

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ESPUTO PARA EL DIAGNÓSTICO DE TBC.

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

Yahir Alberto Pandzic Saba

ASESOR: Ing. Willy Carrera Soria
Dr. Benjamín Castañeda Aphan

Lima, diciembre de 2013

RESUMEN

La tuberculosis (TBC) es la enfermedad infectocontagiosa más importante del mundo en cuanto a morbilidad y mortalidad, y se estima que un gran porcentaje de la población de nuestro país es portadora de este virus. Asimismo, la posibilidad de contagio es relativamente alta, sobretodo en personas como los transportistas y el personal de salud; ya que ellos entran en contacto con muchas personas que podrían sufrir de esta enfermedad. Esta alta incidencia de TBC incentiva a buscar formas de diagnóstico rápidas y eficaces que permitan detectar la enfermedad en sus etapas iniciales.

Actualmente, el principal método de diagnóstico se basa en la baciloscopía de una muestra de esputo. Para ello, la muestra debe ser debidamente preparada mediante diversos métodos de tinción, de los cuales, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Instituto Nacional de Salud (INS) recomiendan la tinción de Ziehl Neelsen, por ser más eficaz y requerir de menor tiempo. Sin embargo; está tinción debe ser realizada de manera manual por laboratoristas con experiencia, quienes se exponen a un posible contagio. Asimismo, la tinción de todas las muestras no se realiza de manera estándar, por lo cual se pueden generar diagnósticos errados. Es en medio de esa problemática que surge la necesidad de contar con un equipo que permita realizar la tinción de manera automática, disminuyendo el tiempo de contacto del laboratorista con la muestra, así como también la posibilidad de obtener un diagnóstico errado; ya que, la tinción de todas las muestras sería estándar.

El presente documento busca dar las pautas para un primer diseño de un prototipo de un sistema automático de preparación de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC, basado en la técnica de tinción de Ziehl Neelsen. Para ello, se bosqueja el equipo y se diseñan el hardware y el software que permitan automatizar el proceso y cumplir de manera fiable con las recomendaciones dadas por el INS y la OMS; para así conseguir una tinción estándar y diagnósticos precisos.

A Dios, porque sin él nada de esto sería posible.

A mis padres y familiares, por su amor y apoyo incondicional y por estar a mi lado cuando más los necesite.

A Jimena, por ser mi novia, amiga y cómplice.

Gracias por acompañarme siempre.

A mis compañeros del proyecto PAME:
Ronald, Stefano, Pedro, Mario, Jorge, Edmundo y Mauro.

A todos quienes de alguna manera me han apoyado en la realización de esta tesis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ESTUDIO BACTERIOLÓGICO: BACILOSCOPIA.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Bacteriología y Baciloscopía: Definiciones Generales.....	3
1.3 Baciloscopía de la Tuberculosis (TBC).....	4
1.4 La Tuberculosis como enfermedad ocupacional.....	7
CAPÍTULO 2: REALIDAD SOBRE LA METODOLOGÍA DE TINCIÓN.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Problemas en la realización del método de tinción.....	11
2.3 Declaración del marco problemático.....	15
2.4 Objetivos.....	15
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO.....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Características generales del sistema.....	17
3.3 Diseño de la estructura mecánica del sistema.....	18
3.3.1 Introducción.....	18
3.3.2 Dispensadores de los reactivos.....	18
3.3.3 Soporte Principal.....	20
3.3.4 Soporte del Hardware.....	23
3.3.5 Estructura para el mechero.....	24
3.3.6 Otras estructuras.....	26
3.3.7 Equipo completo.....	28
3.3.8 Ambiente de trabajo y Material del equipo.....	29
3.4 Diseño del Hardware.....	30
3.4.1 Sensores y acondicionamiento de la señal.....	30
3.4.1.1 Introducción.....	30
3.4.1.2 Sensor de presencia de dispensador y de mechero.....	31
3.4.1.3 Sensor de identificación de reactivo y/o etapa.....	36
3.4.1.4 Sensor de detección de vapor.....	37
3.4.2 Potencia (Motores) y excitadores.....	45
3.4.2.1 Introducción.....	45
3.4.2.2 Motor para rotación de la rueda dentada del soporte principal.....	46
3.4.2.3 Motor para movimiento del mechero.....	57

