorganismos en el agua.

Por ello, en el presente documento, se procederá a profundizar en la forma y utilidad de diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo de la concentración de cloro en el agua de un tanque pulmón de 20 000 litros.

Capítulo 1: Clorificación del Agua Potable

1.1. Presentación del asunto de estudio

En el mundo actual, el mantenimiento de la potabilidad de agua es un asunto primordial, puesto que este recurso es limitado y, si se deja desatendido, se puede desperdiciar rápidamente. Para este propósito se usan distintas técnicas de desinfección, entre las que se encuentran el uso de cloro.

En este capítulo, se comentará sobre la situación actual del agua como recurso en el mundo, en el Perú y en Lima, además de sus usos; se hablará de las diversas enfermedades que puede causar una mala desinfección del agua, conocidas como enfermedades diarreicas agudas (EDA) y su evolución a lo largo del tiempo luego del descubrimiento del potencial del cloro; se expondrán los métodos de detección de cloro residual en el agua como forma de cuantificar la concentración existente en ella, tanto los métodos visuales como los más avanzados métodos electroquímicos; se hablará también de los posibles efectos dañinos de un excesivo uso de cloro, como la formación de los trihalometanos; por último, se expondrán los métodos de clorificación que se usan actualmente, y los instrumentos que existen en el mercado para medir y controlar el nivel de la concentración de cloro en agua.

1.2. Estado del Arte

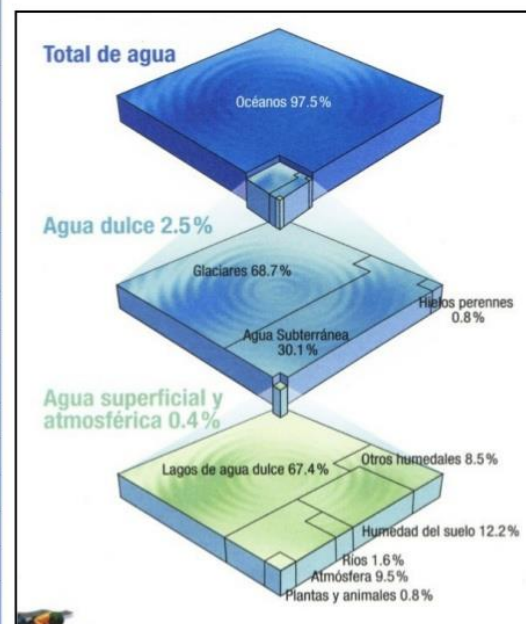
1.2.1. El agua como recurso en el Perú y el mundo

El agua es una sustancia química formada en su forma básica por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H_2O). Este compuesto es esencial para toda forma de vida, pues permite la supervivencia y el desarrollo de estas. El ser humano está formado en aproximadamente un 70% de agua; por ello, debe mantenerse constantemente hidratado para conservar esta proporción. Pruebas y experimentos en distintas personas han arrojado un promedio de 4 días como el máximo tiempo en que una persona de características normales puede sobrevivir sin agua de ninguna fuente externa.

Como se puede apreciar en la figura 1.1, actualmente, en la Tierra existen aproximadamente 1, 386'000,000 km³ de agua, de los cuales el 97.5% es agua salada ubicada en los océanos. Lamentablemente, el agua que es apta para el consumo humano, tanto directo (bebible) como indirecto (agricultura, higiene, actividades industriales, etc.) debe ser agua continental, o como se le conoce normalmente, agua dulce. Esta agua, sin contenido salino, se obtiene en su mayoría de los glaciares en las montañas, que con su derretimiento anual forman el cauce de los ríos que finalmente desembocan en el mar. En total, todas las fuentes de agua dulce representan un 2.5% del total de agua existente en el planeta, lo que denota la escasez de este recurso y la necesidad de racionar correctamente su consumo.

Situación Hídrica Mundial

| UBICACIÓN | VOLUMEN DEL AGUA (en Km ³) | PORCENTAJE DEL TOTAL |
|---|--|----------------------|
| AGUA SALADA | | |
| Océanos | 1,338'000,000 | 96.54 % |
| Aguas subterráneas salinas | 12,870,000 | 0.93 % |
| Lagos de agua salada | 85,000 | 0.006 % |
| AGUAS CONTINENTALES | | |
| Glaciares, cubierta de nieve permanente | 24'064,000 | 1.74 % |
| Agua dulce subterránea | 10'530,000 | 0.76 % |
| Hielo del suelo, gelisuelo | 300,000 | 0.022 % |
| Lagos de agua dulce | 91,000 | 0.007 % |
| Humedad de la tierra | 16,500 | 0.001 % |
| Vapor de agua atmosférico | 12,900 | 0.001 % |
| Pantanos, humedales | 11,500 | 0.001 % |
| Ríos | 2,120 | 0.0002 % |
| Incorporados en la biota | 1,120 | 0.0001 % |
| TOTAL DE AGUA | 1,386'000,000 | 100 % |
| TOTAL DE AGUA DULCE | 35'029,000 | 2.5 % |

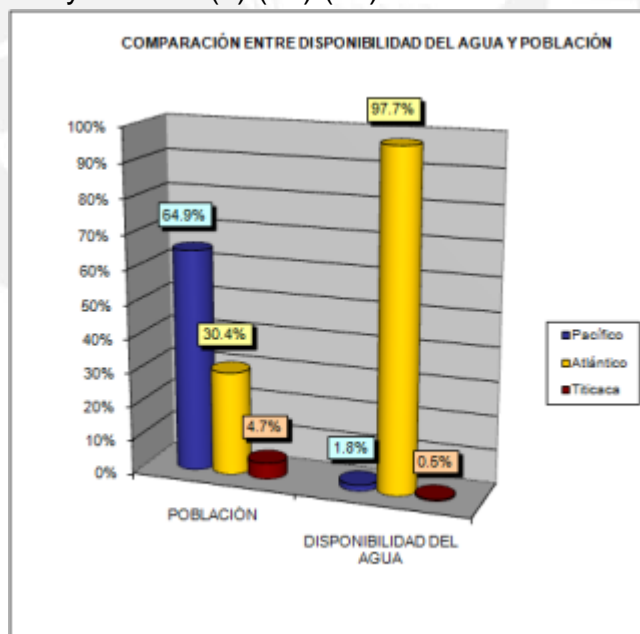


Fuente: Shiklomanor 1993. en "Estado del Medio Ambiente y Medidas Normativas", PNUMA. 2002

Figura 1.1: Situación hídrica mundial. La distribución del agua en la Tierra

El Perú se encuentra en el puesto 8 en el ranking de los países con mayor cantidad de agua superficial, con aproximadamente un 1.89% de esta en el territorio nacional (FAO, 2003). Esto debido más que nada a la presencia del río

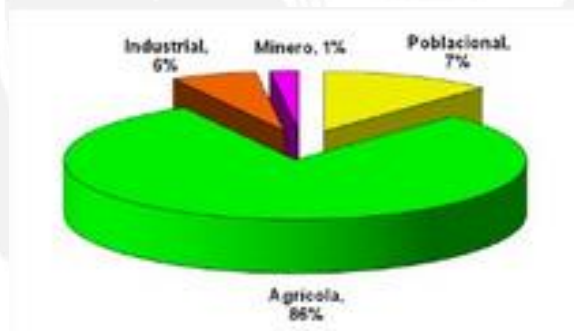
Amazonas y la Cordillera de los Andes, cuyos picos contienen gran cantidad de nieve (cantidad que, desgraciadamente, se ha venido reduciendo a causa del calentamiento global que aqueja el planeta). Sin embargo, se encuentra en el puesto 17 en lo que refiere a disponibilidad hídrica, es decir, la relación entre cantidad de habitantes en una zona y la cantidad de agua en tal zona. Esto se debe a que la mayor parte de la población nacional (65%) está concentrada en la vertiente hidrográfica del océano Pacífico, pero que solo cuenta con el 2.18% de agua dulce a nivel nacional. Esto se puede apreciar en la figura 1.2. Más aún, en Lima se tiene una disponibilidad hídrica per cápita de menos de 500 m³, cuando la disponibilidad media en el mundo está entre 5001 y 10000 m³ por habitante. Esto contrasta con el uso de agua promedio de un habitante de Lima: 251 litros por día, el doble de lo que consumen habitantes de Suiza o Francia. Aun así, hoy en día hay un 23,8% de hogares limeños que no tienen acceso a la red pública, y se deben abastecer por medio de camiones cisternas, agua de ríos o pozos. Por ello, es en los departamentos de la costa en los que más se debe instaurar una cultura de cuidado y correcta racionalización del agua potable, además de su cuidado y tratado. (8) (13) (10)



http://www.ana.gob.pe:8080/snirh/dsp_disphidrica.aspx

Figura 1.2: Disponibilidad hídrica según la cuenca respectiva, extraída de la página web del SNIRH (Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos), parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Como se aprecia en la figura 1.3, de todo el nivel de agua dulce que se tiene en el Perú, se usa un 86% de esta para el sector agrícola. Sin embargo, las técnicas de cultivo que se usan no necesariamente consumen eficientemente el agua: se estima que la eficiencia en el uso de agua para la agricultura es de entre 30 a 35%, un valor alarmantemente bajo. Un 6% se destina a uso industrial, tanto para la producción de alimentos, textiles y papel como para la refinación de combustibles. La eficiencia es ligeramente mayor, entre 45-50%. El 1% de agua dulce es destinada a uso minero, para limpiar los minerales obtenidos y refinarlos. Este indicador no muestra la posible contaminación que la minera pueda generar con sus desperdicios. Por último, solo el 7% del total de agua dulce disponible en el territorio nacional se destina a uso poblacional, es decir, a la potabilización, alcantarillado, riego, limpieza, entre otros. En este sentido, cabe resaltar que existe una cobertura de 64% de agua potable a nivel nacional; en áreas urbanas es mayor (84%). En todo caso, la eficiencia del uso del agua en este sector es de 45-50%, y se estima que solo entre el 14 al 17% de las aguas servidas siguen un proceso de tratamiento y desinfección antes de regresar al mar. (13)



<http://es.slideshare.net/hugogc/per-el-agua-en-cifras>

Figura 1.3: Usos del agua dulce en el Perú. Imagen extraída de un documento de trabajo presentado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2012

1.2.2. Enfermedades relacionadas con el agua de consumo humano

Existen diversas enfermedades relacionadas con el uso de aguas contaminadas. Las más comunes son el cólera y la diarrea, enfermedades producidas por sus respectivos virus. Por ejemplo, luego del terremoto en Haití, apareció un rebrote

de cólera, que sigue cobrando múltiples vidas. Estas enfermedades afectan más fuertemente a niños menores de 5 años, pues sus defensas todavía son vulnerables, y pueden degenerar en enfermedades diarreicas agudas (EDA). Estas enfermedades causan un promedio de 4.6 millones de muertes infantiles anuales (Minsa) producto de la deshidratación que generan. (1) (7)

Las EDA están relacionadas con la disponibilidad de agua limpia en el hogar. Ya sea por lavar alimentos, lavarse las manos o beber agua, los microorganismos causantes de estas enfermedades llegan a los seres humanos y los infectan. Las enfermedades que son transportadas en el agua son las más comunes, y se expanden cuando un sujeto ingiere agua contaminada o algún alimento que haya sido lavado o preparado con esta agua. Entre las enfermedades más comunes de este tipo se encuentran la tifoidea, cólera, disentería y hepatitis. Los síntomas de estas enfermedades, además de diarrea severa, son fiebre, calambres, náuseas y deshidratación y son especialmente peligrosos en sujetos que poseen un sistema inmunológico debilitado. (11)

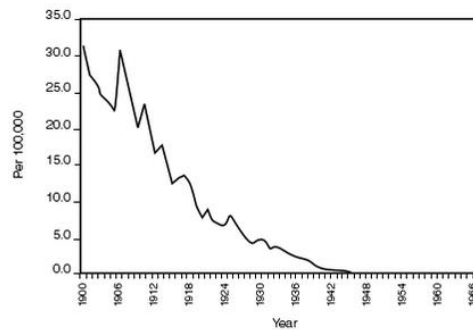
Afortunadamente, estas enfermedades son controlables con buenos hábitos de higiene (lavarse las manos periódica y sistemáticamente) y usando agua desinfectada para el quehacer diario. Para obtener esta característica, el agua común debe pasar por un proceso de limpieza y esterilización. Si bien existen varios procesos para purificar el agua, como el ozono, el proceso más popular por un amplio margen para obtener agua desinfectada es la clorificación. (7)

1.2.3. Clorificación y calidad de agua

El cloro fue descubierto aproximadamente en 1744, en Suecia. Sin embargo, no fue hasta 1890 que se descubrieron los potenciales efectos desinfectantes de este elemento químico. Así, por 1902, ya se usaba el cloro en Bélgica y, en 1908, en Estados Unidos, Nueva Jersey. Con esto, se declaró la clorificación una práctica de cuidado de salud, lo que permitió su rápida proliferación a lo largo del planeta. Gracias a esto, las enfermedades producidas por microorganismos alojados en el agua, como cólera, disentería y tifoidea, que antes se tomaban la vida de miles de personas, sufrieron una baja considerable. Una muestra de ello

es el gráfico estadístico (figura 1.4), que denota la cantidad de enfermos con tifoidea en Estados Unidos por los años subsiguientes al uso de cloro como desinfectante. Además, el cloro se convirtió no solo en agente desinfectante, sino en un efectivo método de control de olor y sabor.

En los primeros años de la desinfección por cloro, la única fuente disponible de este era los compuestos secos, como hipoclorito de sodio -lejía- en polvo. Sin embargo, estos compuestos tenían una baja estabilidad, lo que generaba errores operativos, pues se usaban dosis que muchas veces no eran las adecuadas. Más adelante, por 1909, apareció el elemento en su forma líquida, que resulto mucho más efectiva y más fácil de usar. Hoy en día, hay tres formas de cloro que se utilizan: en su forma elemental, como gas comprimido; como hipoclorito de calcio; y como solución de lejía. (3)



*Based on Vital Statistics of the United States 1937, 1938, 1943, 1944, 1949, 1960, 1967, 1976, 1987, 1992, Historical Statistics of the United States—Colonial Times to 1970 Part 1.

Source: HealthSentinel.com.

Figure 1-1 US typhoid mortality and disease rates

Figura 1.4: Gráfico estadístico de la mortalidad por tifoidea en Estados Unidos por año, desde 1900 a 1966.

Para detectar la cantidad de cloro en una muestra de agua se debe controlar la cantidad de cloro residual. Este es el cloro que sobra luego de que una parte de lo agregado ha reaccionado con los microorganismos presentes en agua. Inicialmente, el indicador más claro que se usaba para saber si el agua poseía o no un buen nivel de cloro era detectar el olor característico de este. Sin embargo, esta no es una manera confiable, pues con ello no es posible tener una lectura cuantitativa para prever nuevas aplicaciones. Por ello, se desarrolló el método de

detección por ortotolidina, un compuesto que al tener contacto con agua clorada cambia de color y se torna amarillo. Se desarrollaron escalas colorimétricas, que determinaban con fidelidad el nivel de concentración de cloro en una muestra, sin importar su tamaño, por lo que el método colorimétrico de la ortotolidina se popularizó y expandió, desarrollándose nuevos estudios sobre la concentración adecuada de cloro en agua. Más adelante, se desarrollaron otros métodos de detección, como valorización diferencial amperométrica, examen de ortotolidina-arsenito, entre otros. En los últimos años, el método más aceptado para medir el nivel de cloro es el uso de N,N diethyl-p-phenylenediamina (DPD), una medición colorimétrica más estable y segura. (3) (6) (14)

1.2.4. Trihalometanos

Mientras los avances en los campos de la desinfección progresaban, nuevos estudios afloraban, pero no fue hasta los años 70s en los que se descubrió los productos secundarios de una excesiva desinfección por cloro. En Holanda, se descubrió que la reacción de cloro con los componentes orgánicos presentes en una muestra de agua genera unos subproductos llamados Trihalometanos (THM). Estos THM fueron identificados como posibles agentes cancerígenos, y fueron estos los que generaron la preocupación por el correcto control del nivel de cloro. Así, si antes no se tenía un correcto control del nivel máximo de cloro que el agua debía poseer, se comenzaron a crear estándares internacionales que limitaban la cantidad de cloro residual libre que debía existir en el agua. En Estados Unidos, por ejemplo, se creó la Ley de Desinfectantes y Subproductos de Desinfectantes (USEPA 2001), que estableció el límite máximo permitido (LMP) de THM en 80ug/L. Adicionalmente, se recomendaba un nivel máximo de 5 mg/L (ppm) de cloro en el agua. (9)

Si bien es cierto que el proceso de clorificación sigue estando bajo análisis para descubrir mayores subproductos de su uso y sus posibles consecuencias, está comprobado que es de vital importancia para garantizar la purificación y potabilización del agua, además de su papel importante en la salud pública. Por ello, es necesario un sistema de control y racionalización de su concentración en

los reservorios de agua, pues si bien no tener cloro es un peligro por la presencia de microorganismos, tampoco se le puede agregar demasiado por la posible formación de THM. (2)

1.2.5. El Proceso de Clorificación en una Planta

Actualmente, ya sea de manera automatizada o manual, se agrega la cantidad de cloro necesaria al agua para lograr la desinfección. Esto depende del volumen de agua a desinfectar, así como también de la concentración de cloro en el compuesto que se introduce. Vale la pena aclarar que el cloro como elemento químico no existe puro en la naturaleza debido a su reactividad. Por ello, para obtener la molécula de cloro (Cl_2) se usa el método de la electrólisis de salmuera. De esta manera, se consigue el gas de cloro licuado, que se guarda a presión. Tomando esto como premisa, se pueden formar otros compuestos químicos, como hipoclorito de sodio, ácido hipocloroso y ácido hidroc্লórico. (12)

Existen distintos métodos de tratamiento por cloro. Uno de ellos es el uso directo del cloro gaseoso, que se inyecta mediante válvulas a presión en los procesos en los que se requiera. Otro método usado ampliamente es la aplicación directa de hipoclorito de sodio al tanque de agua que se quiere tratar. El hipoclorito de sodio es lo que se conoce normalmente como lejía, pero para el tratamiento de agua se vende con una concentración diferente, más refinada. Otro método relacionado es el uso de dióxido de cloro, una alternativa al uso de hipoclorito de sodio, que surgió al saberse más información sobre los trihalometanos, y que además hace ya un tiempo viene siendo usado como MMS, una “cura milagrosa” de varias enfermedades, o al menos de tratamiento de dolor. (5)

Si bien es cierto, la ley peruana establece un rango de cloro residual libre en cualquier reservorio de agua de entre 0.5 ppm hasta un máximo de 5 ppm, el interesado en este proyecto requirió que la concentración debía mantenerse en un rango de entre 1.5 ppm y 2.5 ppm. Cabe resaltar que la ley referida se ha basado en la guía para el tratamiento del agua bebible de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que también recomienda un nivel de cloro residual libre en el agua de entre 0.5 y 5 ppm. (9)

1.3. Síntesis del Asunto de Estudio

El agua es esencial para el ser humano, a tal punto que solo puede vivir unos cuantos días sin ella. Sin embargo, el agua bebible es actualmente una muy pequeña parte de toda el agua existente en el planeta. Aun así, esta agua “dulce” todavía debe pasar por un tratamiento adecuado para que sea bebible sin traer efectos adversos al individuo, como diarrea, tifoidea y cólera (Enfermedades Diarreicas Agudas, EDA), producto de las bacterias y microorganismos que aparecen en el agua cuando esta queda destapada y empozada por un tiempo. Por ello, se han desarrollado varios métodos de desinfección de agua, pero el método más difundido y utilizado es la adición de cloro. Este elemento químico funciona como un excelente desinfectante, eliminando los agentes orgánicos presentes en el agua.

Cuando el uso potencial del cloro como desinfectante fue descubierto, aproximadamente en 1908, las EDA descendieron considerablemente en los lugares donde fue usado, y la facilidad de su implementación fomentó su rápida expansión por el orbe. En sus inicios, la única manera para conocer si el agua que se quería desinfectar tenía suficiente cloro era mediante el olor característico que este posee, pero sin embargo este método es inexacto y para nada fiable. Por ello, se fueron desarrollando otros métodos, como los métodos colorimétricos, que se basan en la comparación del color que se obtiene al agregar un reactivo en una muestra de agua con una escala de colores ya estandarizada. Estos métodos, como los son la ortotolidina y el DPD, son muy usados, siendo el primero el más expandido. Sin embargo, para los procesos de automatización se están utilizando los nuevos sensores industriales, que usando propiedades electroquímicas encuentran la cantidad de cloro residual en agua.

Adicionalmente, los trihalometanos, subproductos del cloro, pueden ser cancerígenos, por lo que la excesiva clorificación se debe evitar, hasta un rango conservador de máximo 5 ppm. Además, existen distintos métodos de tratamiento por cloro. Uno de ellos es el uso directo del cloro gaseoso. Otro método usado ampliamente es la aplicación directa de hipoclorito de sodio al

tanque de agua que se quiere tratar. Por último, otro método relacionado es el uso de dióxido de cloro.

1.5. Modelo Teórico:

Luego de una investigación respecto al tema en cuestión, y consultando a varios proveedores tanto nacionales como extranjeros, no se ha logrado encontrar un sistema que cumpla con las tres especificaciones dadas. Sí existen sistemas de control de cloro automático, pero estos sistemas funcionan todos a un nivel (y por lo tanto volumen) de agua fijo, por lo que la dosis de cloro que se le ingresa al reservorio es siempre la misma para obtener la concentración querida. Esto significa que, al no tener un control de la cantidad de agua real en el tanque, no se puede usar este método en la planta en cuestión, pues el volumen de agua varía sin un patrón de comportamiento fijo. Es por esto que al sistema se le agrega también un sensor de nivel. Además, este sistema también controla la bomba de recirculación, que permite la homogenización del cloro ingresado.

En cuanto a la medición de la concentración de cloro en agua, al principio se encontraron métodos colorimétricos, es decir se tenía dispositivos fotométricos que, luego de haberse aplicado el método de ortotolidina o DPD, cuantificaban el color de la muestra y de esa manera lograban determinar la concentración en el agua. Como este método involucraba el tener que preparar una muestra para luego ser analizada, y lo que se quiere es una autonomía del sistema, se optaron por otros dispositivos más sofisticados. Estos sensores de concentración de cloro se basan en un electrodo que, mediante reacciones químicas con el ion hipoclorito (parte del cloro residual libre) genera electricidad de manera proporcional a la cantidad de cloro libre y esta corriente es la medida por los instrumentos de control. Este método electrónico tiene una exactitud mucho mayor (pues no depende de la susceptibilidad al momento de comparar el color de la muestra con la escala de colores suministrada) y además es autónomo, pues no necesita de la acción humana más que para la instalación y calibrado, además de un mantenimiento periódico necesario en cualquier artefacto electrónico.

Se debe considerar que es necesario saber cuánta agua hay en el tanque para que el controlador pueda determinar qué cantidad de solución de cloro debe dosificar al reservorio, para que el nivel de ppm sea el adecuado. Para esto, se debe hacer uso de un sensor de nivel. En este campo y para este caso, se tenían estas posibilidades: usar una boya, un sensor de presión, un sensor infrarrojo o un medidor de ultrasonido. Cada posibilidad tenía sus ventajas y desventajas, pero finalmente se optó por el sensor de presión.

En un principio, se consideró también la opción de tener dos sensores de caudal, a la entrada y a la salida del tanque pulmón, para así poder determinar el volumen de agua en el tanque de una manera más fácil, pues solo se tendría que comparar los dos datos y restarlos. Sin embargo, esta idea no prosperó por dos razones fundamentales. Primero, en caso haya un corte de energía o una parada de emergencia, los datos de caudal de entrada y de salida se perderían, y para evitar esto se necesitaría guardar un registro del volumen actual en una parte de una memoria no volátil. Segundo, los sensores de caudal que serían adecuados para este proceso son mucho más costosos que la otra opción de sensor de nivel, aproximadamente 1500 dólares cada uno.

En el campo de los actuadores, se lograron encontrar dosificadores de baja potencia que sirven al propósito de este proyecto. Estos dosificadores funcionan a 220 voltios, por lo que se necesitara adicionalmente un circuito excitador que permita el encendido y apagado de esta pequeña bomba hidráulica. También se necesitará una electroválvula de 1 pulgada, pues actualmente se usa una válvula mecánica de bola para dirigir el agua a la sección de llenado o al recirculado. Como una recirculación del agua es necesaria para que el cloro sea uniforme en esta, tanto la electroválvula como la bomba electromecánica deben ser controladas por el circuito de control.

Para el circuito de control referido se hará uso de un microcontrolador, que reciba todas las señales, procese los datos y según estos envíe señales de control a los actuadores para que estos generen una acción física. Además, se tendrá un visualizador que indique la concentración de cloro que se ha medido, indicadores

visuales que servirán como indicaciones de los procesos de medición, clorificación, llenado, y algún tipo de error, y pulsadores o interruptores que controlen el encendido o apagado del sistema y el flujo de agua al proceso de llenado.

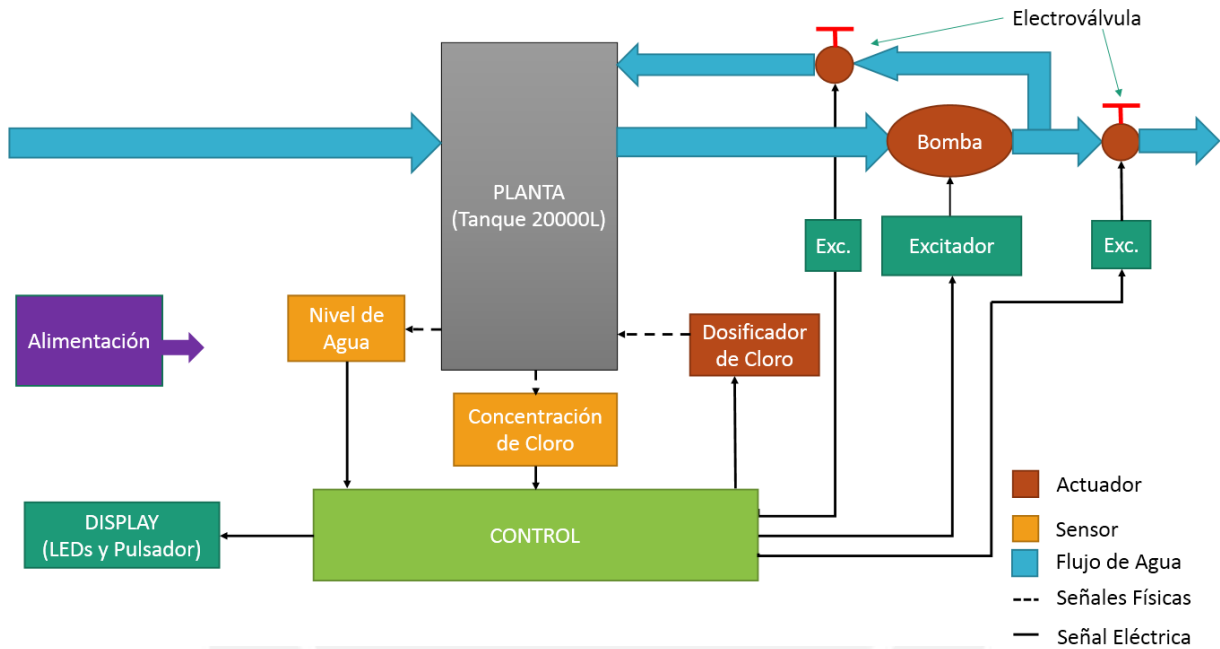


Figura 1.5: Modelo Teórico. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 2: Problemática de la Clorificación en una Planta de Agua

2.1. Insumos disponibles en el mercado

2.1.1. Sensores de concentración de cloro

En las imágenes (figuras 2.1, 2.2 y 2.3) se pueden observar distintas opciones nacionales a la solución del problema planteado. El primer equipo integra un dispensador de cloro junto con un sensor, y todo funciona en una configuración “online”, es decir, en línea con la recirculación de agua. Sin embargo, el mayor inconveniente de este equipo es que solo puede funcionar a un determinado volumen de agua fijo, por lo que no tiene la versatilidad requerida en este proyecto. (15)



Figura 2.1: Vista general del equipo controlador de pH y cloro amperométrico de la compañía TIHGSA (15)

Diagrama de instalación

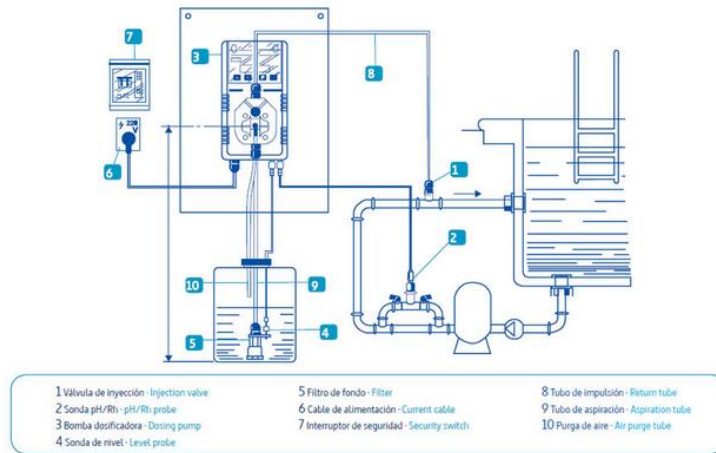


Figura 2.2: Diagrama de instalación del equipo controlador de pH y cloro amperométrico de la empresa TIGHSA (15)



Figura 2.3: Vista sin tapa del equipo monitor de nivel de cloro marca HF Scientific, importado por la compañía Ecofill S.A (22).

La anterior imagen es de un equipo detector de cloro cotizado por la empresa Ecofill. Este detector también tiene un visualizador en el que se pueden observar sus resultados y puede entregar estos datos a otro dispositivo en un rango de corriente de 4 a 20 mA. Su costo, sin embargo, es de 3500 dólares más IGV, además del reactivo consumible que se debe adquirir por separado y que tiene un costo de 80 dólares. Es, por lo tanto, una solución parcial pero excesivamente costosa que no satisface los límites establecidos por el proyecto.

En contraste, en la página alibaba.com, un sitio web de importaciones desde China, se han logrado encontrar una gran cantidad de sensores de cloro, con un precio mucho más accesible que el dado en el país, en un rango de entre 500 a 1000 dólares. Un ejemplo de sensor conseguible en Asia se puede observar en la figura 2.4. Todos son sensores electrolíticos que arrojan un rango de corriente de entre 4 a 20 mA y tienen la posibilidad (no es obligatorio) de incluir un visualizador para poder observar manualmente el nivel medido. Sin embargo, después de una exhaustiva búsqueda no se ha logrado encontrar un sistema integral de control de cloro, es decir, un sistema que no solo detecte una concentración anormal, sino que también la devuelva a sus valores deseados. Esto debido a que se necesitan datos del volumen de agua a tratar, y esto es variable en cada caso. (23)



Figura 2.4: Distintas versiones de un medidor electroquímico de cloro residual libre de la empresa Goldpoint (Shanghai) Instruments Co., Ltd (23)

2.1.2. Sensores de Nivel

Estos sensores son usados para obtener la altura de un líquido en un recipiente, sea el tanque pulmón o el reservorio de solución de cloro. Con esta medida de altura, se usará una fórmula matemática que permitirá saber el volumen de agua presente (la fórmula depende de la forma del recipiente) hasta que finalmente, con este volumen obtenido, el controlador podrá determinar qué cantidad de solución de cloro es necesario agregar para llegar a la concentración de cloro de 2.3 ppm.

En el mercado existen varios tipos de sensores de nivel, entre los cuales los más comunes y útiles se presentarán a continuación:

Flotador: este es un método tradicional para obtener una medición del nivel de agua en un recipiente. Consta de un flotador que, mediante una cuerda o una barra, pende del techo del recipiente y, cuando llega a un cierto nivel mínimo o máximo (como se haya configurado), activa un interruptor. Por lo tanto, este es más bien un interruptor on/off más que un sensor, pero aun así se usa en incontables aplicaciones.

Sensores de presión: estos sensores constan de un diafragma que mide la presión hidrostática generada en un punto al fondo del depósito. Como en ese punto la presión generada es la misma en todas las direcciones, se puede obtener la presión generada al fondo del recipiente, la cual es directamente proporcional a la altura. Para obtener la altura, solo se debe efectuar el cálculo de la ley principal de la hidrostática: $P = \rho \cdot g \cdot h$, siendo P la presión en pascales, ρ la densidad del líquido (en este caso 1000 kg/m³ por el agua), g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) y h la altura del líquido en metros. Entonces, como se conocen las dos constantes, una operación simple puede ayudar a determinar el nivel de agua sabiendo la presión. Existen tanto sensores de presión diferencial como absoluta, siendo la principal diferencia que los sensores diferenciales comparan entre dos distintas presiones, mientras que el absoluto solo entrega valores de una.

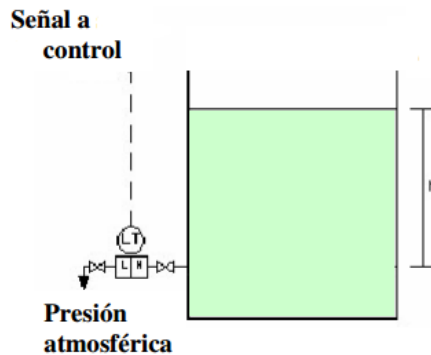


Figura 2.5: Modo de uso de un sensor de presión diferencial para la medición de nivel en un tanque.

Sensores por burbujeo: usando un tubo sumergido en el líquido, se hace circular aire gracias a un rotámetro. Luego se mide la presión hidrostática del aire en la tubería: esta presión es equivalente a la presión ejercida por el líquido.

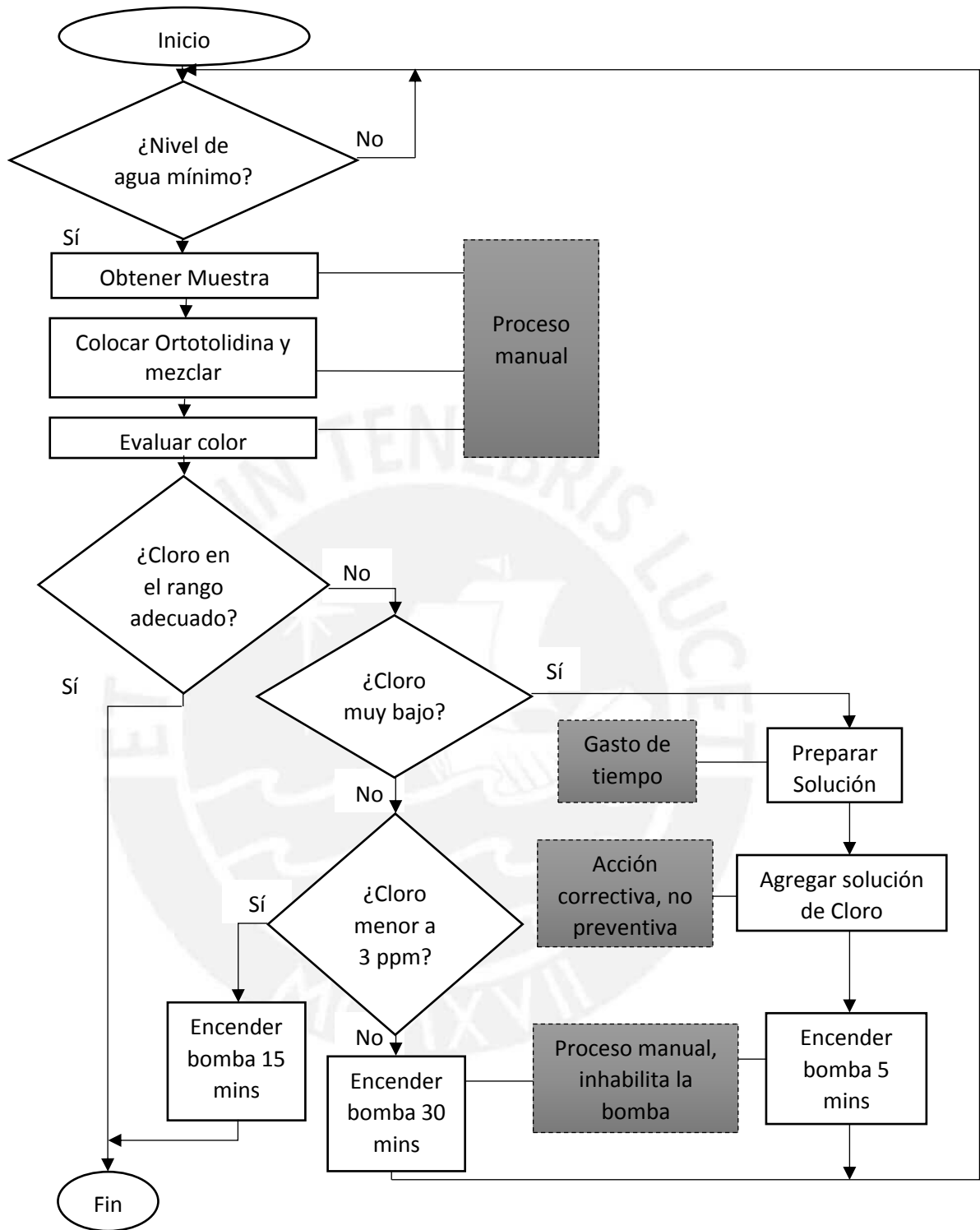
Sensores radioactivos: consiste en un generador de rayos X colocado a un lado del recipiente y un detector colocado al otro lado, que convierte la radiación recibida en una señal eléctrica. Ya que la materia que se va a medir tiene una cierta capacidad de difusión de radiación, la radiación captada es inversamente proporcional al nivel de fluido presente en el recipiente.

Sensores capacitivos: usando los mismos principios que un condensador, estos sensores miden la variación de capacitancia entre un electrodo sumergido y las paredes del depósito, que varía según el nivel de líquido presente en el tanque.

Sensores de ultrasonido: estos sensores emiten un pulso ultrasónico mediante un emisor y detectan el reflejo de este pulso con un receptor. Lo que entregan finalmente estos sensores, que normalmente vienen acoplados en una tarjeta, es un voltaje, que está en función al tiempo que se demora el pulso en regresar, lo cual a su vez depende de a qué distancia está el líquido a medir. (16)

2.2. Variables Internas: Proceso de Clorificación de Agua

En la figura 2.6 se explicará, mediante un diagrama de flujo, el proceso normal de clorificación en una planta de agua. Además, se señalarán los problemas encontrados en el proceso (con un recuadro gris), y estos problemas luego serán explicados en la siguiente sección.



2.6: Diagrama de Flujo del proceso de Clorificación en una planta de agua.
Fuente: Elaboración propia.

2.3. Problemas Identificados

En la tabla 2.1, se hace un resumen de los problemas encontrados en el diagrama de flujo anterior.

Tabla 2.1: Problemas identificados en el proceso de clorificación de una planta de agua.

| Problemas | Causas y Características |
|-------------------------------------|--|
| 1) Análisis manual del cloro | No entrega un número exacto, por lo que es complicado predecir el decaimiento de la concentración, con lo que se puede planear una estrategia. Los rangos de color saltan en intervalos relativamente grandes. |
| 2) Preparar la solución | Este proceso, de mezclar el hipoclorito de sodio granulado en agua, en una proporción de 20 litros a 200 mg, es un proceso relativamente lento. Además, como no se tiene un recipiente donde colocar la solución ya preparada, normalmente se prepara solo para el momento, lo que quita tiempo para otras cosas. |
| 3) Colocar manualmente la solución | Luego de preparar la solución, el encargado debe subir a la parte superior de un tanque mediante una escalera y echar la solución. Como la toma del tanque está al centro del tanque, el operario llega con dificultad y derrama un poco de la solución, lo que es un desperdicio de material. |
| 4) Encender la bomba de recirculado | Luego de colocar la solución exitosamente en el agua, esta se desplaza por el agua hacia abajo y se va esparciendo en forma cónica. Por ello, se debe recircular el agua con un circuito ya implementado. Ahora bien, al usar la bomba de salida de agua del tanque como recirculación, no se puede mandar el agua hacia el proceso de llenado, por lo que se produce una demora y un tiempo de espera en el cual nadie puede avanzar porque se debe esperar a que el agua se mezcle bien. |

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Declaración del Marco Problemático:

En el proceso actual en la planta de embotellado, el mantenimiento de la correcta concentración de cloro en el agua del tanque pulmón es esencial, pues como el proceso de tratamiento anterior entrega un flujo de agua pequeño en comparación al flujo que normalmente sale y se envasa, el agua se debe acumular en algún lugar por unos días para que luego se pueda llenar todo lo que se necesite sin tener que esperar. Es bien sabido que, si el agua se queda por mucho tiempo quieta en un mismo lugar, pueden presentarse microorganismos, por lo que esta concentración de cloro es muy importante para mantener la calidad del agua y que el proceso productivo no se frene.

Sin embargo, hoy en día el proceso es efectuado de manera completamente manual, pues el operario debe medir, con el método colorimétrico de la ortotolidina, la cantidad de cloro residual libre en el agua. Recién en ese momento, cuando el operario nota una descompensación en el nivel de cloro en el agua, es cuando comienza una acción correctiva, en vez de prevenir y mantener siempre el cloro en el nivel deseado. Este proceso manual se da normalmente en plantas de pequeña capacidad pues, en plantas más potentes, todos los procesos (incluida la clorinación) ya están automatizados.