3.4.2.4 Motor para abrir y cerrar dispensadores.....	63
3.4.2.5 Motor para girar el soporte de lámina portaobjetos.....	66
3.4.3 Pulsadores, Indicadores y Control.....	67
3.4.3.1 Introducción.....	67
3.4.3.2 Elección del Micro-controlador y esquemático.....	67
3.4.4 Fuentes de alimentación.....	73
3.5 Diseño del Software.....	84
3.5.1 Introducción.....	84
3.5.2 Programa principal.....	84
3.5.3 Subrutinas.....	86
3.5.3.1 Subrutina Fucsina.....	86
3.5.3.2 Subrutina Mechero.....	86
3.5.3.3 Subrutina Agua.....	88
3.5.3.4 Subrutina Alcohol Ácido.....	88
3.5.3.5 Subrutina Azul de Metileno.....	89
3.5.3.6 Subrutina buscar_etiqueta.....	90
3.5.3.7 Subrutina usar_válvula.....	91
3.5.3.8 Subrutina Campana.....	91
3.5.3.9 Subrutina de Interrupción.....	92
3.6 Costo del prototipo.....	92
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS.....	95
4.1 Introducción.....	95
4.2 Ensayo de los circuitos electrónicos y resultados.....	95
4.2.1 Ensayo del sensor MOC70t3.....	95
4.2.2 Ensayo de la etapa de regulación del detector de vapor.....	97
4.2.3 Ensayo del verificador de nivel de batería del detector de vapor.....	97
4.2.4 Ensayo del detector de vapor.....	99
4.2.5 Ensayo del receptor infrarrojo.....	100
4.2.6 Ensayo del aislamiento eléctrico.....	101
4.2.7 Ensayo del aislamiento eléctrico y del inversor.....	102
4.2.8 Ensayo del circuito de excitación y control de motores.....	103
4.3 Simulación del programa.....	107
CONCLUSIONES.....	113
RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	115

INTRODUCCIÓN

La tuberculosis (TBC) es la enfermedad infectocontagiosa más importante del mundo en cuanto a morbilidad y mortalidad. El Perú no está exento a esta peligrosa enfermedad, y por el contrario, se estima que un gran porcentaje de la población es portadora de la bacteria, sin que esto signifique que desarrollen la enfermedad. Es por esta alta incidencia de TBC que es necesario buscar formas de diagnóstico rápidas y eficaces que permitan detectar la enfermedad en sus etapas iniciales.

Los principales métodos de diagnóstico actuales, como la tinción de Ziehl Neelsen y la tinción fluorescente, trabajan con muestras de esputo y se basan en la tinción de los bacilos ácido-alcohol resistentes (BAAR). Estos métodos son explicados en los manuales de bacteriología del Instituto Nacional de Salud (INS) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Sin embargo; en la práctica, requieren de un trabajo extenso y agotador de los laboratoristas, quienes, a su vez, deben tener gran experiencia. Esto ocasiona que se puedan cometer ciertas imprecisiones, que los métodos se realicen de manera artesanal y que los laboratoristas estén expuestos a posibles contagios.

El presente documento busca dar las pautas para un primer diseño de un prototipo de un sistema automático de preparación de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC, basado en la técnica de tinción de Ziehl Neelsen; con el cual se lograría la estandarización de la tinción de las muestras. En el diseño se considera un soporte adecuado, el hardware y el software que permitan automatizar el proceso y cumplir de manera fiable con las pautas dadas por el INS y la OMS.

Para ello, el presente documento se divide en cuatro capítulos. En el primero de ellos se da una mirada panorámica y se definen algunos términos relacionados a bacteriología y baciloscopia, concentrándonos en el estudio de la tuberculosis. Asimismo, se muestran datos estadísticos que presentan a la tuberculosis como una enfermedad ocupacional.

El segundo capítulo muestra la realidad de la realización del método de tinción de Ziehl Neelsen en los hospitales de nuestro país. En ese sentido, se señalan los problemas encontrados y se fijan los objetivos de la tesis.

El diseño del sistema automático se muestra en el tercer capítulo. En este se detallan los requerimientos, alcances, alternativas de solución, criterios de selección y el diseño

detallado de cada una de las partes que conforman el sistema, iniciando por las estructuras mecánicas, siguiendo con el hardware y terminando con el software.

Por último, el cuarto capítulo muestra los ensayos y simulaciones realizados en base a los diseños presentados en el capítulo anterior. En ese sentido, busca demostrar que con los circuitos y el hardware presentados, se lograría cumplir con los objetivos planteados.

Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se ha podido llegar y las recomendaciones para la implementación y mejora del sistema.



CAPÍTULO 1

Estudio Bacteriológico: Baciloscopía

1.1 Introducción

Este primer capítulo pretende dar una mirada panorámica a la bacteriología, específicamente al análisis de la baciloscopía. Para ello, se presentarán las definiciones de ambos términos y los tipos de bacterias y de muestras con las que se realizan los diferentes métodos de estudio y análisis de las mismas. Luego, se irá cerrando el panorama para poder centrarnos en la baciloscopía de la tuberculosis. Finalmente, se mostrarán, de manera muy general, diferentes datos estadísticos que analizan a la tuberculosis como una enfermedad ocupacional.

1.2 Bacteriología y baciloscopía: definiciones generales

Etimológicamente, el término bacteriología hace referencia al estudio de las bacterias. Ampliando un poco más esta definición, la bacteriología es una rama de la microbiología, en la cual se estudian y clasifican a los tipos de bacterias, así como también su forma de reproducción, condiciones de vida y sobre todo, las enfermedades que estas producen, entre otras cosas (Murray, Rosenthal y Pfaüer, 2007).