Si el nivel de cloro es muy bajo, el operario debe recién preparar la mezcla (la cantidad es una medida que él deduce por las experiencias previas que ha tenido), colocar la mezcla en el tanque de agua (lo que puede ser complicado a veces y generar pérdidas de solución antes de entrar al agua), y encender la bomba de recirculación. Todo esto de manera manual, además del problema que acarrea el darse cuenta que la concentración es baja justo cuando se necesita llenar envases, pues en ese caso se debe esperar y parar toda la producción hasta que el nivel de cloro sea el adecuado. Ni que decir de la posibilidad que el operario, luego de echar el líquido, se olvide de encender la bomba, pensando que basta con echar el cloro al tanque, pues si bien al momento de corroborar los niveles nuevos de cloro marcará una distribución correcta (la salida de prueba

se encuentra en el mismo lado del tanque en el que está el orificio por donde se ingresa el cloro), cuando en algún momento se recircule y se vuelva a verificar se podrá notar que en verdad la cantidad de cloro no era la adecuada, y el error en la medición se debió a que la solución solo sirvió para una parte del tanque, por lo que tuvo la mitad del efecto que debía tener.

Si el nivel de cloro es muy alto, la única opción que tiene el operario es encender la bomba de recirculación para que con el movimiento el cloro se evapore más rápido; esta recirculación es mucho más larga que la que se necesita solo para mezclar el líquido recién echado, pero es aún más importante, pues si el cloro tiene una concentración muy alta, al momento de pasar el agua al post tratamiento, el filtro de carbón activado (encargado de retirar el cloro del agua que se envasará) se puede saturar, con lo que no cumplirá su trabajo y el agua envasada tendrá rastros de cloro. De esta manera se pierde también tiempo, pues el proceso se debe detener por más tiempo para esperar a que la bomba de salida de agua esté disponible para mandar el agua al proceso de embotellado.

Capítulo 3: Diseño y Desarrollo del Sistema de Clorificación

3.1. Alcance

La presente tesis se centra en la implementación de un sistema automático de clorificación de un tanque pulmón de 20 000 litros, que es usado para el proceso de embotellamiento de agua Chuquitanta, para una empresa privada. El nivel de agua en un tanque cilíndrico recostado es variable (entre 30 a 247 centímetros), como también la concentración de cloro, que debe encontrarse en 2.3 ppm, con un margen de error de +/- 0.2 ppm. Para dosificar la solución de cloro al tanque pulmón, se hará uso de una bomba dosificadora de solución. Esta solución, preparada manualmente por el usuario, estará almacenada en un pequeño tanque de 20 litros, por lo que se debe también controlar el nivel de líquido en ese tanque para asegurar que el volumen sea mayor a 6.13 litros.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control y monitoreo de la concentración de cloro en el agua de un tanque pulmón de 20 000 litros.

3.2.2. Objetivos específicos

- Acoplar adecuadamente al sistema los tres sensores necesarios: sensor de concentración de cloro, con un rango de 0 a 5 ppm y una exactitud de 0.1 ppm; sensor de nivel para el tanque pulmón, con un rango de 30 a 247; y el sensor de nivel para el tanque de 20 litros. Además, diseñar e implementar sus respectivos acondicionadores de señal.
- Dado que los sistemas de potencia ya han sido heredados por el cliente, diseñar e implementar los circuitos de excitación de estos elementos (electroválvulas, bomba de salida) para así permitir la interacción entre estos y el bloque de control.

- Diseñar un bloque de control que permita controlar el nivel de la solución de cloro en un pequeño tanque de almacenaje, controlar correctamente la bomba monofásica de 1 HP de salida de agua del tanque, implementar un sistema de selección de electroválvula y controlar la bomba de dosificación de solución de cloro.
- Implementar una interfaz de usuario en el tablero de control, en la que se pueda visualizar luces que indiquen los estados más importantes, además de poseer un selector que permita intercambiar entre modo de recirculado y modo de llenado.



3.3. Diseños y esquemáticos

El diagrama de bloques que permite implementar la solución, es el mostrado en la figura 3.1.

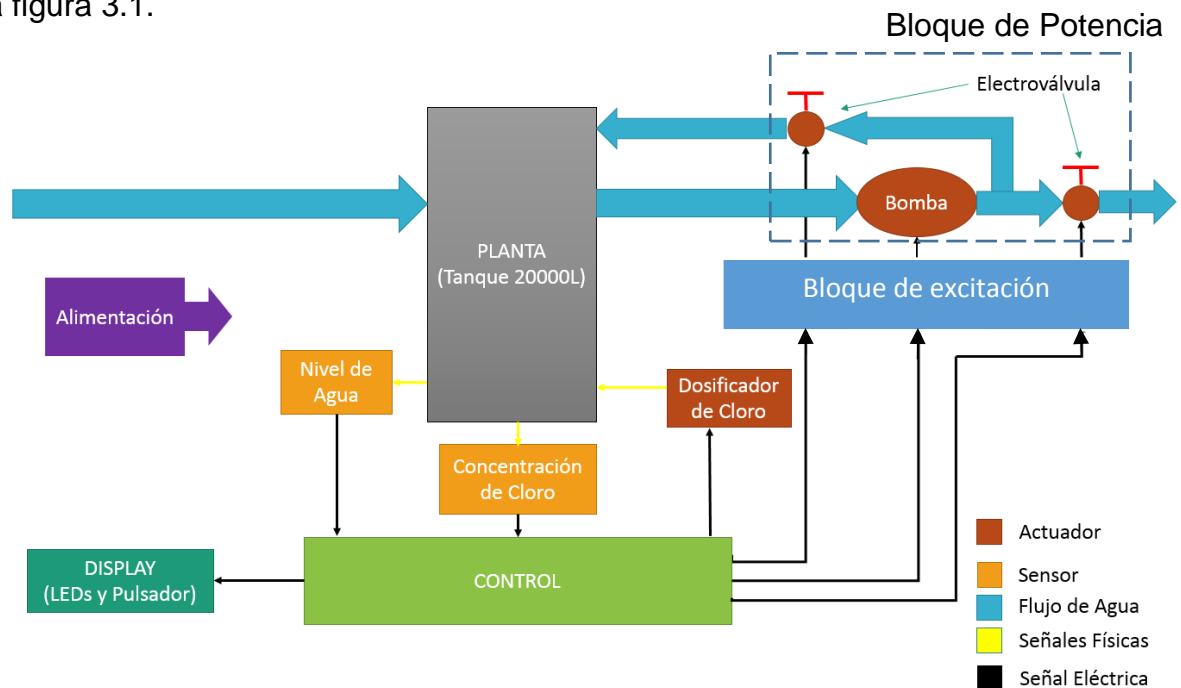


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procederá a desarrollar cada bloque, explicando en detalle la solución planteada para cada uno.

3.3.1 Planta

Este bloque consta de dos elementos. El primero y fundamental es un tanque de agua, de hierro y al interior recubierto de un agente protector. Su capacidad es de 20000 litros aproximadamente, tiene la forma de un cilindro echado, con un diámetro de 2.47 metros y un largo de 4.68 m. A continuación, se muestra una fotografía del tanque referido:



Figura 3.2: Fotografía del tanque pulmón.

El segundo elemento es un recipiente de líquido de 20 litros, donde se piensa colocar la solución preparada de cloro, que será luego usada para clorificar el agua del tanque más grande. Este recipiente es un bidón de agua para consumir en el hogar. También es cilíndrico, con un diámetro de 25 centímetros y una altura de 36 centímetros. La siguiente imagen corresponde a este recipiente:



Figura 3.3: Fotografía del tanque de solución.

3.3.2 Bloque de Potencia:

Para el bloque de potencia se necesitan tres elementos. Primero, una electroválvula que permita el recirculado de agua, necesario en la mayoría de procesos de este sistema. Segundo, una electroválvula que permita la salida de agua desde el tanque pulmón hacia la etapa de llenado. Tercero, una electrobomba que permita mover el agua, tanto en recirculado como en salida.

Los tres elementos deben tener un diámetro de boca de una pulgada, pues todo el sistema de tubos utiliza este ancho, y deben funcionar a 220 voltios, 60 hertz.

Para la selección de estos componentes se tienen en cuenta varios aspectos, entre ellos precio, capacidad y conveniencia para el usuario. Se necesita una potencia de bombeo de entre 3/4 HP a 1.5 HP máximo; estos valores se obtienen de las limitaciones del sistema, obtenidos empíricamente: una potencia de bombeo menor a 3/4 de HP no alcanzaría para que el agua pase por las siguientes etapas (filtro de carbón activado, UV y filtrado normal, además de elevación al tanque de llenado), mientras que una potencia de bombeo mayor a 1.5 HP saturaría el filtro de carbón activado. También es importante que el diámetro de descarga sea de 1 pulgada, pues todo el sistema funciona con ese diámetro. Se tomaron en cuenta cuatro opciones de electrobombas, las cuatro monofásicas: una bomba centrífuga de 1 HP marca DAB (599.90 soles), una bomba Jet de 1 HP marca DAB (799.90 soles), una bomba centrífuga que ya se encuentra en posesión del usuario y con la que trabaja normalmente, de 1 HP; y una bomba centrífuga de 0.85 HP marca Pedrollo (599.90 soles). Las cuatro bombas cumplen con las especificaciones requeridas. Si no se tuviese ninguna de ellas, la opción más adecuada sería obtener la bomba Pedrollo, siendo esta una buena marca, de calidad, con un precio aceptable y la potencia dentro del rango buscado. Sin embargo, como el usuario ya tiene en su posesión la bomba centrífuga de 1 HP antes referida, se usará esta, para ahorrar costos y sabiendo que también cumple con todas las especificaciones antes planteadas.

Para las electroválvulas solo se debe tener en cuenta que la boca debe ser de una pulgada, y que deben trabajar a 220 voltios, 60 hertz. En puestos de venta especializados, las válvulas tienen un costo promedio de 250 soles, pero visto que el usuario también cuenta con dos electroválvulas de estas características, serán heredadas para el proyecto.

3.3.3 Bloque Excitador

3.3.3.1 Electrobomba:

Requerimientos:

La electrobomba de agua que se desea automatizar es un motor monofásico, con salida de una pulgada, funciona a 220 voltios y tiene como potencia nominal 1 HP. Lo que se necesita es que esta bomba pueda ser controlada, es decir, encendida y apagada, por el microcontrolador, de manera que pueda este regular el tiempo de uso de la bomba, tanto para el recirculado como para el llenado.

Alternativas:

Para el excitador de un circuito de potencia monofásico se consideraron dos opciones. La primera fue usar un relé electromecánico, y la segunda fue usar un arreglo de optotriac que comprende el mismo optotriac y un Triac de potencia.

Tabla 3.1: Selección del excitador de la electrobomba.

| | Relé | Optotriac |
|----------------------|---|--|
| Excitación requerida | 12 voltios DC, la bobina es alimentada con una mayor corriente (aproximadamente 300 ma) de excitación para efectuar la conmutación. | Puede ser excitado por el mismo controlador, requiere una menor corriente (solo para el LED). |
| Duración | La juntura mecánica se desgasta con el tiempo relativamente pronto. | Por ser una conmutación electrónica, el componente dura mucho más, no se desgasta y es silencioso. |
| Potencia requerida | Por poseer una bobina de excitación, necesita de más corriente, consumiendo más energía. | Requiere de baja corriente de excitación, lo que también implica menor potencia. |
| Costo | 1.50 soles | 5.00 soles |
| Practicidad | Circuito simple de implementar, aunque el componente en sí es grande y ocupa mayor volumen. | Circuito simple de implementar (ejemplo en hoja de datos), componentes más pequeños y más simples. |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección: para este circuito se consideraron los siguientes criterios:

Teniendo en consideración el espacio que ocupa, la capacidad de corriente y la duración del circuito, finalmente se optó por el arreglo del optotriac y Triac.

Esquemático:

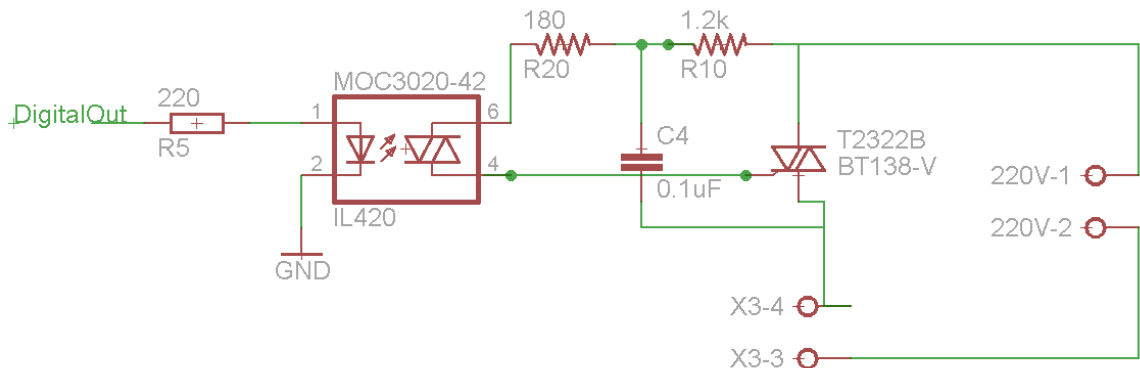


Figura 3.4: Esquemático del arreglo de optotriac y Triac de potencia. Fuente: Elaboración propia.

Este arreglo tiene dos partes fundamentales: el optoacoplador (MOC) y el Triac:

Para la selección del optoacoplador, se tenían tres modelos de MOC: 3021, 3022 y 3023. La diferencia entre ellos radica en que la corriente máxima de disparo (IFT) que pasa por el LED infrarrojo es de 15 mA para el 3021, 10 mA para el 3022 y 5 mA para el 3023. Por comodidad, se plantea usar el MOC3021, porque es fácil de conseguir en el mercado local. Para elegir la resistencia que limita la corriente entregada al diodo LED interior al optoacoplador, se hace uso del parámetro encontrado en la hoja de datos del MOC3021, IFT. Este dato hace referencia a la corriente mínima que debe pasar por el diodo LED para asegurar su activación. Como en el MOC3021 esta corriente es 15 mA, y la caída de tensión, según hoja de datos, es de 1.15 V en el LED, se calcula que la resistencia debería ser 257 ohmios. El valor comercial más próximo es 220 ohmios, que permite obtener una corriente de 17.5 mA, que cumple con las especificaciones. (17)

Para la selección del Triac se tomaron en cuenta las siguientes variables: precio, comodidad y capacidad de corriente. En este caso, la carga más grande es la

electrobomba, que con 220 voltios y 1 caballo de fuerza (746 watts) de potencia, así como un factor de potencia de 0.86 (Anexo 2), requiere de una corriente de 3.94 amperios. Teniendo entonces el parámetro de la corriente con un margen de seguridad de 50%, y sabiendo que el voltaje de trabajo del triac es de 220 voltios (y sabiendo que un circuito Snubber reducirá la dv/dt), se contemplaron varias opciones, entre las cuales destacan el BT138 y el MAC8DG. La diferencia principal entre los dos es la corriente de disparo de compuerta: los valores del BT138 son menores que los del MAC8DG. En este caso se optó por el BT138 de NXP semiconductors, un Triac disponible en el mercado local y con una capacidad de corriente de 12 A, que cumple con las especificaciones del motor (18).

En cuanto a los dos componentes que acompañan al Triac, la resistencia y el condensador, estos forman un circuito Snubber, que protege de picos transitorios de señal, pues el motor es una carga inductiva. Estos picos pueden ocasionar que el Triac se dañe seriamente (o se active involuntariamente) al recibir una gran sobretensión entre sus terminales, si la dv/dt (variación de voltaje en el tiempo) no es lo suficientemente rápida. Con el circuito Snubber, ese pico es controlado, pues el voltaje en un condensador no puede cambiar intempestivamente. Siguiendo las recomendaciones del fabricante en la hoja de datos del MOC3021, se colocan los valores mostrados en el esquemático, y se comprueba su funcionamiento. (17, 20 y anexo 9)

3.3.3.2 Excitadores de electroválvulas

Para elegir los excitadores de las electroválvulas se seguirá el mismo proceso que se utilizó con la electrobomba, usando las mismas comparaciones y decisiones para sus componentes, pues las válvulas también se activan con 220 voltios. En este caso, ya se eligió como circuito excitador el arreglo de optotriac, con el mismo MOC3021 como optoacoplador. En cuanto al triac, se barajaron más opciones adicionales a los circuitos integrados usados con la bomba, pues las electroválvulas necesitan menos corriente para mantenerse encendidas. Se agregaron los triac BT134 (4 A) y BTA204 (4 A). También por la disponibilidad

del componente en el mercado y su cumplimiento de las demás especificaciones para el circuito, se elige el BT134. (19 y 21)

En cuanto al circuito Snubber, también se usan los mismos valores que el circuito de la electrobomba, pues la protección contra una alta dv/dt sigue siendo necesaria con este triac.

3.3.4 Bloque Dosificador de Solución de Cloro

Requerimientos: Para esta función se necesita un dispositivo que pueda extraer del tanque de solución de cloro (de 20 litros) la cantidad de solución que sea necesaria para clorificar el agua presente en el tanque pulmón. No es necesario tener un muy alto flujo de entrada: se efectuaron cálculos para determinar qué cantidad de cloro se debería ingresar al tanque en caso éste se encuentre lleno y no presentase ningún indicio de cloro, considerando la capacidad total del tanque (20000L), el valor de ppm deseado (2.3 ppm) y la concentración de la solución de cloro (10 g de Cl_2 en 1 litro de agua). El resultado arrojó un total de 6.13 litros de solución, en el caso extremo indicado.

Alternativas: Para este caso se evaluaron dos opciones: un dosificador de émbolo SmartProducts y una bomba dosificadora Acquatron:

Tabla 3.2: Selección de dosificador de solución de cloro.

| | Émbolo SmartProducts (Anexo 6) | Bomba dosificadora Acquatron (Anexo 7) |
|----------------------|--------------------------------|--|
| Precio | 210 soles | 225 dólares |
| Flujo | 9 litros por hora | 1.5 litros por hora |
| Consumo de corriente | 150 mA | 1 A |
| Voltaje de operación | 12 VDC | 220 VAC |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección: Se decide finalmente optar por el dosificador tipo émbolo de la marca SmartProducts, por su menor precio y su flujo, pues el sistema debe ser capaz de dosificar (en un caso extremo) 6.13 litros de solución de cloro en menos de 2 horas.

Para usar este dosificador se necesita un circuito que sea capaz de encenderlo y apagarlo según el bloque de control lo considere conveniente. Como el motor

que mueve el émbolo es un motor DC, se usará un Mosfet canal N, con capacidades de corriente de drenador normalmente superiores a 1 A, que puede satisfacer esta necesidad.

El dosificador funciona con 12 voltios y consume normalmente 150 mA. Sin embargo, cuando una carga inductiva (como el motor DC) deja de ser alimentada, puede generar sobrepicos de tensión que pueden dañar el elemento interruptor si es que este no soporta ese nivel de tensión, por lo que se colocará también un diodo en anti paralelo de protección. Una gran opción es el RFP2N10L (32), con Vds de 100 voltios e Id de 2 A. Otra opción, ya con un Vds superior de 250 voltios, es el FQPF3N25 (33), con una Id de 1.15 A. El problema con estos componentes es que son difíciles de encontrar en el mercado local, pues los más comunes son los Mosfet de potencia, como el IRF540 (34), con un Vds igual a 100 voltios y un Id igual a 28 amperios. Ya que este último Mosfet satisface los requisitos del proyecto, y es fácil de encontrar en el mercado local, se elegirá para encender o apagar el dosificador.

Esquemático:

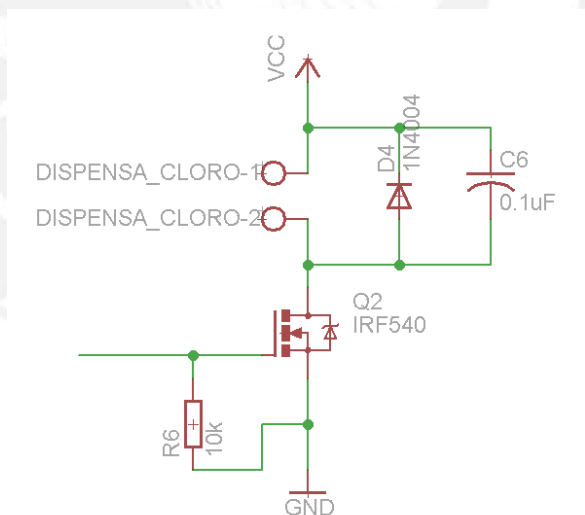


Figura 3.5: Esquemático del dosificador de solución de cloro. Fuente: Elaboración propia.

En este diseño, la resistencia de 10 kOhm funciona como Pull Down, para asegurar el valor de 0 voltios cuando la salida del microcontrolador se encuentra en “0” lógico.

El diodo en paralelo al dosificador permite proteger al Mosfet de los sobrepicos de tensión generados cuando el motor deja de funcionar (el Mosfet pasa a estado de corte nuevamente), pues el motor DC tiene un comportamiento altamente inductivo. Esto ocasiona que, al dejar de recibir corriente, la inductancia de este motor comience a entregar corriente (como un generador) en sentido contrario, pudiendo dañar el componente conmutador. El diodo conectado en paralelo permite un camino alterno por el cual la corriente se puede descargar sin dañar ningún componente. En este caso se usó un diodo 1N4004, que tiene la capacidad de resistir el paso de 1 A de corriente, suficiente para la aplicación que se le quiere dar. (35)

El condensador de 0.1 uF en paralelo con el dosificador se utiliza por las siguientes razones. Primero, permite disminuir el ruido electromagnético producido por el desplazamiento del rotor y que finalmente genera ondas de radio que interfieren con otros equipos electrónicos. Segundo, permite evitar o al menos disminuir la cantidad de arcos de voltaje generados con el funcionamiento del motor, lo que aumenta el tiempo de vida útil del motor y de los componentes del circuito. (38)

3.3.4 Bloque Sensor

3.3.4.1 Concentración de Cloro

Requerimientos: Para el sensor de concentración de cloro se tenían las siguientes necesidades: el sensor debía tener un rango mínimo de 0 a 5 ppm (9), pues estos son los valores críticos a los que estará sometida la planta. El sensor también debía tener la capacidad de medir la concentración de cloro sin importar cuánta agua esté presente en el tanque, pues este factor es variable siempre.

Alternativas: Se contemplaron varias opciones, tanto las disponibles en el mercado local como las posibilidades de importación. Por parte del mercado local, las más sonadas fueron el sensor de pH y cloro amperimétrico de la marca Tihgsa (15) y el monitor de nivel de cloro de marca HF Scientific, importado por

Ecofill S.A. (22). Sin embargo, estas opciones tenían una serie de desventajas. El equipo de la marca Tihgsa, que permitía un control completo del cloro en un tanque de agua, solo funcionaba correctamente si el reservorio siempre tenía el mismo volumen de agua. Este sensor está más pensado para piscinas, en donde el nivel siempre debe mantenerse aproximadamente igual. El equipo HF Scientific, si bien sí permite obtener de manera electrónica el valor de concentración de cloro en agua, tiene un costo elevado de más de 3500 dólares, a los que se tiene que adicionar su químico respectivo, cuyo valor ronda los 80 dólares. Un valor muy alto para el proyecto en cuestión, por una solución que no necesariamente cubría a la perfección.



Figura 3.6: Vista sin tapa del equipo monitor de nivel de cloro marca HF Scientific, importado por la compañía Ecofill S.A. (22).

Una vez descartada la posibilidad de adquirir el sensor en el país, se comenzó a indagar en mercados extranjeros, por páginas de compras en línea como alibaba.com, aliexpress.com, amazon.com, etc. Fue en las dos primeras en donde se encontró una gran variedad de sensores, de precios muy variados y de rangos también diferentes. Sin embargo, las negociaciones con esas páginas tomaron un tiempo sobre todo por la necesidad de reconfirmar el precio mostrado inicialmente en las páginas del producto, precio que normalmente era usado para atraer la atención del consumidor, pero una vez en contacto con el vendedor, se mostraba un precio mayor al original. Las características comunes de los sensores manufacturados en China eran las siguientes: rango de ppm personalizable, necesidad de conectarse en línea con el flujo de agua (obtienen

datos válidos solo cuando pasa un flujo constante a través de la sonda) y la necesidad de que la sonda esté conectada a un módulo que traduzca la señal pequeña de la sonda, la interprete y la transforme en una salida de 4 a 20 mA. Se encontraron precios muy variados, cuyo promedio era 800 dólares, y en general dos tipos de sonda: las “independientes” (que teóricamente no dependían de un módulo, pero que necesitaban de un circuito muy sensible para traducir la señal que emitían) y los que se presentaban con módulo, que se encargaban completamente de la señal y que entregaban un rango de corriente de 4 a 20 mA. (23)



Figura 3.7: Distintas versiones de un medidor electroquímico de cloro residual libre de la empresa Goldpoint (Shanghai) Instruments Co., Ltd. (36).

Criterios de selección: Finalmente, después de una evaluación y constante comunicación con los proveedores chinos se eligió, por cuestiones de precio, comodidad y cumplimiento de las especificaciones del proyecto, el sensor ARCL200 de la marca Anrui, por el precio de 615 dólares. (Anexo 5)



Figura 3.8: Vista del módulo del sensor de concentración de cloro ARCL200, de la marca Anrui. Ver anexo 5.

Este sensor permite programar el rango de cloro que va a medir. Es decir, el módulo soporta hasta 20 ppm, pero si ha sido programado para medir de 0 a 5 ppm, a partir de este último valor el módulo arrojará una corriente de 20 mA. Además, el paquete del sensor incluye la sonda, con un cable de 3 metros, y la celda de flujo, un compartimiento de acrílico resistente que sirve para colocar la sonda y permitir que el agua trascurra por dentro.

3.3.4.2 Sensor de Nivel de Agua en el Tanque Pulmón

Requerimientos: Como ya se expresó anteriormente, medir el nivel de agua en el tanque es necesario para saber cuánto volumen de agua está presente en él, y de esa manera calcular la dosificación de cloro. Hay que tomar en cuenta, sin embargo, que un valor muy exacto del nivel de agua no es necesario, pues un error de unos cuantos litros de agua en el tanque no afecta demasiado a la cantidad de cloro que se le debe agregar de todas maneras.

Alternativas: Existen varios tipos de sensores de nivel, como por ejemplo flotador, capacitivo, de presión, infrarrojo, con ultrasonido, entre varios otros. Para este proyecto se consideraron tres de ellos, se evaluaron y se tomó una decisión.

Tabla 3.3: Selección del sensor de nivel de agua en el tanque pulmón.

| | Sensor de Ultrasonido HC-SR04 (24) | Sensor de Presión Absoluta MPXM2053GS (25) | Sensor Infrarrojo SHARP GP2Y0A21YK0F (26) |
|-------------------|--|--|--|
| Adaptación | El circuito electrónico es simple, pero se requiere de un compartimiento especial que se abra y se cierre para protegerlo de la humedad. | Se necesita un amplificador de instrumentación (INA) para obtener valores medibles por el bloque de control. | El circuito electrónico es simple, pero se requiere de un compartimiento especial que se abra y se cierre para protegerlo de la humedad. |
| Alimentación | 5 voltios. | 10 a 16 voltios. | 4.5 a 5.5 voltios. |
| Practicidad | No necesita acondicionador, pero necesita carcasa de protección. | Necesita un INA y una pequeña manguera para percibir la variación de presión de aire en ella por el aumento del nivel de agua. | No necesita acondicionador, pero necesita carcasa de protección. |
| Costo | 15 soles + el costo de elaborar una carcasa protectora con puerta y con motor de pasos. | 6.89 dólares + envío + INA (12 soles). | 12 dólares + envío + circuito amplificador + el costo de elaborar una carcasa protectora con puerta y motor de pasos. |
| Duración | Visto que estaría dentro del tanque, la humedad terminaría por deteriorarlo rápidamente. | No está en contacto directo con el agua, por lo que su deterioro sería más lento. | Visto que estaría dentro del tanque, la humedad terminaría por deteriorarlo rápidamente. |
| Rango de medición | 2 cm a 4 m. | 2 kPa a 50 kPa. | 10 a 80 cm. |

Fuente: Elaboración Propia.

Criterios de selección: Para tomar una decisión, se tomó en cuenta que la durabilidad de las tres opciones es diferente: por estar colocado en un ambiente con alta humedad (dentro del tanque pulmón), los sensores ultrasónico e

infrarrojo se deteriorarían rápidamente. En cambio, el tubo del sensor de presión está sellado y es la membrana la que está en contacto con la humedad, por lo que los circuitos internos no se verían tan comprometidos. Adicionalmente, el costo de elaborar un compartimento tanto para el sensor ultrasónico como para el sensor infrarrojo dentro del tanque hubiera sido elevado, y la elaboración, tediosa. También es evidente que el sensor infrarrojo no posee el rango máximo necesario para esta aplicación. La adaptación del sensor de presión es mucho más simple, y cumple con el objetivo de obtener el nivel de agua en el tanque. Por ello, finalmente se elige el sensor de presión MPXM2053GS.



Figura 3.9: Sensor de presión absoluta de 50KPa MPXM2053GS (37).

3.3.4.3 Sensor de Nivel de Solución de Cloro en el Tanque de 20 litros

Requerimientos: En este caso, medir el nivel de solución de cloro disponible es importante para asegurar que, en caso sea necesario, el bloque de control dispone de solución para clorificar. En caso no haya solución, el sistema debe avisar este estado de una manera explicada más adelante, pues de no haber solución el bloque de control debe saber que no debe activar el dosificador. Vale recalcar que el bloque de control no necesita el nivel exacto de solución en el tanque de agua, solo monitoriza que esta solución se encuentre por encima del valor mínimo permitido.

Alternativas: Como opciones para medir el nivel de solución de cloro se barajaron las tres posibilidades anteriores.

Criterios de selección: El sensor de ultrasonido fue descartado por las mismas razones del caso anterior, por el precio elevado de su adaptación y la susceptibilidad a la humedad. El sensor infrarrojo, en cambio, se descartó por dos factores. El primero fue el precio, un poco superior, en conjunto, al del sensor de presión. El segundo factor fue el consumo de corriente. Según sus respectivas hojas de datos, el sensor infrarrojo típicamente consume 30 mA, mientras que el sensor de presión consume 6 mA.

Por lo tanto, se escogió para medir el nivel de solución de cloro, de manera similar al caso anterior, el sensor de presión MPXM2010GS, un sensor con las mismas especificaciones del MPXM2053GS excepto que su rango de presión va de 0.5 kPa a 10 kPa. Esta presión menor se eligió ya que se calculó y comprobó que la presión que ejerce la solución en la manguera cae dentro de ese rango. (27)

3.3.5 Bloque Acondicionador de Señal

3.3.5.1 Sensor de presión del tanque de solución

Requerimientos: Si bien la relación entre nivel de agua y voltaje entregado por el sensor de presión es casi perfectamente lineal (ver anexo 3), este voltaje entregado es muy bajo, y se debe amplificar para que pueda ser leído por el ADC del microcontrolador. Por lo tanto, se deben buscar amplificadores que tengan ese rango, pero sobre todo que mantengan la linealidad y sean lo más exactos y precisos posibles, pues con estos pequeños voltajes una variación nunca es pequeña. Cabe resaltar también que el sensor arroja un voltaje diferencial, es decir, tiene dos patas de salida, las cuales tienen voltajes referidos a tierra que se diferencian en una pequeña parte, y es esta diferencia la que se debe amplificar.

Si se quiere elegir un amplificador, se debe tener en cuenta la Relación de Rechazo al Modo Común (CMRR). Ahora bien, el tanque de 20 litros que se usó para este caso genera una presión en el sensor, al estar completamente lleno, de 4.21 kPa, lo que en voltaje se traduce a 11 mV. Sin embargo, el valor que se quiere detectar como mínimo indispensable es de 6.13 litros, o en voltaje 3.18

mV. Lo que se busca es que el voltaje en modo común en la entrada del INA sea reducido a un voltaje que no afecte a la detección de los 3.18 mV del nivel mínimo. Esto implicaría que ese voltaje de desplazamiento (offset) sea 4 veces menor a 3.18 mV, es decir, 0.795 mV.

El margen de error se calcula analizando el peor escenario. Ya que el sensor de nivel en el tanque de 20 litros se usará para indicar que en el mismo tanque hay suficiente solución para clorificar el caso extremo (20000 litros de agua a 2.3 ppm), se debe primero encontrar el valor mínimo de solución para este caso. Resolviendo la ecuación siguiente, se calculó que se necesitan 6.13 litros de solución para clorificar 20000 litros de agua a 2.3 ppm. Este valor crítico es el que se debe buscar, aunque luego se debe afinar con el cálculo de error posterior.

$$\text{litrosSolución} = \frac{\text{VolAgua} \cdot \Delta\text{ppm}}{7500} \quad (\text{Anexo 4})$$

En este caso, el voltaje en modo común del sensor es de 6 voltios, así que, calculando el CMRR mínimo necesario en los amplificadores, este resulta 77.56 dB.

Alternativas: Como opciones para el amplificador de la señal, se proponen los Amplificadores de Instrumentación INA122 e INA126, ambos de TI:

Tabla 3.4: Selección de amplificador de instrumentación para sensor de 10 KPa.

| | INA122 | INA126 |
|--------------------------------|---------------------------|---|
| Costo | 52.20 soles | 12 soles |
| CMRR | 90 dB | 90 dB |
| Desplazamiento en Salida | (V+) - 0.05 (V-) + 0.1 | (V+) - 0.75 (V-) + 0.8 |
| Riel a Riel | Si | No |
| Ecuación de Ganancia | 5+200Kohm/Rg | 5+80Kohm/Rg |
| Alimentación | Asimétrica, 2.2V a 36V | Dual o asimétrica, +/- 1.35V a +/- 18V |
| Offset | +/- 150 uV | +/- 100 uV |
| Rango de voltaje en modo común | 0V a 3.4V | -11.5V a 11.5V |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección: Las diferencias entre ellos radican en la fórmula de ganancia, la mayor sensibilidad en el voltaje de salida del INA122 por ser Riel a Riel, el precio superior del INA122 sobre el INA126 y el rango de voltaje en modo común que pueden manejar. No es necesario para el proyecto que el amplificador sea Riel a Riel, pues no se usará el rango máximo. Tampoco es elemental que el amplificador tenga alimentación asimétrica, y se aprecia que el offset es insignificante comparado con las tensiones que maneja el sensor de presión. Sin embargo, el parámetro realmente importante en este caso es el rango de tensión en modo común, pues sabiendo que la tensión del sensor en modo común es de 6 voltios, se aprecia que el INA122 no cumpliría con las especificaciones del sensor. Visto que el INA126 sí cumple con estas especificaciones, y su CMRR también es superior al mínimo definido anteriormente, se elige finalmente al INA126 (28 y 29).

Para este diseño, se alimentó al INA126 y al sensor de presión con una tensión de 12 voltios, y la resistencia de ganancia R_g se obtiene con un potenciómetro de precisión.

Para obtener la ganancia del INA se hicieron experimentos con el mismo recipiente en el que se colocará la solución de cloro, probando con distintos volúmenes y niveles. Para esto se debió considerar que la salida del amplificador será dirigida hacia un conversor analógico-digital para ser procesada por el bloque de control. Este ADC tiene como valor máximo 5 voltios, por lo que ese fue el tope. Además, se comprobó con el Simulador Multiparámetros Fluke ProSim4 que cuando el tanque está lleno con 20 litros de líquido, genera una presión en el sensor de 3.71 kPa, lo que se traduce en el sensor a una diferencia de tensión de 11 mV. Por lo tanto, si se quiere obtener que este máximo se encuentre dentro del rango de detección del ADC, se amplifica 12 mV (un poco más por seguridad) a 5 voltios, dando como resultado una ganancia de 417.

Entonces, según el propio fabricante, si se quiere una ganancia de 417 se debe colocar una resistencia tal que cumpla que:

$$G = 5 + \frac{80K\Omega}{R_g}$$

Por lo tanto, R_g debe ser 194.17 ohmios. Para lograr este valor, se recurrirá a un potenciómetro de precisión, que pueda ser montado en tarjeta y que permita, con un perillero, lentamente ir ajustando el valor de R_g hasta el valor deseado.

Esquemático:

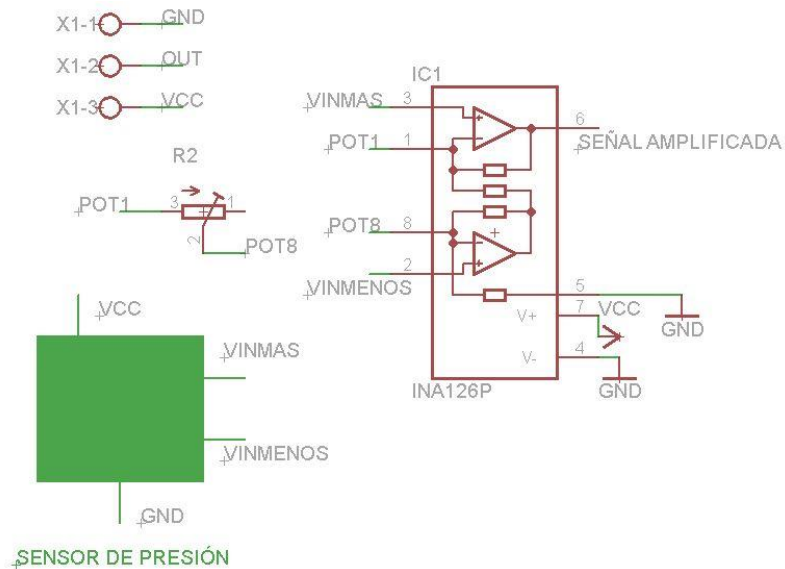


Figura 3.10: Esquemático del acondicionador de señal del sensor de presión de 10 KPa. Fuente: Elaboración propia

3.3.5.2. Sensor de Presión del tanque pulmón

Requerimientos: Análogamente al caso del sensor de 10 kPa, se tiene que este sensor también arroja un voltaje lineal, pero en el orden de los mV, por lo que necesita una etapa de amplificación. Sin embargo, en este caso sí se efectúa una medición de distancia, pues es necesario conocer el nivel de agua para así calcular el volumen de agua presente, lo que a su vez permitirá calcular la cantidad de solución de cloro que es necesario dosificar.

Para calcular el CMRR del amplificador del sensor del nivel de agua en el tanque pulmón, se efectúa un análisis en el peor escenario posible. En este caso, el peor escenario se da cuando el nivel de agua llega a la mitad, ya que una variación de altura al centro de un cilindro comprende más volumen que en los extremos.

Entonces, se tiene que en el tanque pulmón hay 10000 litros de agua sin clorificar, lo que implica que se necesita una variación de 2.3 ppm en 10000 litros de agua.

Se busca llegar al caso extremo en el que el sistema, pensando que está clorificando el agua a 2.3 ppm, llegue al límite de 2.17 ppm. Este límite aparece cuando la cantidad de agua es 9 358.69 litros, 641.31 litros de diferencia con el valor real (10000 litros). Finalmente, al calcular la altura correspondiente al volumen de 641.31 litros, se obtiene 5.5 cm, asumiendo en el centro del tanque un paralelepípedo ortogonal.

Por ello, si se quiere usar una CMRR que comprenda esta altura, esta debe ser por lo menos 4 veces menor al equivalente en voltaje de 5.5 cm, que es 7.93 mV. Por lo tanto, al obtener estos cálculos la CMRR mínima para el INA resulta ser 69.61 dB.

En cuanto al error esperado, en este caso no es un parámetro crítico en la selección del acondicionador del sensor del tanque de solución, pues una variación en el volumen leído de agua en el tanque pulmón no influye mucho en la cantidad de solución que se debe dosificar para clorificar dicho volumen a 2.3 ppm. De todas maneras, en el capítulo 4 se calculará el error del sensor del tanque pulmón.

Criterios de selección: Por los mismos criterios del sensor anterior, también se elige un amplificador de instrumentación INA126P, pero esta vez se debe elegir una ganancia diferente. Para elegir esta ganancia, se tomó en cuenta que el tanque, al estar lleno con 20000 litros de agua, ejerce una presión en la manguera de 19.86 KPa, lo que equivale a 16.78 mV para el sensor. Entonces lo que se buscó fue llevar este voltaje máximo (17 mV por seguridad) a 5 voltios. Por ello, la ganancia elegida fue de 294.

Usando la misma ecuación de ganancia del INA126 que se utilizó en el caso anterior, se pudo obtener finalmente que la resistencia R_g , que permite obtener la ganancia requerida, debe tener un valor de 276.8 ohmios. De la misma manera

que el caso anterior, también se usa un potenciómetro de precisión para obtener esta resistencia.

Los otros componentes son elegidos de la misma manera que el anterior sensor de presión, terminando el esquemático como el anterior, tomando en cuenta que el valor del potenciómetro R_g es diferente.

3.3.5.3 Acondicionador de señal del sensor de concentración de cloro

Para adaptar la señal de corriente a una señal de voltaje que el microcontrolador pueda interpretar, se utilizará una resistencia de 250 ohmios en paralelo con la salida del sensor de cloro. Tomando en cuenta que la impedancia de entrada del pin de señal analógica del microcontrolador es muy alta (100 Mohmios) (40) se puede considerar que toda la corriente pasará por la resistencia de 250 ohmios, permitiendo de esa manera obtener un rango de voltajes de entre 1 a 5 voltios.