Para clasificar a las bacterias existen diferentes formas; tales como, fenotípica, analítica y genotípica. Dentro de la clasificación fenotípica, se encuentra que un criterio de diferenciación es la forma de las células; entre ellas cocos, bacilos y espirilos (Murray, Rosenthal y Pfaüer, 2007). De esta clasificación, nos vamos a centrar en los bacilos, que son bacterias en forma de bastoncillo o filamento más o menos largo, recto o encorvado, según las especies (RAE).

Una técnica fundamental para el diagnóstico bacteriológico es la baciloscopía. Esta técnica consta de la búsqueda minuciosa de bacilos en algún tipo de muestra obtenida del organismo mediante un estudio microscópico. Esta búsqueda o lectura debe realizarse leyendo de izquierda a derecha el extendido (Velasco y otros, 2008). En una baciloscopía, existen diferentes tipos de muestras para analizar, siendo las más comunes: sangre, esputo y orina. Además, existen diferentes tipos de bacterias, específicamente bacilos, que identificar, los cuales producen algún tipo de enfermedad. Dada la gran cantidad de los mismos, en la tabla 1.2.1 se muestran algunos casos:

Tabla 1.2.1: Bacteria, tipo de muestra y enfermedad que produce.

Bacteria	Enfermedad	Muestra Clínica
Mycobacterium tuberculosis (bacilo de Koch)	Tuberculosis	Esputo
Salmonella typhi (bacilo de Eberth)	Salmonella	Heces fecales
Treponema pallidum	Sífilis	Suero
Mycobacterium leprae	Lepra	Dermis
Corynebacterium diphteriae (bacilo de Klebs-Löffler)	Difteria	Exudado faríngeo

Fuente: Elaboración personal basado principalmente en: Velasco y otros, 2008.

1.3 Baciloscopia de la tuberculosis (TBC)

Para diagnosticar la TBC existen diferentes técnicas, los cuales se muestran en la tabla 1.3.1:

Tabla 1.3.1: Técnicas de diagnóstico de TBC.

Convencionales	Nuevas
<ul style="list-style-type: none"> - Cuadro Clínico - Antecedente epidemiológico - Hallazgos radiológicos - PPD - Ziehl Neelsen - Cultivo de Lowestein Jensen - Estudio histopatológico 	<ul style="list-style-type: none"> - BAAR auramina - Cultivos líquidos - PCR (reacción en cadena de polimerasa) - Test directo de M tuberculosis MT2 - Serológicas, ADA

Fuente: Clínica de Tuberculosis - Hospital general de México OD.

De estas técnicas, una de las más utilizadas para la baciloscopia de TBC, por ser efectiva, simple, económica y relativamente rápida; además de ser la recomendada por la OMS, es la de Ziehl Neelsen. Esta técnica se basa en la tinción de los Bacilos ácido-alcohol resistentes (BAAR), de las muestras de esputo de los pacientes, siguiendo el principio de la ácido-alcohol resistencia, por el cual las microbacterias captan en su pared celular fucsina fenicada (de color fucsia) y la retienen aun con la acción de decolorantes. Esto permite identificar el bacilo de TBC como un bastoncito rojo fucsia

sobre una coloración de fondo que facilita su visualización. (Organización panamericana de la Salud, 2008).

Para realizar la tinción de Ziehl Neelsen, se necesitan seguir los siguientes pasos (Instituto Nacional de Salud, 1995):

1. Cubrir totalmente la superficie del extendido con fucsina básica fenicada, filtrada en el momento de efectuar la tinción. No use colorante sin filtrar. (Ver Figura 1.3.1)



Figura 1.3.1: Coloración con Fucsina.

2. Calentar suavemente con la llama del mechero de alcohol o un hisopo de algodón humedecido en alcohol hasta la emisión de vapores, repetir el proceso por tres veces, no debe hervir la preparación. Si el volumen del colorante disminuye por evaporación, debe agregarse más hasta cubrir totalmente el extendido y dejar enfriar. El tiempo mínimo de coloración con fucsina es de 5 minutos. (Ver Figura 1.3.2)



Figura 1.3.2: Calentamiento.

3. Eliminar la fucsina tomando la lámina por el extremo numerado entre el dedo pulgar y el índice o con una pinza, inclinándola hacia adelante y dejando caer agua corriente a baja presión sobre la parte que no tiene el extendido. (Ver Figura 1.3.3)



Figura 1.3.3: Primer lavado.