Esquemático:

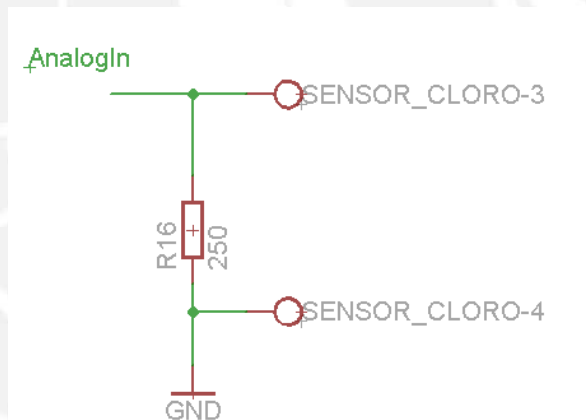


Figura 3.11: Esquemático de la adaptación de la señal entregada por el módulo del sensor de concentración de cloro. Fuente: Elaboración propia.

3.3.6 Interfaz de Usuario

3.3.6.1 Visualizador (Display)

Requerimientos: Para diseñar el visualizador, se deben tener en cuenta los estados del proceso que son más importantes, los estados que el usuario externo debería saber. Como son solo indicaciones de que algún proceso está comenzando o existe algún tipo de error, no es necesaria una pantalla, sino unos

indicadores luminosos para detallar cada estado. Siguiendo esta pauta, se determinaron cuatro estados importantes, que se detallan a continuación:

Primer estado: Equipo encendido y operativo. Este indicador será de color verde y mostrará que el equipo está energizado, con todo en orden y esperando a que sea el tiempo de comenzar el proceso principal.

Segundo estado: Error. Dicho estado será mostrado por el mismo indicador verde, pero parpadeante. Como se explicará más adelante, indicará fallas en la medición, en los actuadores o bien falta de cloro.

Tercer estado: Proceso principal. El indicador respectivo será de color amarillo y mostrará que el bloque de control ha detectado que ha transcurrido el tiempo determinado (normalmente ese tiempo es de 2 horas) y comenzará a evaluar la concentración de cloro en el tanque de agua, para así planear alguna acción correctiva si se da el caso.

Cuarto estado: Falta de cloro. El indicador en este caso será de color azul y mostrará que la solución de cloro en el tanque de solución de 20 litros se ha agotado, y debe ser rellenado lo antes posible. Al encenderse este indicador, también comenzará a parpadear el indicador verde (error). Se eligió diferenciar esta situación a la del segundo estado porque así es posible discernir entre un error que el usuario puede atender (llenar de nuevo el tanque de solución de cloro) a un error que requiere servicio técnico (error de mediciones o actuadores).

Para definir los colores de los indicadores se tomó en cuenta la norma EN 60 204-1. Esta indica que el color verde se utiliza para denotar funcionamiento habitual, el color amarillo para procesos especiales y luz azul para denotar carácter de obligatorio, un estado que requiere una acción por parte del usuario.
(46)

Alternativas: Como opciones de indicadores luminosos se barajaron dos posibilidades, que debían ser visibles de día:

Tabla 3.5: Selección de indicadores luminosos.

| | Pilotos luminosos | Power LED |
|----------------------|--|--------------------------------|
| Voltaje de trabajo | 12-24 VDC o 220 VAC | 2.8 a 4.3 VDC |
| Consumo de corriente | 13 mA (máx. 20) | 350 mA |
| Circuito | Corte y saturación con BJT, posee resistencia interna. | Corte y saturación con Mosfet. |
| Costo | 3 soles | 4.50 soles |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección: Finalmente, por cuestiones de optimización de energía, se eligió usar luces piloto (30).

Esquemático de los pilotos:

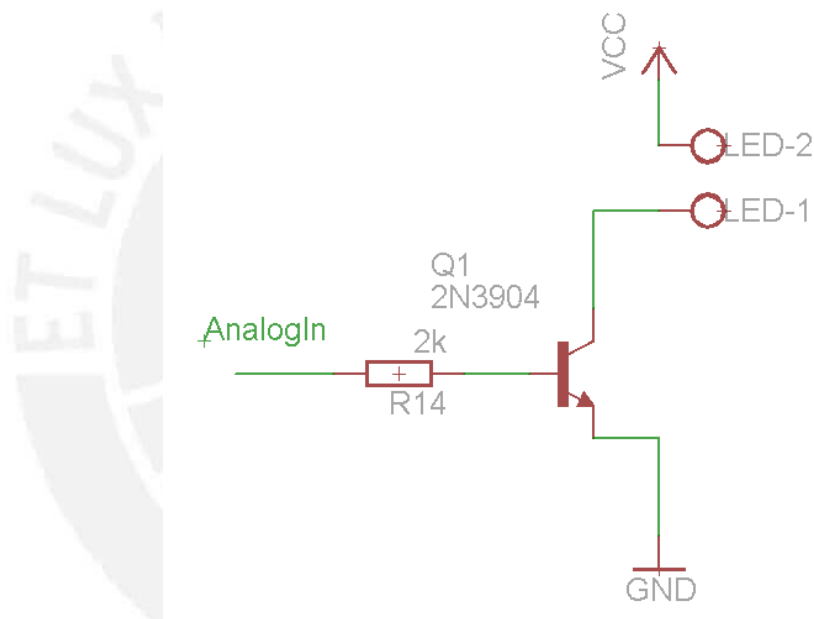


Figura 3.12: Esquemático de la adaptación de los indicadores luminosos. Fuente: Elaboración propia.

Para los tres pilotos se usó la misma configuración. Estos elementos poseen su propia resistencia interna, así que cuando son energizados a 12 voltios directos consumen un amperaje menor o igual a 20 mA. Como el hfe de saturación del transistor es 10, entonces $i_B = 20\text{mA} / 10 = 2 \text{ mA}$. Entonces, $R_b = (5 - 0.7) / 2 \text{ mA} = 2150 \text{ ohmios}$, por lo que se elige una resistencia de 2 KOhm. En cuanto al mismo transistor, ya que la corriente que lo atravesará es de máximo 20 mA, un

2N3904 será más que suficiente, pues soporta corrientes de colector de hasta 200 mA (31).

3.3.6.2 Selector de modo:

Se incluye también en el tablero frontal un selector de dos posiciones. Este cumple una función que ha sido requerimiento del usuario desde el inicio, y es la de cambiar de modo “control de concentración de cloro”, en el cual el sistema está habilitado y mide cada dos horas la concentración de cloro y actúa según sea necesario; y el modo “llenado”, en el cual se deshabilitan los actuadores y sensores del sistema, se cierra la válvula de recirculado, se abre la válvula de llenado y se enciende la bomba, para que el agua pueda ser dirigida hacia la fase de llenado de la planta. El tiempo en el que este modo se activa es estrictamente controlado por el usuario, que es el encargado de determinar qué cantidad de agua quiere extraer del tanque para que pueda ser embotellada.

Esquemático:

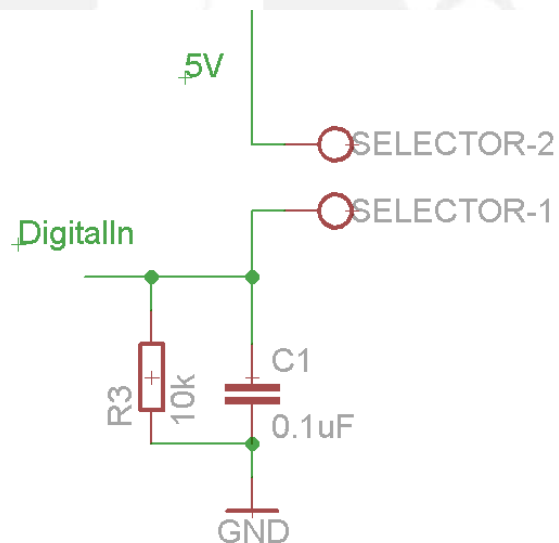


Figura 3.13: Esquemático de la adaptación del selector de modo. Fuente: Elaboración propia.

En este caso el selector funciona conduciendo o cortando la alimentación de 5 voltios. Este cambio será leído por el microcontrolador, que determinará el accionar según el estado. El circuito RC, formado por la resistencia de 10 Kohmios y el condensador de 0.1 uF, tiene dos objetivos. Primero, funciona como

filtro pasa bajos, evitando el ruido que se genera al activar o desactivar el selector. Gracias a su tiempo de carga de 1 ms, evita los cambios bruscos en el voltaje de entrada que son inducidos por la misma manipulación mecánica del selector. Segundo, la resistencia a tierra también permite que cuando el selector se encuentra abierto, la señal en la pata del microcontrolador se fije en 0 voltios, es decir, funciona como Pull Down.

3.3.6.3 Pulsador de reset error:

Para esta función se necesita un pequeño botón en la tarjeta que permita reiniciar el estado de error. Este botón se colocará en la tarjeta de tal manera que solo personal calificado en el mantenimiento del sistema pueda presionarlo, normalmente luego de hacer un mantenimiento correctivo. Como se explicó anteriormente, el estado de error persistente solo ocurre cuando el sistema detecta que puede haber algún problema con los componentes sensores o actuadores, pues no ha sido capaz de llevar la concentración de cloro en el agua del tanque pulmón al rango deseado.

Esquemático:

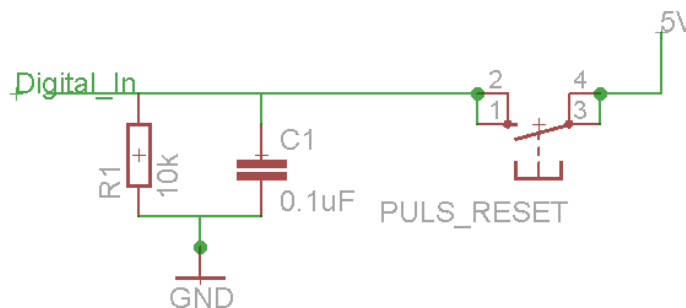


Figura 3.14: Esquemático de la adaptación del pulsador de reset error. Fuente: Elaboración propia.

Los componentes se eligieron de manera similar al selector de modo. El arreglo RC permite evitar el ruido mecánico producto del uso mismo del pulsador.

3.3.8 Bloque de Control:

Requerimientos: Para el proyecto son necesarios 3 pines con interrupciones externas, 3 pines con capacidad de ADC y 10 GPIO. Para la aplicación que se le quiere dar, no es necesaria una muy alta frecuencia de reloj, pues no se necesita procesamiento de imágenes ni muestreo extremadamente preciso.

Alternativas: Se evaluaron tres posibles microcontroladores, cuyas principales características se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3.6: Selección de microcontrolador.

| | Arduino Uno (42) | Arduino Mega 2560 (43) | Raspberry Pi 2 (41) |
|---|----------------------|------------------------|---------------------|
| Microcontrolador | Atmega 328P | Atmega 2560 | Broadcom BCM2836 |
| Frecuencia de reloj | 16 MHz | 16 MHz | 900 MHz |
| Número de entradas/salidas (GPIO) | 14 | 54 | 40 |
| Número de entradas analógicas | 6 | 16 | Ninguna incorporada |
| Numero de pines de interrupción externa | 2 | 6 | - |
| Tamaño de la tarjeta (mm) | 68.6 x 53.4 | 101.52 x 53.3 | 85.60 x 56.5 |
| Precio | 85 soles | 180 soles | 210 soles |
| Lenguajes de programación | Propio (basado en C) | Propio (Basado en C) | Python |
| Memoria EEPROM | 1 KB | 4 KB | - |
| Memoria Flash | 32 KB | 256 KB | Necesita SD |
| Memoria RAM | 2 KB SRAM | 8 KB SRAM | 1 GB |
| Voltaje de operación | 5 V | 5 V | 5 V |
| Consumo de corriente (máx.) | 200 mA | 200 mA | 650 mA |

Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección: El Raspberry Pi 2 es una computadora en miniatura, mucho más potente que otros microcontroladores, pero sería una solución demasiado sobredimensionada para este problema, y costosa también. Observando entonces las dos tarjetas Arduino, se puede apreciar que el Arduino Uno no cumple con tener 3 pines capaces de generar una interrupción externa,

por lo que es descartado. Finalmente, el Arduino Mega 2560 es el que mejor cumple con los requerimientos del proyecto, es un controlador que usa un lenguaje de programación sencillo y más conocido, así que es el microcontrolador que se usará.

Para unir el microcontrolador a los demás componentes se diseñará una tarjeta “Shield”, una placa que sirve como interfaz entre el microcontrolador y las demás partes del circuito (normalmente conectados al “Shield” por medio de borneras) como son los sensores, actuadores, la interfaz de usuario y la alimentación. Para lograr esto se colocan conectores del tipo “espadín macho”, para que puedan ser insertados en los conectores “hembra” del Arduino Mega y así evitar el uso de cables, al mismo tiempo que permite tener un solo bloque funcional de control. Para que la tarjeta sea lo más compacta posible se usará la técnica de impresión a doble capa, así como resistencias de montaje superficial (SMD). Por último, para mayor comodidad al momento del mantenimiento o instalación se utilizarán borneras “enchufables”, para que no sea necesario soltar los cables al momento de los traslados o mantenimientos.

Esquemático:

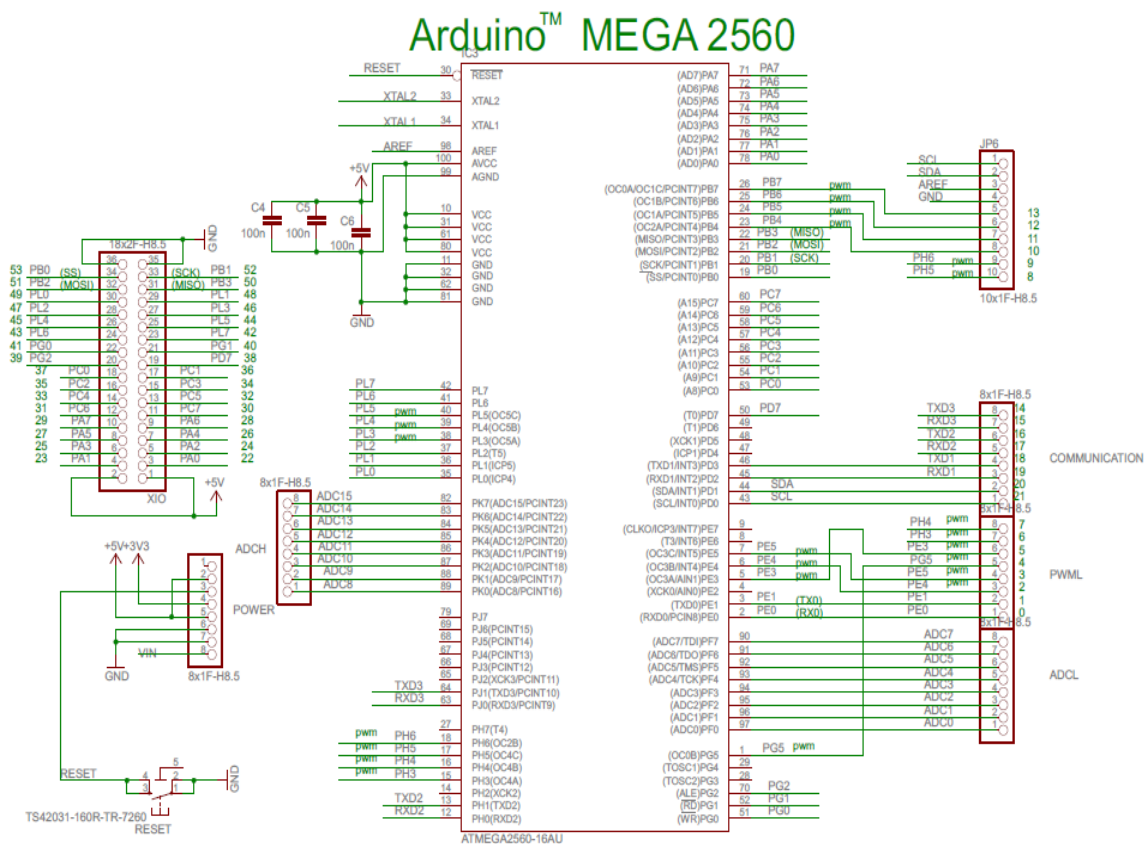


Figura 3.15: Esquemático del Microcontrolador Atmega 2560 incluido en la tarjeta Arduino Mega 2560. Fuente: (43)

Distribución de pines usados:

Tabla 3.7: Distribución de pines usados por el sistema de control.

| PIN | FUNCIÓN | PIN | FUNCIÓN |
|-----|--------------------------------------|-----|-------------------------------|
| A0 | ADC sensor concentración cloro | 25 | Indicador “Falta Cloro” |
| A1 | ADC sensor nivel 50kPa | 26 | Control electrobomba |
| A2 | ADC sensor nivel 10kPa | 27 | Indicador “Proceso Principal” |
| 2 | Selector en alta | 28 | Control dosificador |
| 3 | Selector en baja | 29 | Indicador “Encendido” |
| 19 | Pulsador de reset error | 5V | Regulador a 5V |
| 22 | Control electroválvula recirculacion | Vin | Alimentación 12V |
| 24 | Control electroválvula llenado | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.9 Fuentes de Alimentación

Requerimientos: Luego de haber diseñado todos los bloques anteriores, los requerimientos de voltaje son dos: 12 voltios y 5 voltios. Los consumos de corriente estimados de cada fuente se detallan en tablas siguientes:

Tabla 3.8: Consumo de corriente del sistema, según voltaje de alimentación.

| 12 voltios | |
|--------------------------------|----------------------|
| Dosificador | 150 mA |
| Sensor 10 KPa + Acondicionador | 6 mA + 10 mA = 16 mA |
| Sensor 50 KPa + Acondicionador | 6 mA + 10 mA = 16 mA |
| Indicadores Luminosos (3) | 20 mA x 3 = 60 mA |
| Microcontrolador | 200 mA |
| Total | 442 mA |

| 5 voltios | |
|-------------------------|---------------|
| Selector de modo | 0.2 mA |
| Pulsador de reset error | 0.2 mA |
| Total | 0.4 mA |

Fuente: Elaboración propia.

Los componentes de potencia no serán alimentados por el circuito; será la misma red eléctrica la que les dará energía y solo los conmutadores (TRIACs) serán excitados por la tarjeta.

Por lo tanto, se puede apreciar que la mayor carga estará en la fuente de 12 voltios. Es más, la tarjeta del Arduino Mega tiene un regulador de 5 voltios incorporado en uno de sus pines, por lo que eliminaría la necesidad de diseñar o adquirir una fuente externa de 5 voltios, con lo que solo queda obtener los 12 voltios.

Alternativas: Para conseguir los 12 voltios se contemplaron tres opciones: diseñar e implementar una fuente lineal, diseñar e implementar una fuente conmutada y comprar una fuente lineal o conmutada ya manufacturada.

Criterios de selección: En este caso, primero se optó por una fuente conmutada, por su mayor eficiencia y por lo tanto menor consumo de energía. Sin embargo, al elegir entre construir la fuente o comprarla ya hecha, se prefirió la segunda opción, pues una fuente ya hecha es más compacta, viene en un empaque sólido

y normalmente posee una garantía de funcionamiento mayor que una que se haya construido personalmente, pues por algún error de diseño estas fuentes podrían fallar. Por todo esto, se eligió comprar una fuente conmutada de 12 voltios, cuyo costo ronda los 40 soles, en distintas marcas como Sagemcom y APD.

Esta fuente de 12 voltios debe tener un amperaje superior a 442 mA, pero por seguridad se prefiere que la fuente tenga una capacidad mucho mayor. En este caso, se encontró una fuente de 2.5 amperios, que perfectamente puede cubrir las necesidades del proyecto.



Esquemático General:

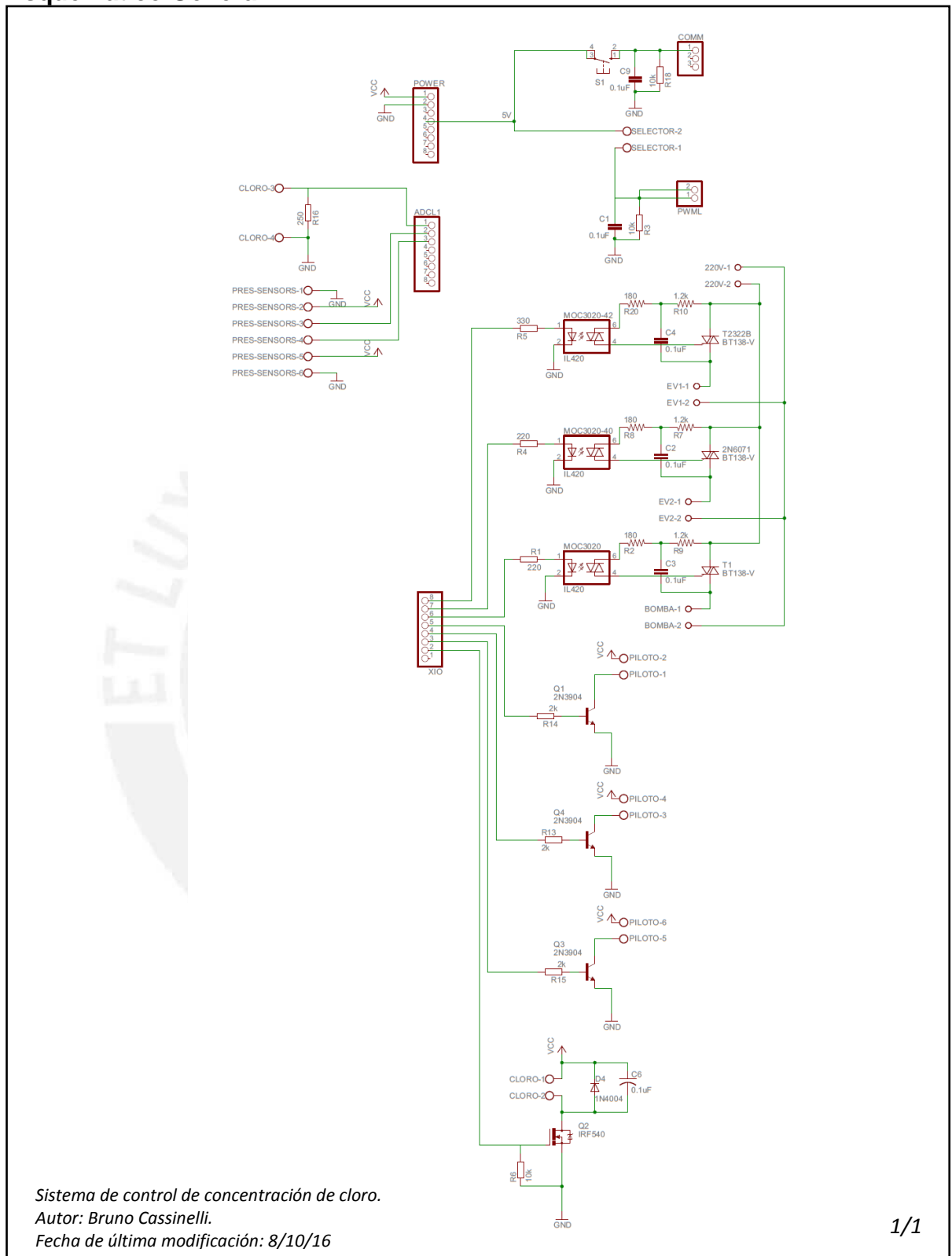


Figura 3.16: Esquemático de la solución completa para el sistema de clorificación.
 Fuente: Elaboración propia.

3.3.10 Programación:

Como se mencionó anteriormente, el lenguaje de programación que se usa para el microcontrolador Arduino Mega 2560 es un lenguaje especial para Arduino, pero que está basado en el lenguaje C.

El programa tiene las siguientes funciones:

- Monitorizar la concentración de cloro en el agua del tanque pulmón.
- Dosificar solución de cloro preparada en caso la concentración sea menor a 2.1 ppm.
- Recircular el agua del tanque en caso la concentración sea mayor a 2.5 ppm.
- Controlar que el volumen de solución de cloro en el tanque de 20 litros sea mayor o igual a 6.13 litros.
- Permitir que el usuario pueda hacer uso de la electrobomba para enviar la cantidad de agua que considere conveniente hacia el proceso de llenado, para luego reanudar las funciones normales del sistema.
- Mostrar los estados relevantes explicados anteriormente por medio de indicadores luminosos.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del lazo principal, con sus respectivas vertientes y ramificaciones:

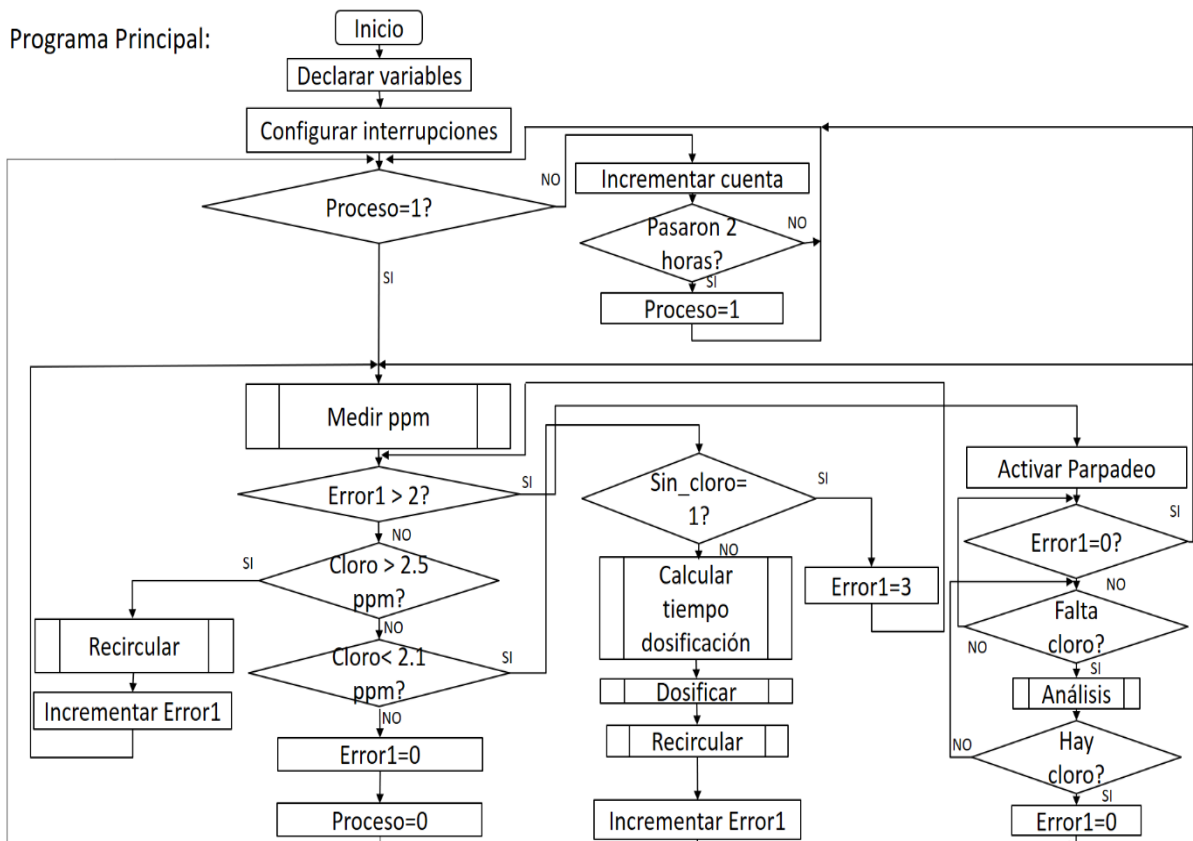


Figura 3.17: Diagrama de flujo del lazo principal. Fuente: Elaboración propia.

Luego de inicializar variables e interrupciones, se ejecuta un pequeño bucle en el cual se espera que el contador “c” llegue a 48000. Este número es una función de la cantidad de tiempo que se quiere esperar entre mediciones, pudiendo ser personalizado según la necesidad. En este caso, cuando el contador llega a 48000 significa que han pasado 2 horas, lo que da inicio al proceso principal.

En ese momento, se enciende el LED de proceso y el sistema ejecuta la medición de ppm. Para eso, hace recircular unos minutos el agua para que haya un flujo constante en la sonda del sensor de cloro, y así pueda obtener una medición correcta. Una vez obtenida la concentración de cloro, primero detecta la condición de error, condición que se explicará más adelante. De no haber error, pasa a evaluar los posibles rangos de concentración de cloro, tomando las acciones correctivas pertinentes en caso se dé la condición esperada. Si la concentración es muy alta, recircula el agua por 20 minutos y aumenta el contador del error. Si la concentración es muy baja, calcula el tiempo de

dosificación –según el volumen de agua presente en el tanque-, enciende el dosificador por tanto tiempo como haya sido calculado y luego recircula por 5 minutos el agua para que se pueda mezclar con el cloro suministrado. Finalmente, aumenta el contador de error en uno. Todo esto en caso se deba efectuar una acción correctiva; si el rango de concentración de cloro se cumple, el programa coloca el contador de error en 0 y espera una nueva medición dentro del lapso de tiempo determinado.

El contador de error tiene una función de autodiagnóstico. Como se puede apreciar, en cualquier tipo de corrección, tanto en la de bajo nivel como en la de muy alto nivel, se incrementa en uno el contador. Esto implica que el sistema tiene 3 “vueltas” para lograr corregir la concentración de cloro y llevarla al rango esperado. En caso no lo logre en esas 3 oportunidades, debe existir un problema con alguno de los componentes, quizá el dosificador o el mismo sensor de cloro, y se debería contactar con personal capacitado para que calibre nuevamente el sistema. También es posible que se haya agotado la solución de cloro en el tanque de 20 litros y por eso el dosificador no tenga la capacidad de clorificar el agua, y eso es un caso especial dentro de la sección de error.

Siguiendo esa línea, cuando el contador de error llega a 3, se llega a la sección de error. En ese momento comienza a parpadear el LED de encendido y el sistema se queda en esa sección hasta que se cumpla alguna condición especial. La primera condición aparece cuando el sistema entró al bucle de error por falta de cloro: se enciende el LED de falta de cloro y el sistema espera a que se llene de nuevo el tanque de cloro. Una vez sucede esto, se coloca el contador de error en 0 y se reanudan las funciones normalmente.

La segunda condición es ya más tajante: visto que el nivel de solución de cloro sí es mayor a 6.13 litros y aun así el sistema no logra controlar la concentración de cloro en el agua del tanque pulmón, significa que algún componente en el circuito ha fallado de alguna manera. Por lo tanto, la única manera de retirar el estado de error es presionando el botón de “reset error” en la misma tarjeta para que el contador de error vuelva a 0 y se reanuden las funciones normales. Vale

aclarar que como el contador de error se encuentra guardado en la memoria EEPROM, aunque el usuario interrumpa la alimentación eléctrica al sistema, este volverá al estado de error hasta que un personal capacitado lo revise y presione el pulsador de reinicio de error.

Las tres variables que se encuentran respaldadas en la EEPROM son el contador de error (cuya función ya se explicó), el estado de la electrobomba y el estado del dosificador. Estos dos últimos se encuentran respaldados para que en caso de corte eléctrico y posterior reposición estos dos componentes puedan retomar sus funciones.

Las interrupciones en este caso sirvieron para darle una mayor prioridad al selector de modo, así al pulsador de reset error. Un diagrama de flujo de estas interrupciones se puede apreciar a continuación:

Interrupción "ISR llenado":

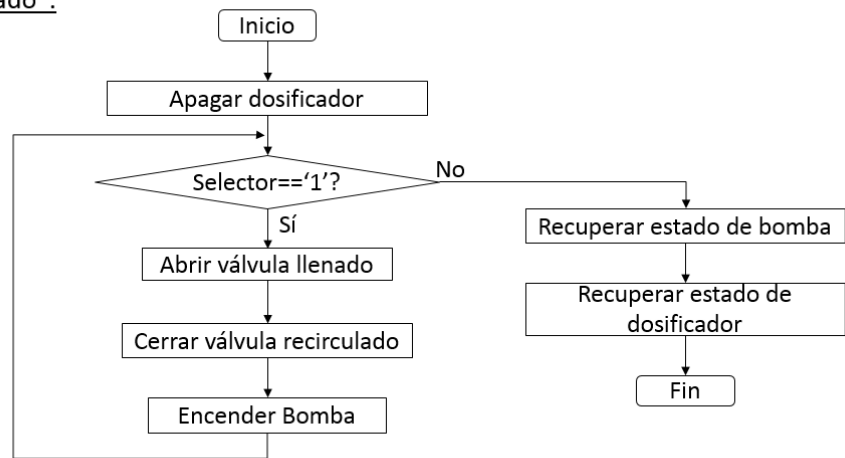


Figura 3.18: Diagrama de flujo de interrupción de llenado. Fuente: Elaboración propia.

Interrupción "ISR ciclormal":

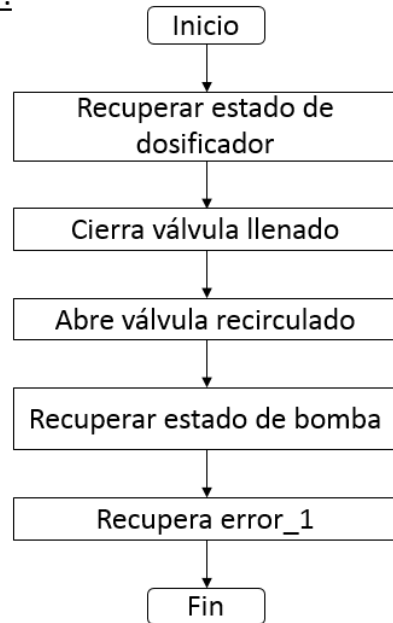
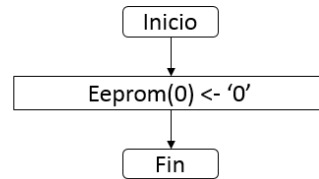


Figura 3.19: Diagrama de flujo de interrupción de cambio a funcionamiento normal. Fuente: Elaboración propia.

Interrupción "ISR borrar eeprom":



Interrupción "ISR parpadeo":

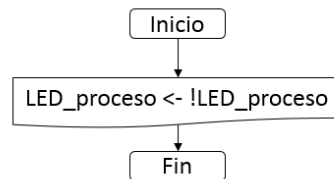


Figura 3.20: Diagramas de flujo de interrupciones de reinicio de contador de error y de parpadeo. Fuente. Elaboración propia.

Se aprecia en los dos primeros diagramas las interrupciones que gobiernan el comportamiento del selector de modo. Estas interrupciones tienen una mayor prioridad que los procesos del programa principal, y permiten que el usuario pueda disponer del agua del tanque pulmón en cualquier momento.

La tercera interrupción es una simple manera de reiniciar el contador de error, y la cuarta solo es un apoyo para el parpadeo del LED de proceso en el estado de error, y es controlado por un temporizador que hace parpadear el LED cada segundo.

El código completo puede ser encontrado en el anexo 8 a este documento, para mayor detalle sobre el funcionamiento del programa.



Capítulo 4: Ensayos, Pruebas y Resultados

El objetivo de este capítulo es presentar las pruebas realizadas al sistema integral y a sus partes, y analizar los resultados para determinar los márgenes de error de los sensores y probar el funcionamiento integral del equipo. Para esto, se desarrollarán pruebas para las siguientes etapas:

- Sensor de nivel en el tanque de solución con su respectivo acondicionador de señal.
- Sensor de nivel en el tanque pulmón con su respectivo acondicionador de señal.
- Sensor de nivel de concentración de cloro.
- Bomba dosificadora de solución de cloro con su respectivo excitador.
- Controladores de elementos de potencia (electrobomba y electroválvulas).
- Prueba de funcionamiento de la fuente de alimentación.
- Secuencia de funcionamiento del sistema completamente integrado.

Sin embargo, antes de presentar las pruebas se presentará la tarjeta del proyecto y de los acondicionadores de los sensores de nivel, así como también se presentará el equipo y algunos de sus elementos clave.

Tarjeta impresa principal

La función principal de esta tarjeta es servir de interfaz entre el microcontrolador y los demás componentes. Por ello, cuenta con conectores espadín macho para acoplarse con el Arduino Mega 2560. Además, en ella se encuentran los demás circuitos, como los controladores de potencia, el excitador del dosificador, el acondicionador de señal del sensor de cloro, el pulsador de reset error, la interfaz del selector de modo y la interfaz de los indicadores luminosos. La distribución de estos componentes se puede apreciar en las siguientes imágenes:

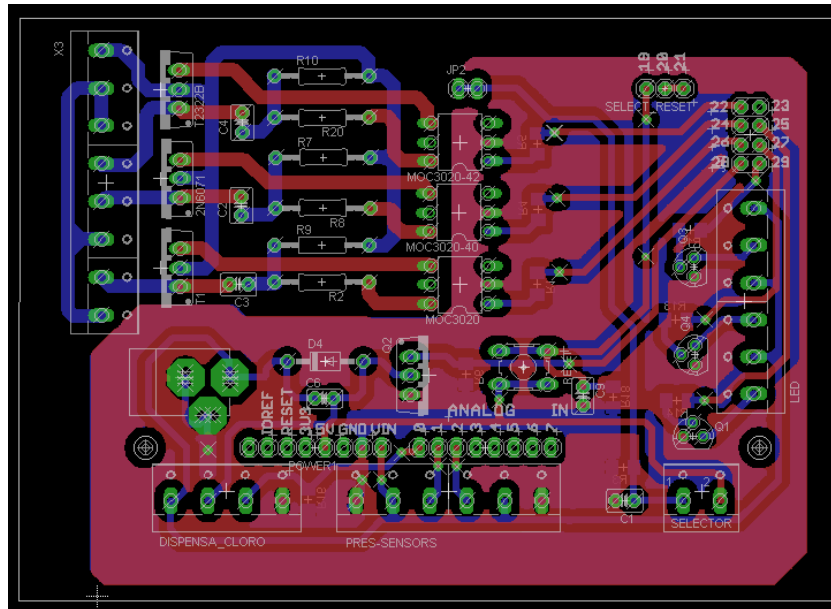


Figura 4.1: Diagrama de pistas de la tarjeta principal. Fuente: Elaboración propia.

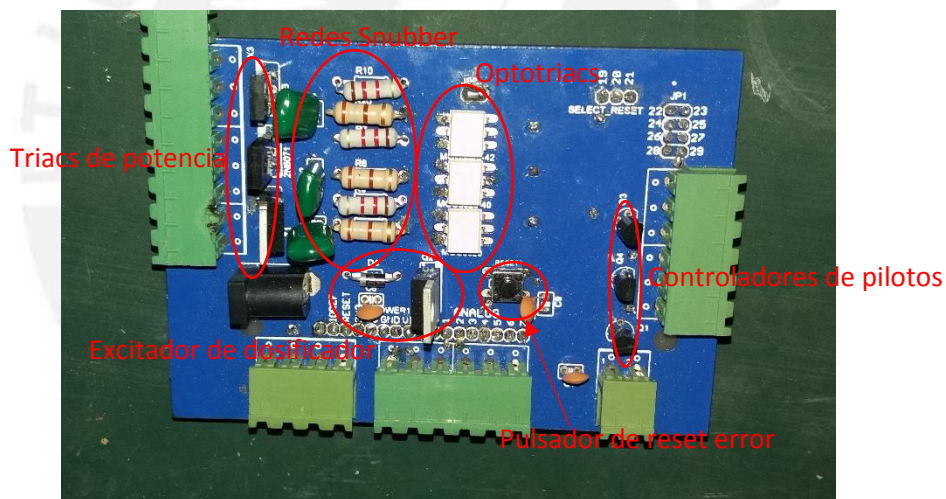


Figura 4.2: Vista superior de la tarjeta principal.

Tarjetas impresas de los sensores de presión

Estas tarjetas hospedan al sensor de presión (sea el de 10 kPa como el de 50 kPa) y a su respectivo amplificador de instrumentación. Acondicionan la señal de salida del sensor y por medio de la bornera envían esa información a la tarjeta principal. Recibe 12 voltios DC y tierra y entrega la salida amplificada del sensor de presión.

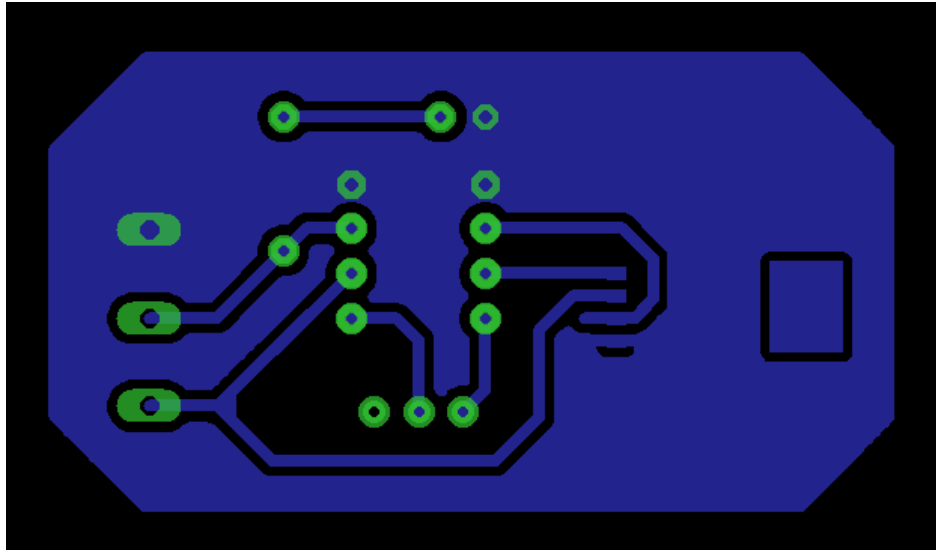


Figura 4.3: Diagrama de pistas de las tarjetas de los sensores de presión. Fuente: Elaboración propia.