4. Cubrir la totalidad de la superficie del extendido con la solución de alcohol ácido durante 2 minutos, hasta obtener una coloración rosa pálido. De ser necesario decolorar nuevamente, efectuando movimientos en vaivén de la lámina. (Ver Figura 1.3.4)

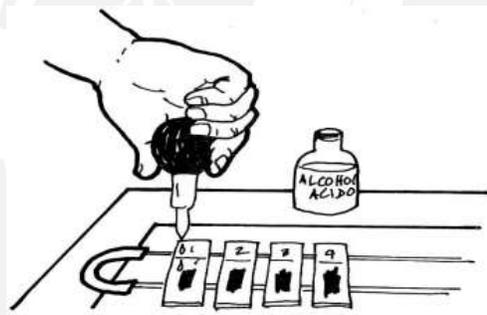


Figura 1.3.4: Decoloración con alcohol ácido.

5. Una vez eliminado el alcohol ácido lavar nuevamente la lámina con agua a baja presión, cuidando de no desprender la película que formó el extendido. (Ver figura 1.3.5)



Figura 1.3.5: Segundo lavado.

6. Cubrir la superficie del extendido con el colorante azul de metileno, previamente filtrado, durante 30 segundos a un minuto. (Ver Figura 1.3.6)

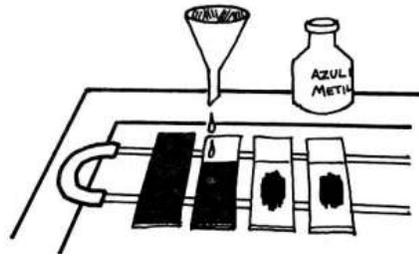


Figura 1.3.6: Coloración de Fondo con azul de metileno.

7. Eliminar el azul de metileno y lavar la lámina con agua a baja presión, por ambos lados (el que tiene el extendido, como el otro lado). (Ver figura 1.3.7)



Figura 1.3.7: Tercer lavado.

8. Colocar la lámina coloreada sobre el soporte de madera y dejar secar al medio ambiente.

Otros métodos de tinción, basados en el mismo principio son la tinción fluorescente y el método de Kinyoun.

1.4 La Tuberculosis como enfermedad ocupacional

La tuberculosis es una enfermedad en la cual las personas infectadas con el bacilo pueden o no desarrollar la enfermedad. Se estima que sólo el 10% de los infectados desarrollan la enfermedad (Mendoza-Ticona, 2012). La TBC puede manifestarse en cualquier órgano; ya que el bacilo se disemina por todo el organismo y se puede establecer en cualquier parte del cuerpo. Sin embargo; por lo general, entre el 80% y 85% de los casos, la TBC se manifiesta como enfermedad pulmonar, debido a que el

bacilo necesita abundante oxígeno para multiplicarse (Organización panamericana de la Salud, 2008).

Se estima que en el Perú, entre el 30% y 40% de la población está infectada con la bacteria de la TBC (no todos desarrollan la enfermedad). De este porcentaje, la mayor proporción estaría entre el personal de salud y los trabajadores del transporte público (Mendoza-Ticona, 2012). En ambos casos, el contagio se realiza por condiciones mismas de la ocupación que desempeñan, por lo cual se puede pensar en la TBC como una enfermedad ocupacional.

Centrándonos en el personal de salud, sector de nuestro interés, ellos para realizar cualquiera de los métodos de baciloscopía de TBC necesitan manipular y entrar en contacto con todas las muestras, algunas de las cuales pueden estar infectadas con la bacteria. Si bien la muestra de esputo en general no representa un medio de contagio directo, cuando estas se desecan y se manipulan se pueden desprender finas partículas, las cuales pueden viajar por el aire, lo cual sí representa un alto riesgo de contagio (Mendoza-Ticona, 2012). Esto se puede notar en algunos datos estadísticos que muestran la cantidad de personal de salud que se contagia de TBC.

En general, varios estudios coinciden que el riesgo anual de contraer TBC para el personal de salud es de alrededor 4.6%, lo cual representa un riesgo mayor al de la población en general. Por otro lado, específicamente en nuestro país, la incidencia de contagio de TBC en el personal de salud ha ido en aumento en los últimos años (ver figura 1.4.1). (Mendoza-Ticona, 2012).

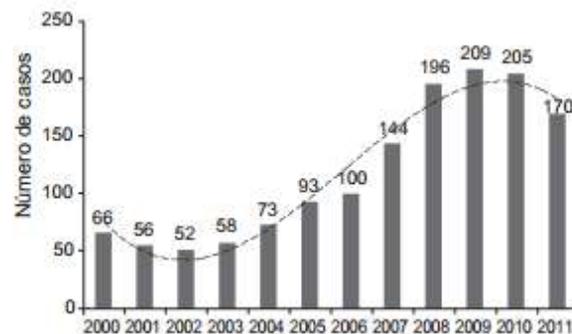


Figura 1.4.1: Casos de Personal de Salud contagiado de TBC 2000-2011.