Chasis

Para proteger al equipo de posibles derrames de agua en la habitación de filtros en la que se encuentra, la tarjeta principal, así como el módulo del sensor de concentración de cloro, la interfaz de usuario y la fuente de alimentación han sido colocados dentro de un chasis metálico que permite el fácil acceso y visualización de las variables a mostrar al usuario. A su lado, se colocó la celda de flujo, recipiente para la sonda del sensor de concentración de cloro. Las siguientes figuras ilustran el sistema referido:



Figura 4.4: Fotografía del frente del tablero.



Figura 4.5: Fotografía de la celda de flujo con la sonda.

Además, para asegurar el flujo mínimo que debe tener el sensor para entregar una medida acertada (15 ml / s), se utilizó una llave de bola para regular el flujo que le llega a la celda por la manguera de entrada (a la izquierda).



Figura 4.6: Fotografía de válvula reguladora de flujo.

Distribución de electroválvulas

Para colocar las electroválvulas en una posición en la que no afecte las actividades actuales de la planta de embotellado, se instalaron válvulas de bola en paralelo a ellas. Al funcionar el equipo de monitoreo, las válvulas manuales deben estar cerradas, pero en caso el usuario no desee usar el equipo, puede desenergizarlo y usar sus propias llaves de bola, pues las electroválvulas son normalmente cerradas.



Figura 4.7: Fotografía de la distribución de electroválvulas.

Dosificador de solución y tanque de solución

El dosificador de solución fue instalado en una mesa al lado del tanque pulmón, cerca también al tanque de 20 litros del que extraerá la solución de cloro. Asimismo, el sensor de cloro del tanque de solución fue fijado a una de las patas de la mesa para que monitoree con seguridad el nivel de líquido en el respectivo tanque.



Figura 4.8: Fotografía de sistema de dosificación de solución.

Bifurcación de mangueras para la medición de nivel en el tanque pulmón por presión y visual

Para la realización de las pruebas más adelante descritas, se instaló una bifurcación en la salida de medición del tanque pulmón, que permite observar la altura de agua en el tanque además de otorgarle al sensor de presión un valor para procesar.



Figura 4.9: Fotografía de la bifurcación de mangueras.

4.1 Sensor de nivel del tanque de solución

Para obtener el margen de error del sensor primero se efectuaron mediciones en laboratorio con el tanque de solución. La primera prueba consistió en colocar gradualmente líquido en el tanque, para examinar la respuesta en milivoltios del sensor. Los resultados se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Respuesta del sensor de 10 KPa versus volumen de líquido.

| Agua L | nivel cm | MPX2010 mV |
|-----------|-------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 2 | 4.75 | 0.95 |
| 4 | 8.45 | 2 |
| 6 | 11.9 | 3.1 |
| 8 | 15.2 | 4.1 |
| 10 | 19.2 | 5.2 |
| 12 | 22.9 | 6.1 |
| 14 | 26.75 | 7.5 |
| 16 | 30.6 | 8.7 |
| 18 | 34 | 9.8 |
| 20 | 38.3 | 11 |

Fuente: Elaboración propia.

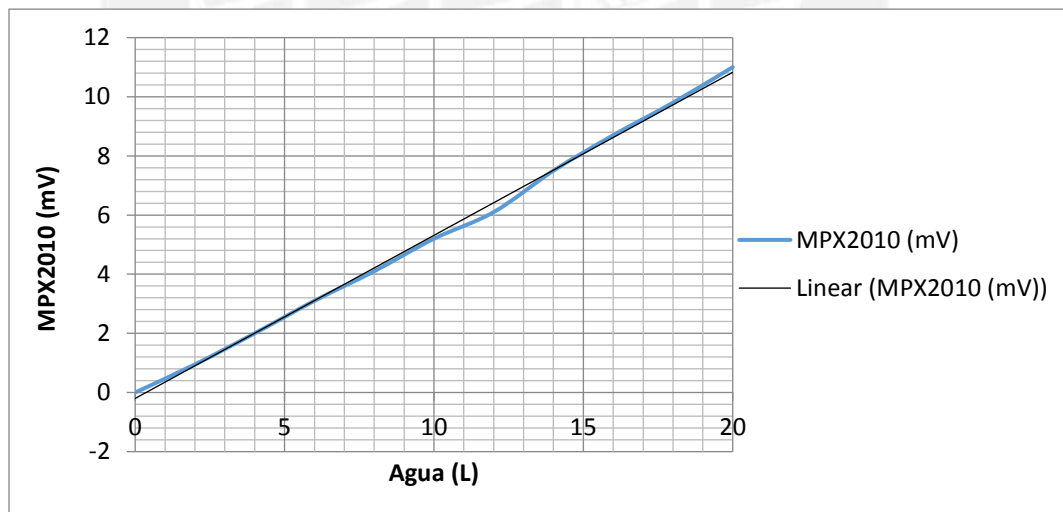


Figura 4.10: Gráfico de la respuesta del sensor de 10 KPa versus el volumen de líquido. Fuente: Elaboración propia.

La segunda prueba consistió en ejercer valores de referencia en presión (con el Prosim 4 (44) se pudo comprobar estos valores) y tomar como dato el valor en voltaje que el sensor entregaba como respuesta. Los valores relevantes se pueden observar en la tabla a continuación (el Prosim4 entrega valores en mmHg, la conversión es 0.133 kPa = 1 mmHg):

Tabla 4.2: Respuesta del sensor de 10 KPa ante una cierta presión administrada.

| kPa | mmHg | mVoltios |
|--------|-------|----------|
| 0.532 | 4.00 | 1.40 |
| 1.000 | 7.52 | 2.61 |
| 1.463 | 11.00 | 3.82 |
| 2.000 | 15.04 | 5.24 |
| 2.394 | 18.00 | 6.25 |
| 3.000 | 22.56 | 7.85 |
| 3.272 | 24.60 | 8.54 |
| 3.471 | 26.10 | 9.10 |
| 4.043 | 30.40 | 10.58 |
| 6.424 | 48.30 | 16.75 |
| 6.650 | 50.00 | 17.31 |
| 7.382 | 55.50 | 19.28 |
| 8.831 | 66.40 | 23.10 |
| 9.403 | 70.70 | 24.67 |
| 9.842 | 74.00 | 25.73 |
| 10.946 | 82.30 | 28.55 |

Fuente: Elaboración propia.

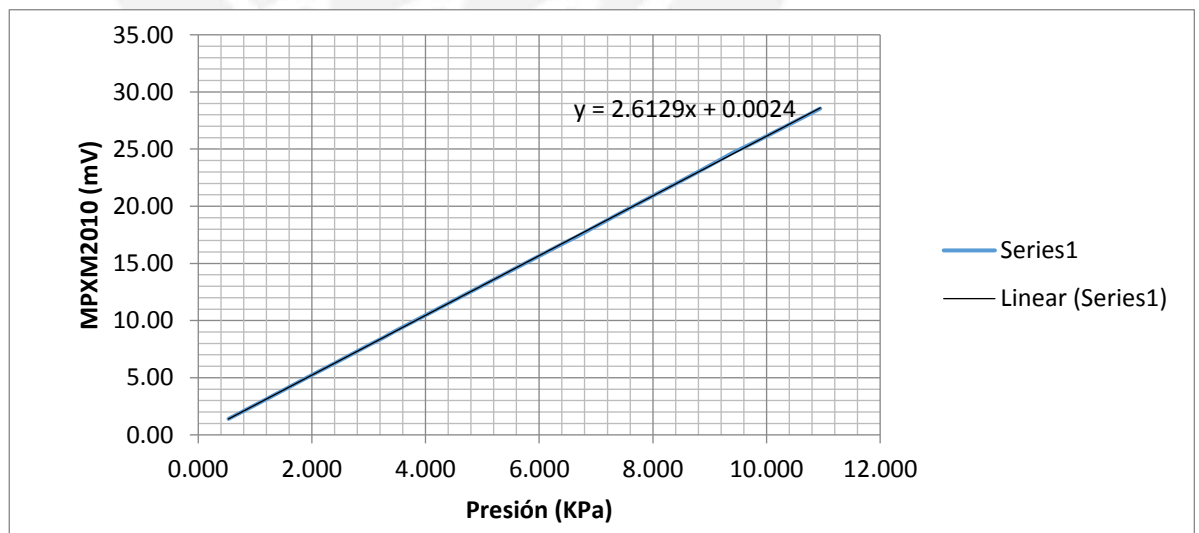


Figura 4.11: Gráfico de la respuesta del sensor de 10 KPa ante presión. Fuente: Elaboración propia.

En esta prueba se aprecia claramente el carácter lineal del sensor ante las variaciones de presión. Además, con los puntos obtenidos es posible aplicar un ajuste lineal que permitirá predecir con una buena aproximación los valores de voltaje para cualquier valor de presión dentro del rango de trabajo del sensor.

Una vez realizadas estas pruebas, se procede a obtener el error del sensor. Para esto, se utiliza el valor de sensibilidad adquirido de la hoja de datos del sensor de presión: 2.5 mV / KPa. Con esto, se procede a calcular el error de medición relativo del sensor, de la siguiente manera: $\text{error relativo} = (\text{diferencial de voltaje en el sensor} - \text{referencia}) / \text{referencia} * 100$. Los valores arrojados son los siguientes:

Tabla 4.3: Calculo de error del sensor de 10 KPa.

| Volumen | Presión | Lectura | Sensibilidad | ERROR RELATIVO |
|---------|---------|---------|--------------|----------------|
| L | kPa | mV | 2.5mv/kpa | % |
| 2.90 | 0.532 | 1.40 | 1.33 | 5.26 |
| 5.09 | 1.000 | 2.61 | 2.50 | 4.40 |
| 7.29 | 1.463 | 3.82 | 3.66 | 4.44 |
| 9.87 | 2.000 | 5.24 | 5.00 | 4.80 |
| 11.70 | 2.394 | 6.25 | 5.99 | 4.43 |
| 14.60 | 3.000 | 7.85 | 7.50 | 4.67 |
| 15.85 | 3.272 | 8.54 | 8.18 | 4.41 |
| 16.87 | 3.471 | 9.10 | 8.68 | 4.86 |
| 19.55 | 4.043 | 10.58 | 10.11 | 4.67 |
| - | 6.424 | 16.75 | 16.06 | 4.30 |
| - | 6.650 | 17.31 | 16.63 | 4.12 |
| - | 7.382 | 19.28 | 18.45 | 4.48 |
| - | 8.831 | 23.10 | 22.08 | 4.63 |
| - | 9.403 | 24.67 | 23.51 | 4.94 |
| - | 9.842 | 25.73 | 24.61 | 4.57 |
| - | 10.946 | 28.55 | 27.36 | 4.33 |

Fuente: Elaboración propia.

Así, se obtiene un error relativo máximo del sensor de 5.26%. Este es el valor que se debe agregar al cálculo del valor límite hallado en el capítulo 3. Visto que se necesitan 6.13 litros de solución en el caso extremo, se le debe agregar este valor de error, para que bajo cualquier circunstancia (el valor medido sea el

correcto o con el 5.26% de error) se tenga la certeza de que hay 6.13 litros de solución en el tanque.

Gracias a las pruebas anteriores, se obtiene que 6.13 litros de solución en el tanque de 20 litros equivalen a 3.18 mV. Para tener la certeza de que el valor medido por el sensor, incluyendo su error, permita llevar a la concentración de cloro en el agua del tanque pulmón al valor deseado, se debe tomar el 3.18 mV y aumentarle el 5.26%, que se traduce a 0.17 mV, con lo que el valor final del límite sería de 3.35 mV.

4.2 Sensor de nivel en el tanque pulmón

Antes de presentar los resultados, se tienen que tener en cuenta las siguientes observaciones. Primero, el agua en el tanque pulmón, al ser un recurso valioso (fuente principal de ingreso) no es un valor que se pueda cambiar arbitrariamente para las pruebas. En el momento de efectuar estas evaluaciones, se contaba con 7440 litros de agua, y es con este volumen que se trabajó. Además, el costo en electricidad y en distribución de tuberías para mover el agua a otros tanques de poco en poco también es un factor a tener en cuenta.

Segundo, para que se pueda apreciar mejor la variación en el voltaje de salida del circuito cada 900 litros (como se explicará más adelante), se aumentó la ganancia a 600, lo que permitirá obtener un mejor rango dinámico que permitirá notar la relación de datos que emite el sensor.

En este experimento, se utilizó un tanque de 900 litros disponible en la planta para variar el volumen de agua en el tanque pulmón en esa misma cantidad, y así registrar los valores obtenidos en esta variación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Primera prueba: aumento de volumen de 1130 a 7440 litros

En esta prueba se aumentó el volumen en el tanque pulmón en pasos de 900 litros:

Tabla 4.4: Respuesta del sensor de 50 KPa ante variación de volumen.

| Agua | Nivel | MPXM2053 |
|------|-------|----------|
| L | cm | mV |
| 1130 | 28.63 | 1.08 |
| 2030 | 38.53 | 1.81 |
| 2930 | 48.43 | 2.79 |
| 3830 | 58.33 | 3.53 |
| 4730 | 68.23 | 4.34 |
| 5640 | 78.24 | 4.86 |
| 6540 | 88.14 | 5.63 |
| 7440 | 98.04 | 6.33 |

Fuente: Elaboración propia.

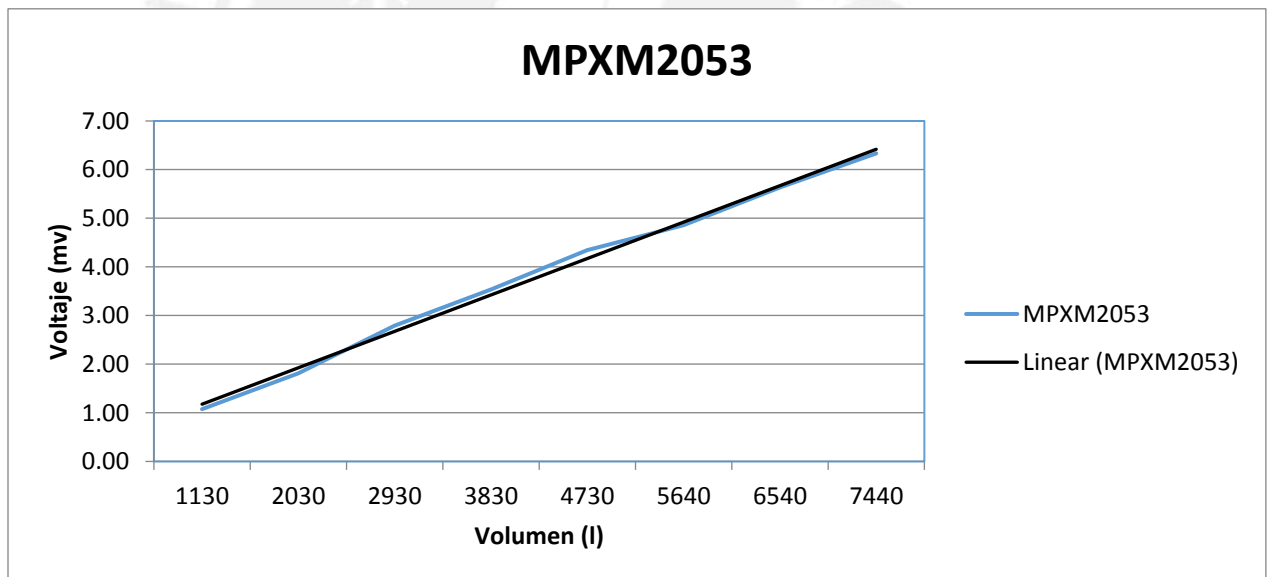


Figura 4.12: Gráfico de la respuesta del sensor de 50 KPa ante variación de volumen. Fuente: Elaboración propia.

Segunda prueba:

La segunda prueba consistió en ejercer valores de referencia en presión (con el Prosim 4 (44) se pudo comprobar estos valores) y tomar como dato el valor en

voltaje que el sensor entregaba como respuesta. Los valores relevantes se pueden observar en la tabla a continuación (el Prosim4 entrega valores en mmHg, la conversión es 0.133 kPa

= 1 mmHg):

Tabla 4.5: Respuesta del sensor de 50 KPa ante una presión dada.

| Presión mmHg | Presión kPa | Lectura mV |
|-----------------|----------------|---------------|
| 7.54 | 1.003 | 0.85 |
| 37.37 | 4.97 | 4.19 |
| 76.02 | 10.11 | 8.53 |
| 113.38 | 15.08 | 12.74 |
| 149.55 | 19.89 | 16.81 |
| 189.10 | 25.15 | 21.17 |
| 225.11 | 29.94 | 25.21 |
| 262.86 | 34.96 | 29.34 |
| 301.50 | 40.1 | 33.69 |
| 340.75 | 45.32 | 38.33 |
| 374.44 | 49.8 | 42.02 |

Fuente: Elaboración propia

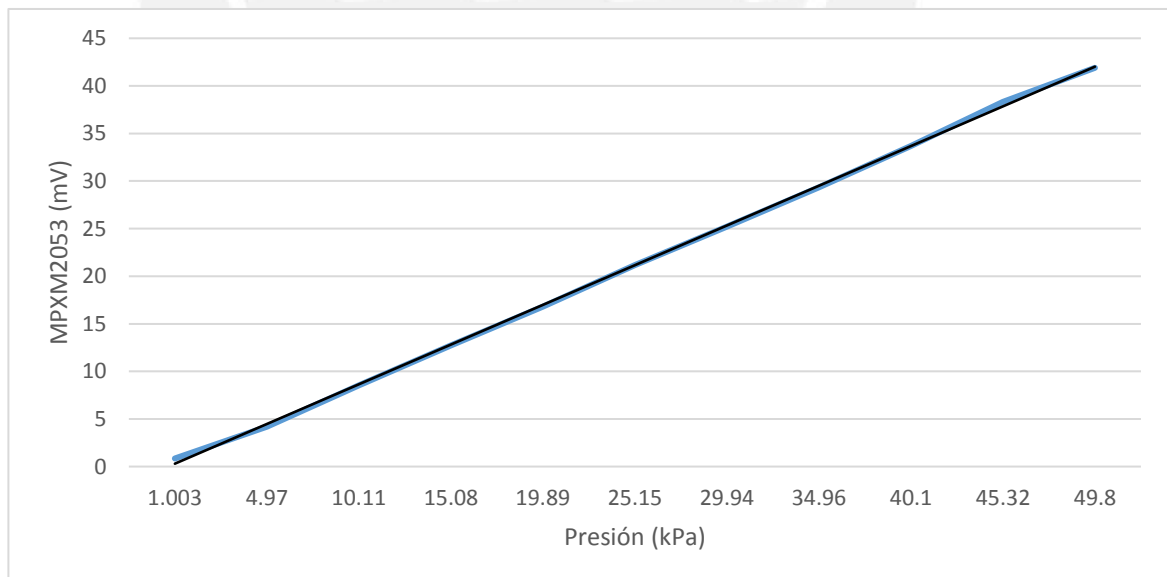


Figura 4.13: Grafico de la respuesta del sensor de 50 KPa ante presión. Fuente: Elaboración propia.

En esta prueba se aprecia claramente el carácter lineal del sensor ante las variaciones de presión. Además, con los puntos obtenidos es posible aplicar un ajuste lineal que permitirá predecir con una buena aproximación los valores de voltaje para cualquier valor de presión dentro del rango de trabajo del sensor.

Una vez realizadas estas pruebas, se procede a obtener el error del sensor. Para esto, se utiliza el valor de sensibilidad adquirido de la hoja de datos del sensor de presión: 0.8 mV / KPa. Con esto, se procede a calcular el error de medición relativo del sensor, de la siguiente manera: error relativo = (diferencial de voltaje en el sensor – referencia) / referencia * 100. Los valores arrojados son los siguientes:

Tabla 4.6: Cálculo de error del sensor de 50 KPa.

| Presión | Lectura | Sensibilidad | ERROR RELATIVO |
|---------|---------|--------------|----------------|
| kPa | mV | 0.8 mV / kPa | % |
| 1.003 | 0.85 | 0.80 | 5.93 |
| 4.97 | 4.19 | 3.98 | 5.38 |
| 10.11 | 8.53 | 8.09 | 5.46 |
| 15.08 | 12.74 | 12.06 | 5.60 |
| 19.89 | 16.81 | 15.91 | 5.64 |
| 25.15 | 21.17 | 20.12 | 5.22 |
| 29.94 | 25.21 | 23.95 | 5.25 |
| 34.96 | 29.34 | 27.97 | 4.91 |
| 40.1 | 33.69 | 32.08 | 5.02 |
| 45.32 | 38.33 | 36.26 | 5.72 |
| 49.8 | 42.02 | 39.84 | 5.17 |

Fuente: Elaboración propia.

Promediando los valores, se obtiene un error del sensor de 5.39%.

4.3 Sensor de concentración de cloro

Para esta prueba se tomó como referencia un medidor colorimétrico, visto que es la forma más habitual cómo se determina la concentración de cloro en un reservorio de agua. Este medidor colorimétrico, sin embargo, es una variante más precisa de los que normalmente se encuentran en el mercado, con una resolución

de 0.05 ppm. Se efectuaron tres mediciones en cinco valores determinados de ppm ya fijados, y de esa manera se comprobó el error del sensor de cloro. Si bien el manual del sensor mencionaba una exactitud de 0.01 ppm, la prueba permitió obtener un valor máximo experimental de 0.07 ppm. La fórmula, ya mencionada anteriormente, es:

$$\text{litrosSolución} = \frac{\text{VolAgua} \cdot \Delta\text{ppm}}{7500}$$

Tabla 4.7: Cálculo de error del sensor de concentración de cloro.

| Valor | Medidas | | | Error máximo |
|-------|---------|------|------|--------------|
| 2.00 | 2.06 | 1.96 | 2.05 | 0.06 |
| 2.10 | 2.14 | 2.03 | 2.13 | 0.07 |
| 2.30 | 2.33 | 2.24 | 2.35 | 0.06 |
| 2.50 | 2.54 | 2.47 | 2.43 | 0.07 |
| 2.70 | 2.74 | 2.73 | 2.65 | 0.05 |

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla antes presentada se puede observar que el margen de error, 0.07 ppm, es menor a 0.1 ppm, por lo que cumple las expectativas del proyecto.

4.4 Bomba dosificadora

Para probar la efectividad de la bomba dosificadora ante las condiciones de la planta se efectuaron tres evaluaciones sencillas. La primera consistió en mantener encendida la bomba dosificadora por un minuto para así obtener el flujo que la bomba podía entregar. El resultado fue de 150 ml por minuto, o 9 litros por hora. Este valor es suficiente para dosificar la cantidad de solución máxima, en el caso de que se tenga 20000 litros de agua sin clorificar (necesitaría 6.13 litros).

La segunda prueba consistió en probar que el circuito excitador funcionaba correctamente. Para ello, se utilizó un circuito con una fuente de 5 voltios y se excitó la compuerta del Mosfet, resultando en la bomba dosificadora encendiéndose.

Por último, la tercera prueba consistió en asegurar que la bomba dosificadora era capaz de levantar la solución de cloro a 3 metros para llegar a la boca de inserción del tanque pulmón. El resultado de la prueba se puede apreciar en las siguientes imágenes:



Figura 4.14: Chorro de agua arrojado al orificio superior del tanque por el dosificador.

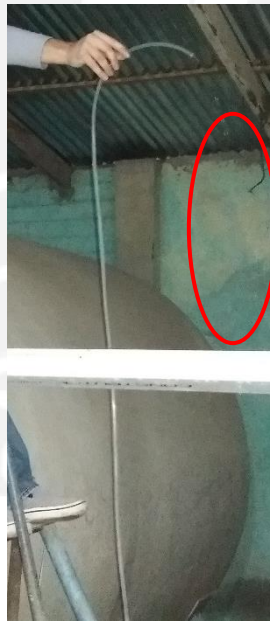


Figura 4.15: Chorro de agua impulsado por el dosificador a una altura superior al tanque pulmón.

Cabe resaltar que para que esta hazaña fuese posible, se adquirió una válvula “check” y se colocó en el extremo de la manguera que da al tanque de solución.

De esta manera la bomba no tuvo problemas en levantar el líquido hasta la altura requerida.

4.5 Controladores de elementos de potencia

El objetivo de estas pruebas era asegurar que el circuito excitador diseñado previamente era capaz de activar satisfactoriamente las dos electroválvulas y la electrobomba al ser excitado con 5 voltios (salida del microcontrolador). Para poder ilustrar mejor la prueba, se colocó como carga un foco ahorrador, pero la prueba también se realizó con las respectivas cargas de cada Triac y cada una tuvo un resultado satisfactorio. Las imágenes de las pruebas con el foco ahorrador se muestran a continuación:



Figura 4.16: Fotografías de las pruebas a los excitadores de elementos de potencia.

En estas tres fotografías se puede apreciar cómo se enciende la carga al colocar la señal de 5 voltios (cable blanco que sale de la tarjeta de la derecha) en la entrada de los optotriacs respectivos. Nótese que en cada imagen la carga es colocada en un par de borneras diferente, probando así los tres circuitos controladores (el cuarto par de borneras corresponde a la entrada de 220 voltios alternos).

4.6 Fuente de alimentación:

Para comprobar el correcto funcionamiento de la fuente de alimentación, se realizó una prueba simple: se midió el voltaje que entregaba la fuente cuando

estaba conectada al circuito, para asegurar que no existía algún efecto de carga. Las imágenes se pueden observar a continuación:



Figura 4.17: Pruebas de la fuente de alimentación, sin carga y con carga.

Estas imágenes permiten notar que la fuente de alimentación no pierde su voltaje de 12 voltios en pleno funcionamiento, por lo que cumple con las expectativas del diseño.

4.7 Secuencia de funcionamiento del equipo

En esta sección se intentará ilustrar los posibles casos de funcionamiento del equipo. Sin embargo, para una explicación más a fondo de los casos posibles, se recomienda observar el video de casos que se encuentra en el anexo 10.

Después de unos instantes de energizado el equipo, se escucha como la electroválvula de recirculado se activa y la bomba comienza a recircular el agua para tomar la primera medición. El indicador verde se activa para indicar que el equipo está funcionando y después de 13 segundos de estabilización el sistema toma una medida.



Figura 4.18: Estado inicial del tablero.

Como en este caso el nivel de concentración de cloro en el agua está por debajo del límite permitido, el sistema entra a la rutina de clorificación. En ese momento, se enciende el indicador amarillo y el dosificador se enciende también, agregando solución de cloro por un tiempo calculado según la concentración actual en el tanque pulmón y la cantidad de agua presente en el mismo.



Figura 4.19: Sistema en estado de clorinación.

Luego de cumplido el tiempo de dosificación, el sistema continúa recirculando el agua por un tiempo para que la solución se homogenice y entra a estado de reposo. Por motivos de presentación ese estado de reposo se cambió a un minuto, pero en la práctica durará dos horas.

El segundo caso se da cuando el agua se encuentra con la concentración de cloro adecuada. Una vez que pasan los 13 segundos para la medición de la

concentración de cloro, el equipo identifica que el agua se encuentra en el rango correcto y da por concluido el ciclo, apagando la electrobomba.

El tercer caso aparece cuando la concentración de cloro está por encima del rango permitido. Una vez pasados los 13 segundos de la medición, el sistema sigue recirculando, pero no se enciende la luz amarilla ni el dosificador, lo que junto con la pantalla del sensor indica que la concentración de cloro en el agua del tanque pulmón es muy alta y por lo tanto el sistema recirculará el agua por un tiempo acorde a esta desviación.

Un cuarto caso puede considerarse en una situación específica. En el momento en el que el equipo intente dosificar solución, pero encuentre que esta se encuentra por debajo del límite inferior, se encenderá el indicador azul y el indicador verde parpadeará, indicando que el sistema suspendió sus funciones y continuando con este estado hasta que en el tanque de solución exista un volumen de solución suficiente.



Figura 4.20: Sistema señalizando la falta de solución de cloro.

Cabe resaltar que, en estas condiciones, aunque el usuario reinicie el equipo o presione el pulsador de reset error, este estado persistirá, pues el sistema sigue midiendo la ausencia de solución en el tanque de 20 litros.

Por último, si en cualquiera de los casos anteriormente descritos se acciona el selector de modo (ubicado debajo de los indicadores luminosos), el sistema suspende sus funciones y se activan la electroválvula de llenado y la electrobomba, dirigiendo el agua al proceso de llenado. Cuando el usuario considera que ha obtenido suficiente agua, gira nuevamente el selector a su posición anterior y el sistema reanuda sus funciones donde las dejó, completando los tiempos que había determinado en su ciclo correspondiente.



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones:

- El sensor de concentración de cloro ARCL200, como se muestra en la sección 4.3 del presente documento, posee un rango de trabajo de 0 a 5 ppm y una exactitud de 0.07 ppm, lo que le permitió al sistema medir la concentración de cloro en el tanque pulmón y generar una respuesta concorde a esta concentración.
- El sensor de presión MPXM2010GS, con un rango de medición de 0 a 10 KPa, como se muestra en la sección 4.1 del presente documento, posee un error máximo de 5.26%, valor que permite monitorizar el valor de solución mínimo permitido (6.13 litros) para la dosificación, como se comprueba en el video adjunto y en los valores de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.
- El sensor de presión MPXM2053, con un rango de medición de 0 a 50 KPa, como se muestra en la sección 4.2 del presente documento, posee un error de 5.39%, valor que permite monitorizar el valor del nivel de agua en el tanque pulmón. Esto también se puede corroborar con los valores de las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y en el video adjunto, donde se ensayaron casos con distintas concentraciones de cloro en el tanque pulmón.
- El arreglo del optotriac MOC3021 y los Triac de potencia (BT138 o BT134), además de su circuito Snubber, como se aprecia en la sección 4.5 del presente documento, permite controlar los elementos de potencia del sistema (electroválvulas y electrobomba) con la señal de salida, de 5 voltios, del bloque de control, como es especificado en los objetivos. El circuito ha sido implementado y probado, con resultados que se pueden apreciar en la figura 4.17.
- El bloque de control, compuesto por la tarjeta Arduino Mega 2560, del microcontrolador AtMega 2560, logró monitorizar el nivel de solución de cloro en el tanque de 20 litros, el nivel de agua en el tanque pulmón y la concentración de cloro en el mismo tanque gracias a tres de sus pines de entrada analógica. Logró interactuar con los excitadores de potencia para

controlar la bomba monofásica de 1 HP y seleccionar el uso de las dos electroválvulas con el uso de sus pines de salida digitales, así como también logró controlar al dosificador de solución de cloro mediante su respectivo excitador, todo esto como se especificó en los objetivos del sistema. Gracias a sus pines de interrupción externa, se logró implementar un pulsador de reset error y un selector de modo. Estos resultados se muestran a lo largo de todo el capítulo 4.

- La interfaz de usuario, compuesta por tres indicadores luminosos, la pantalla del módulo del sensor de concentración de cloro y el selector de modo, permitió la transmisión de los cuatro estados importantes mediante los indicadores luminosos, como es demostrado en el video adjunto y en la secuencia de la sección 4.8. El selector de modo permitió la suspensión de los ciclos normales (en recirculado) de funcionamiento para pasar al modo de llenado de agua, así como también la reanudación de estos ciclos normales al regresar el selector a su posición normal. Esto puede ser comprobado en el video adjunto, cumpliendo así el objetivo relacionado.
- Se concluye, finalmente, que se logró diseñar e implementar un sistema de monitoreo y control de la concentración de cloro en el agua de un tanque pulmón de 20000 litros, haciendo uso de las herramientas explicadas en el presente documento, y tal como se puede comprobar en el capítulo 4 y en el video adjunto.

Recomendaciones:

- Para una futura implementación, se recomienda cambiar el recipiente actual de 20 litros (botellón de agua para consumo humano) por un balde esférico y graduado. Luego de esto, se debe cubicar el tanque y efectuar las pruebas de presión vs volumen detalladas en el caso del tanque actual.
- También se recomienda planear un protocolo de mantenimiento preventivo a ejecutarse cada 6 meses, para corroborar las lecturas de los sensores, calibrarlos de ser necesario y darles mantenimiento a las tarjetas con alcohol isopropílico para retirarles suciedad y polvo.



Bibliografía

1. ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS
2007 “Enfermedades vinculadas con el agua”. En *National Academy of Science*. Consulta: Abril 2015
<https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Water-Related-Diseases.html>
2. AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL
1999 “Folleto Informativo de Tecnología de aguas residuales”. En *Environmental Protection Agency webpage*, Consulta: Abril 2015
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/FB0613FDC4933A8005257DC600826FA0/\\$FILE/2004_07_07_septics_cs-99-062.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/FB0613FDC4933A8005257DC600826FA0/$FILE/2004_07_07_septics_cs-99-062.pdf)
3. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION
2006 *AWWA manual, volume 20: water chlorination/chloramination practices and principles*. Volumen 20, 2da Edición. Consulta: Abril 2015.
<http://site.ebrary.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/lib/bibpucp/reader.action?docID=10558823>
4. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA
“Disponibilidad hídrica en el Perú”. En *Autoridad Nacional del Agua*.
http://www.ana.gob.pe:8080/snrh/dsp_disphidrica.aspx
5. LENNTECH, WATER TREATMENT SOLUTIONS
“Dióxido de Cloro”. Consulta: Abril 2015
<http://www.lenntech.es/dioxido-de-cloro.htm>
6. MARCÓ, Jorge
“Cloro e hipoclorito, conceptos técnicos”. En *Química del Agua*. Consulta: Abril 2015.
<http://www.quimicadelagua.com/Conceptos.Analiticos.Cloro.html>
7. MINISTERIO DE SALUD
2014 *Plan de comunicaciones: Prevención de enfermedades diarreicas agudas (EDA) y cólera 2014*. Consulta: Abril 2015.
http://www.minsa.gob.pe/portada/Especiales/2014/lavadomanos/archivo/Plan_de_comunicaciones_prevencion_de_enfermedades_diarreicas_y_colera.pdf
8. OCOLA SALAZAR, Juan José
“Protección del Agua-Vigilancia y control de vertimientos –PAVER”, En *Autoridad Nacional del Agua*. Consulta: Abril 2015
<http://www.ana.gob.pe/media/353227/4-proteccion%20del%20agua%20vigilancia%20y%20control%20de%20vertimientos%20paver.%20%20lic.%20juan%20ocola.pdf>
9. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD
2006 *Guías para la calidad del agua potable*. Volumen 1. Página 263. Consulta: Abril 2015.
http://apps.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1
10. RADIO PROGRAMAS DEL PERU

- 2013 “ANA: en Lima hay una escasez severa de Agua”. En *RPP Noticias*. Consulta: Abril 2015.
http://www.rpp.com.pe/2013-03-01-ana-en-lima-hay-una-escasez-severa-de-agua-noticia_572138.html
11. UNICEF
“Enfermedades comunes relacionadas con el agua y saneamiento”. Consulta: Abril 2015
http://www.unicef.org/spanish/wash/index_wes_related.html
 12. WIKIWATER
El tratamiento de agua por cloración. Consulta: Abril 2015.
<http://www.wikiwater.fr/e18-el-tratamiento-del-agua-por.html>
 13. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA
2012 *El agua en cifras*. Consulta: Mayo 2016.
http://192.155.93.247/culturaagua/Docs/0/files/agua_en_cifras.pdf
 14. PROCESS INSTRUMENTS
Analizador de cloro residual – HaloSense. Consulta: Abril 2015
<http://www.processinstruments.es/productos/analizador-cloro.php>
 15. TIHGSA PERU
PH y cloro amerométrico. Consulta: Abril 2015.
<http://www.tihgsa.com/servicios/instrumentacion/ph-y-cloro-amerometrico>
 16. CARRERA, ALAN
2012 *Sensores de Nivel*. Consulta: Mayo 2015
<http://es.slideshare.net/AlanMontalvo/sensores-de-nivel-11210794>
 17. MOTOROLA
6-pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output. Consulta: Mayo 2016.
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5038/MOTOROLA/MOC3020.html>
 18. PHILIPS SEMICONDUCTORS
Triacs BT138 Series. Consulta: Mayo 2016.
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/16778/PHILIPS/BT138.html>
 19. NXP SEMICONDUCTORS
BT134-600G Product Datasheet. Consulta: Mayo 2016.
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BT134-600G.pdf
 20. STMICROELECTRONICS
ST Application Note: New Triacs: is the snubber circuit necessary? Consulta: Mayo 2016.
<http://www.thierry-legueu.fr/data/AN437.pdf>
 21. NXP SEMICONDUCTORS
BTA204-600E Product Datasheet. Consulta: Mayo 2016
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BTA204-600E.pdf
 22. HF SCIENTIFIC
OnLine Residual Chlorine Monitor. Consulta: Mayo 2016.
<http://pdf.directindustry.es/pdf-en/hf-scientific/clx/90425-360961.html#open>
 23. GOLDPOINT GROUP LTD.
Industrial Online Free Chlorine Sensor fcl2. Consulta: Mayo 2016.
https://goldpointgroup.en.alibaba.com/product/1311812721-219580309/Industrial_Online_Free_Chlorine_Sensor_fcl2.html

24. CYTRON TECHNOLOGIES
Product User's Manual – HC-SR04 Ultrasonic Sensor. Consulta: Mayo 2016
https://docs.google.com/document/d/1Y-yZnNhMYy7rwhAgyL_pfa39RsB-x2qR4vP8saG73rE/edit?pref=2&pli=1
25. NXP SEMICONDUCTORS
Data Sheet: Technical Data MPXM2053. Consulta: Mayo 2016.
<http://www.mouser.com/ds/2/302/MPX2053-783558.pdf>
26. SHARP
GP2Y0A21YK0F. Consulta: Mayo 2016
<https://www.pololu.com/file/0j85/gp2y0a21yk0f.pdf>
27. Freescale Semiconductors
Technical Data MPXM2010. Consulta: Mayo 2016
<http://www.farnell.com/datasheets/29755.pdf>
28. BURR-BROWN
Single Supply MicroPower Instrumentation Amplifier. Consulta: Mayo 2016.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina122.pdf>
29. TEXAS INSTRUMENTS
INA x126 MicroPower Instrumentation Amplifier Single and Dual Versions.
Consulta: Mayo 2016.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina126.pdf>
30. FULLWAT
2011 *Diodos LED.* Versión 2. Consulta: Mayo 2016.
[www.bazailuminacion.com/app/download/5799354780/FULLWAT DIODOS LED.pdf](http://www.bazailuminacion.com/app/download/5799354780/FULLWAT_DIODOS_LED.pdf)
31. STMICROELECTRONIC
2003 *Small Signal NPN Transistor.* Consulta: Mayo 2016.
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/2N3904.pdf>
32. FAIRCHILD SEMICONDUCTORS
2002 *2A, 80V and 100V, 1.050 Ohm, Logic Level, N-Channel Power Mosfet.*
Consulta: Mayo 2016.
http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Fairchild%20PDFs/RFP2N08L_RFP2N10L.pdf
33. FAIRCHILD SEMICONDUCTORS
2013 *FQPF3N25 N-Channel QFET MOSFET.* Consulta: Mayo 2016.
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FQ/FQPF3N25.pdf>
34. VISHAY
2011 *Power MOSFET IRF540.* Consulta: Mayo 2016.
<http://www.vishay.com/docs/91021/91021.pdf>
35. ON SEMICONDUCTORS
2012 *Axial Lead Standard Recovery Rectifiers.* Consulta: Mayo 2016.
[http://www.onsemi.com/pub link/Collateral/1N4001-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/1N4001-D.PDF)
36. ALIBABA.COM
Sensor series – Industrial Online Free Chlorine Sensor fcl10. Consulta: Mayo 2016.

https://www.alibaba.com/product-detail/Sensor-series-Industrial-Online-Free-Chlorine_1285286622.html?spm=a2700.7724838.0.0.Shv5e0

37. DIGIKEY
NXP MPXM2053GS. Consulta: Mayo 2016.
<http://www.digikey.com/product-detail/en/freescale-semiconductor-nxp/MPXM2053GS/MPXM2053GS-ND/420521>
38. POLOLU ROBOTICS & ELECTRONICS
Dealing with Motor Noise. Consulta: Mayo 2016.
<https://www.pololu.com/docs/0J15/9>
39. ARDUINO
2009 *Arduino Mega Schematic*. Consulta: Mayo 2016.
https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-mega2560_R3-sch.pdf
40. ATMEL
2014 8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash Datasheet. Consulta: Mayo 2016.
http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
41. RASPBERRYPI.ORG
Raspberry Pi Model 2. Consulta: Mayo 2016.
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
42. ARDUINO
Arduino UNO. Consulta: Mayo 2016.
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno#>
43. ARDUINO
Arduino Mega 2560. Consulta: Mayo 2016.
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
44. FLUKE BIOMEDICAL
ProSim 4 Vital Signs Simulator Technical data. Consulta: Junio 2016.
http://support.fluke.com/biomedical/Download/Asset/3983499_6150_ENG_E_W.PDF
45. PALLAS ARENY, Ramón
2003 *Sensores y Acondicionadores de Señal*. 4ta edición. Barcelona: Boixareu Editores. Consulta: Junio 2016.
https://books.google.com.pe/books?id=Evyk28_fvKc&pg=PA13&lpg=PA13&dq=error+de+sensores+porcentaje&source=bl&ots=JWIL51Jsdg&sig=flnaY71DfNZoGPVWdJvM0XBoeiw&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
46. RAFI
Colores recomendados según la normativa EN 60 204-1. Consulta: Mayo 2016.
<http://www.rafi.de/Colores-recomendados-segun-la.841.0.html?&L=3>