En otro estudio realizado por el Ministerio de Salud, se informa que el riesgo de transmisión de TBC en hospitales es 3 veces mayor al riesgo de la población en general. Este mismo estudio, además de presentar algunos datos estadísticos sobre personal de salud contagiado de TBC en algunos hospitales específicos, nos muestra a detalle los casos presentados por región en el primer semestre del 2007, del cual se puede deducir que al ser Lima y Callao la región donde se atienden a más personas, es también la región donde hay más casos de incidencia de TBC en el personal de salud (Ver tabla 1.4.1). (MINSA, 2008)

Tabla 1.4.1: Casos de TBC en establecimientos de Salud en el primer semestre del 2007

REGIONES	TOTAL	TB Pulmonar	TB Extrapulmonar
AMAZONAS	1	1	0
ANCASH	1	0	1
AREQUIPA	1	1	0
AYACUCHO	1	1	0
CUSCO	2	2	0
HUANUCO	1	1	0
ICA	2	2	0
JUNIN	4	3	1
LA LIBERTAD	1	1	0
MADRE DE DIOS	2	1	1
MOQUEGUA	1	1	0
TOTAL DIRESAS	17	14	3

LIMA Y CALLAO	TOTAL	TB Pulmonar	TB Extrapulmonar
CALLAO	8	5	3
LIMA CIUDAD	24	22	2
LIMA ESTE	5	4	1
LIMA SUR	1	0	1
LIMA II I	4	3	1
TOTAL DISAS	42	34	8

	TOTAL	TB Pulmonar	TB Extrapulmonar
REGIONES	17	14	3
LIMA Y CALLAO	42	34	8
TOTAL	59	48	11

Fuente: Ministerio de Salud, 2008.

Finalmente, otro estudio muestra el porcentaje por grupo ocupacional de personal de salud, en tratamiento de la TBC MDR (multidroga resistente) entre el 1997 y 2009 (ver figura 1.4.2) (Pecho, 2012). En este estudio, se aprecia que el porcentaje de laboratoristas contagiados es de 3%, porcentaje no muy elevado, pero de todas maneras considerable.

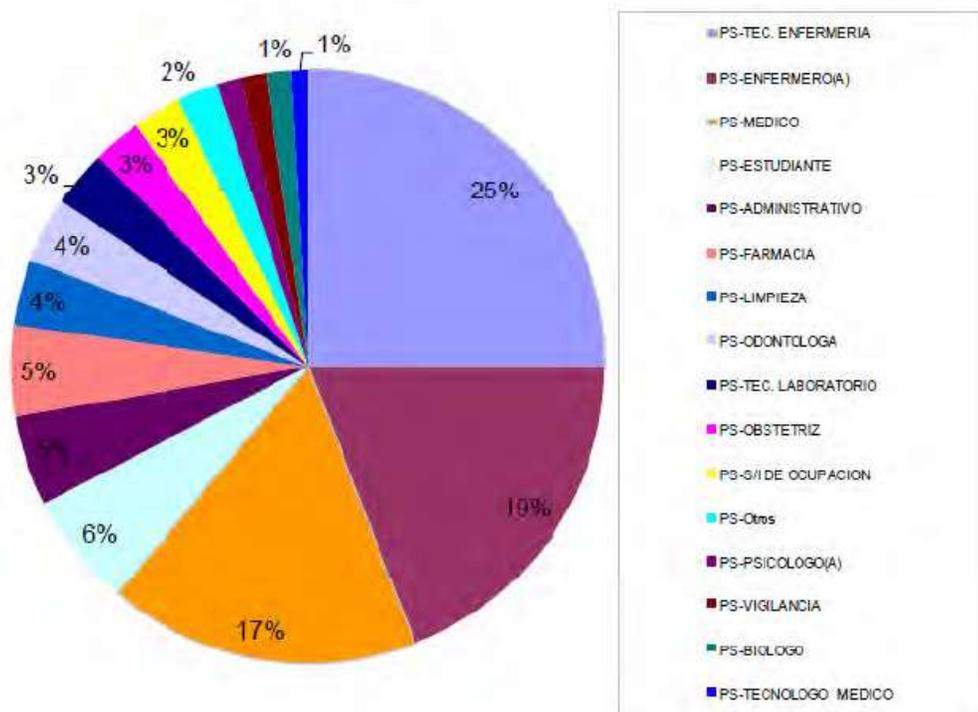


Figura 1.4.2: Proporción de casos con TB MDR en trabajadores de salud según grupo ocupacional 1997-2009.

Este último porcentaje, es el de mayor interés para el presente trabajo; ya que, los laboratoristas son los encargados de preparar y manipular las muestras.

CAPÍTULO 2

Realidad sobre la metodología de tinción

2.1 Introducción

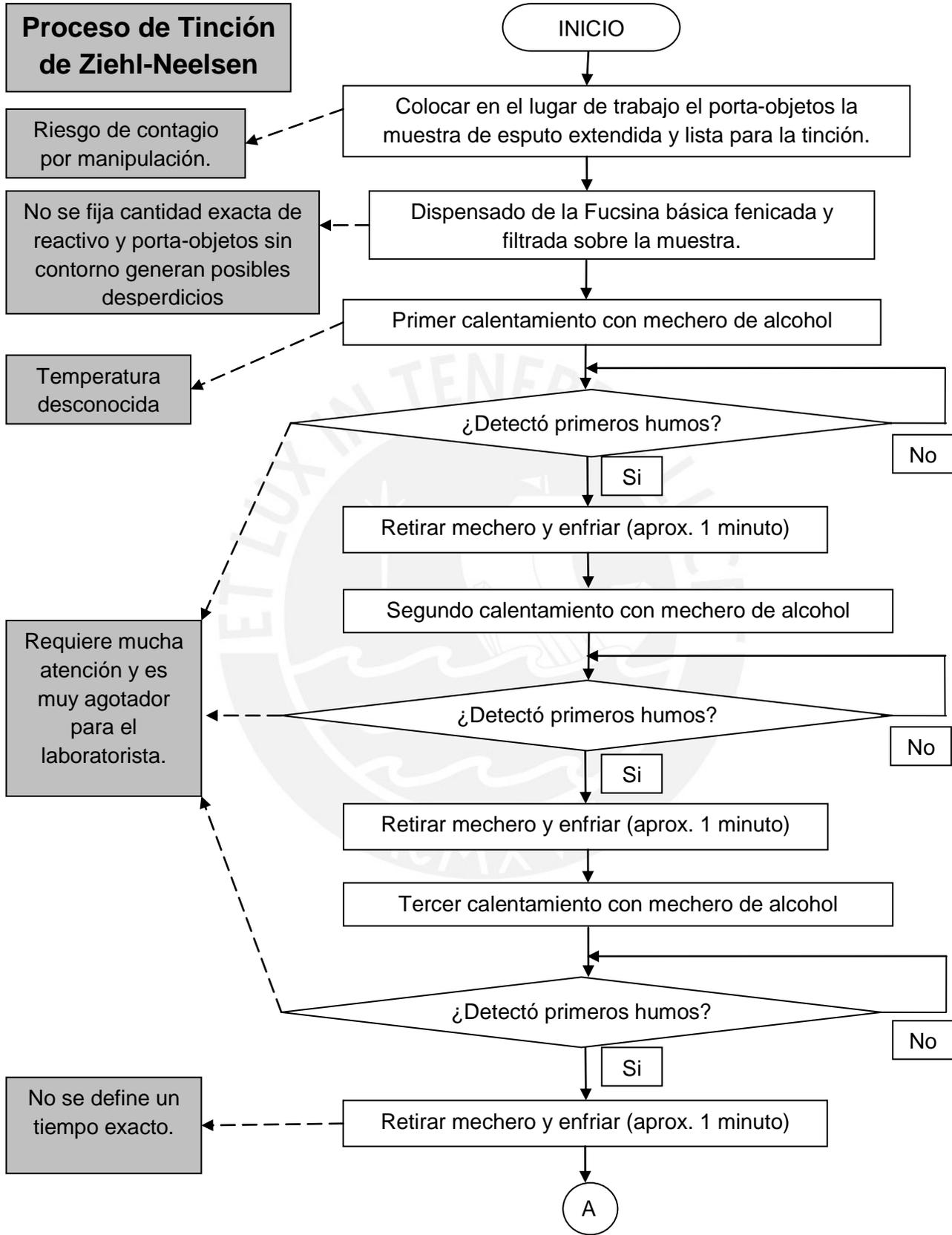
En este capítulo se pretende encontrar y señalar los problemas dentro del método de tinción de Ziehl Neelsen desarrollado en los hospitales. Para esto, se tomará como referencia lo experimentado en el Hospital Nacional Dos de Mayo. Finalmente, declararemos el marco problemático y fijaremos los objetivos de la Tesis.

2.2 Problemas en la realización del método de tinción

El método de tinción de muestras de esputo de Ziehl Neelsen, mostrado en el capítulo anterior, define algunos parámetros importantes para la correcta realización del mismo; tales como: Cubrir toda la superficie del extendido, detectar los primeros humos, lavar con agua a baja presión, cumplir con tiempos específicos para cada proceso y/o reactivo, etc. Algunos de estos parámetros son muy ambiguos y subjetivos; ya que por ejemplo, en el caso de detectar los primeros humos, depende del estado de la visión de cada laboratorista.

Los diferentes problemas, como el mencionado en el párrafo anterior, que se presentan en la realización del método de tinción por parte de los laboratoristas, se pudieron comprobar en la visita realizada al Hospital Nacional Dos de Mayo. En esta experiencia se pudo observar cual es la realidad con respecto a la forma como el personal encargado procesa las muestras. Si bien se guían del “Manual de normas y procedimientos en bacteriología de tuberculosis” otorgado por el Instituto Nacional de Salud (INS), el cual es la misma referencia que se ha utilizado para exponer el método de tinción en el capítulo anterior, se presentan muchas imprecisiones y se es susceptible a cometer algunos errores y/o descuidos.

En la figura 2.2.1, la cual se muestra a continuación, se presenta en forma de esquema el proceso de Ziehl Neelsen, en base a lo observado en el Hospital Nacional Dos de Mayo. Asimismo, se señala los diversos problemas encontrados en esa experiencia.



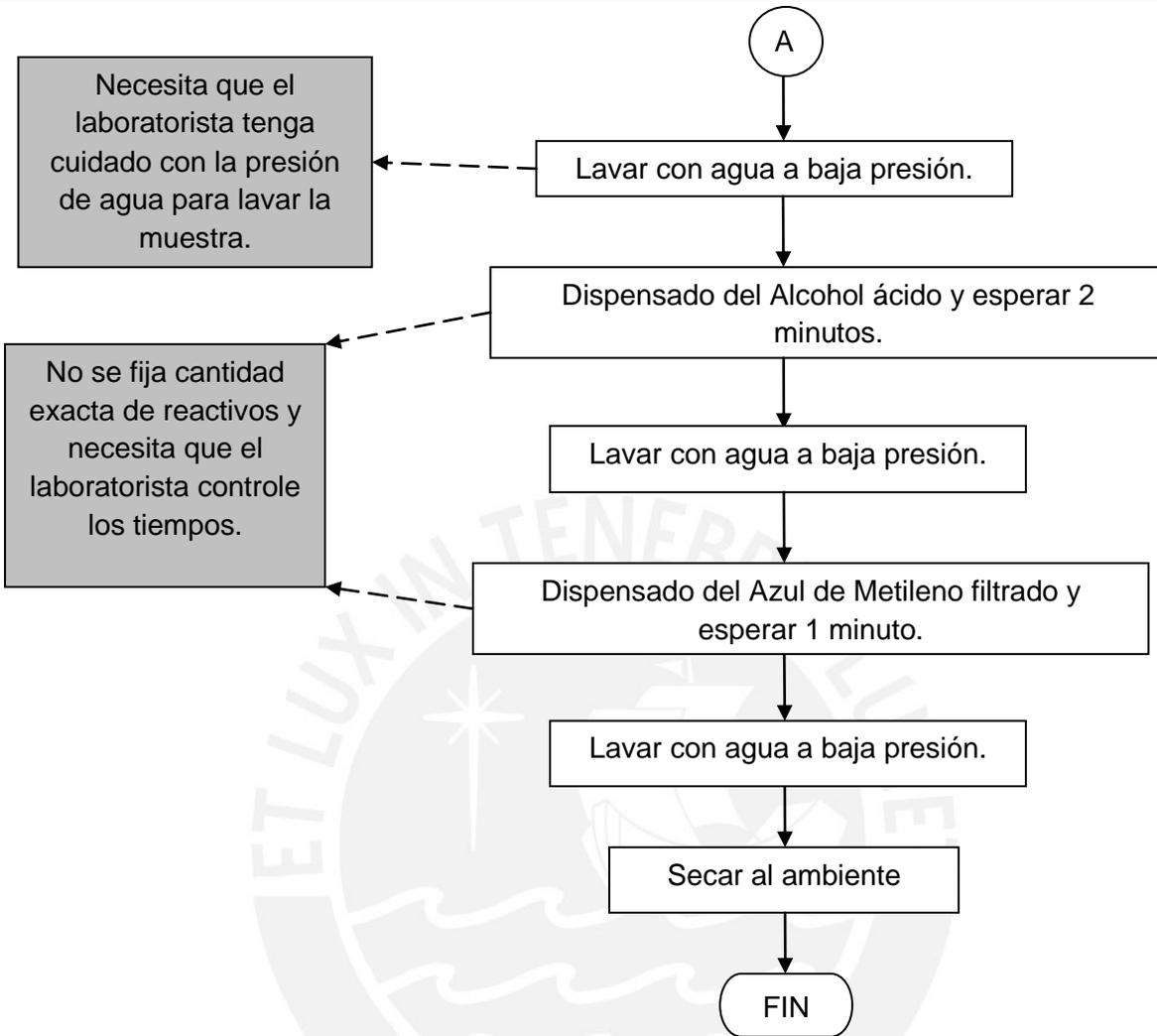


Figura 2.2.1: Proceso de Ziehl Neelsen observado en el hospital y problemas en su desarrollo.

Como se aprecia en este esquema los principales problemas son el control de los tiempos, el cual es realizado por los laboratoristas de manera aproximada; el dispensado de los reactivos para que cubran toda la muestra, en el cual ocurren desperdicios; la detección de los primeros humos; proceso tedioso, impreciso e inexacto entre una muestra y otra; y el constante riesgo de contagio de TBC. Un resumen de los problemas mostrados se muestra en la tabla 2.2.1; la cual se presenta a continuación:

Tabla 2.2.1: Problemas en la realización del método de tinción de Ziehl-Neelsen.

Hechos	Problemas y causas
Riesgo de contagio por manipulación	La manipulación constante de las muestras significa un alto riesgo de contagio, debido al posible desprendimiento de las partículas de TBC. (Nota: Se limitará la manipulación de la muestra solo a realizar el extendido.)
No se fija la cantidad exacta de los reactivos	El no tener determinada una cantidad exacta de reactivo a utilizar puede generar desperdicios.
La lámina porta-objetos no tiene contorno	El hecho que la lámina porta-objetos no tenga un contorno definido y la necesidad de cubrir el total de la muestra generan que los reactivos puedan desbordarse y desperdiciarse.
Temperatura desconocida	No hay control de la temperatura del proceso. (Nota: Este problema no se solucionará con esta tesis.)
Detección de los primeros humos	El detectar los primeros humos requiere mucha atención por parte de los laboratoristas. Asimismo, es una labor muy agotadora, que requiere de experiencia y que es muy imprecisa e inexacta. El no detectar los primeros humos puede generar que la fucsina se evapore lo cual no es favorable.
No se define tiempos exactos y se necesita controlar los mismos.	Hay tiempos del proceso que no están bien definidos. Además, se requiere que los laboratoristas estén pendientes de controlar los tiempos, lo cual no lo hacen con exactitud.
Lavar la muestra a baja presión	Se requiere controlar la presión con la que se lava la muestra; ya que, si se aplica mucha presión sobre la misma, se puede desprender la muestra de la lámina porta-objetos.

Fuente: Elaboración personal.

2.3 Declaración del marco problemático

Como se puede ver en las secciones anteriores, el proceso tradicional y manual de tinción basado en la técnica de Ziehl Neelsen, si bien está documentado y es explicado por el Instituto Nacional de Salud y la Organización Mundial de la Salud, en sus respectivos manuales de bacteriología de tuberculosis, este, al ser realizado de manera muy artesanal por los laboratoristas, presenta varios problemas.

La realización del método en sí requiere la manipulación de las muestras, por lo cual hay un gran riesgo de contagio para el laboratoristas. Asimismo, el proceso requiere que se cubra el total de la muestra con los diferentes reactivos; sin embargo, no define una cantidad exacta de los mismos y no se cuenta con un contorno para la lámina porta-objetos; por lo cual, muchas veces los reactivos se desbordan de la lámina y se producen desperdicios.

Por otro lado, para realizar la tinción se necesita detectar los primeros humos al calentar la fucsina, lo cual es muy agotador y requiere de un gran esfuerzo visual de los laboratoristas, siendo impreciso el momento de detección de una muestra y la otra. En otro sentido, se requiere cumplir con determinados tiempos para las diferentes etapas del proceso; sin embargo, los laboratoristas no verifican con exactitud el cumplimiento de los mismos, y por el contrario lo realizan de manera muy aproximada. Otro detalle es la presión con la cual se lava la muestra; ya que si se aplica mucha presión se puede desprender la misma.

Finalmente, cabe mencionar que de presentarse algún error durante el desarrollo del método de tinción, se puede generar y obtener un diagnóstico errado, creando falsos positivos y/o falsos negativos, lo cual influye en gran medida en el tratamiento que se le va a recetar al paciente. Un mal tratamiento, como se puede inferir, puede generar graves problemas, así como sucesos adversos.

2.4 Objetivos

En la sección anterior se demostró y comprobó la necesidad de contar con un equipo automático para la preparación de las muestras de esputo para el diagnóstico de TBC. En ese sentido, se plantea el siguiente objetivo general de la tesis.

Objetivo general:

Diseñar un sistema automatizado de preparación de muestras de esputo para el diagnóstico de tuberculosis, basado en el método de tinción de Ziehl Neelsen, que permita cumplir con el procedimiento bajo los estándares recomendados por el Instituto Nacional de Salud (INS) y la Organización mundial de la salud (OMS).

Objetivos específicos:

De este objetivo general y de los problemas encontrados anteriormente, se pueden, además, fijar algunos objetivos específicos:

- a) Temporizar con una exactitud de $\pm 2\%$ cada etapa del proceso de tinción según las pautas dadas en los manuales de bacteriología del INS y la OMS.
- b) Temporizar con una exactitud de $\pm 2\%$ la apertura y cierre de las válvulas de los dispensadores, de tal manera que permitan utilizar la cantidad exacta de los reactivos para cubrir la muestra, evitando desperdicios.
- c) Lograr, mediante sensores de posición, la detención de los motores que movilizarán las diferentes estructuras mecánicas en la posición exacta y con un error de $\pm 5\text{mm}$.
- d) Identificar por códigos el tipo de reactivo a dispensar, para evitar errores y poder cumplir con la secuencia del método de tinción.
- e) Lograr que el tiempo entre la detección de los primeros vapores y el retiro del mechero sea menor a 2 segundos, con lo cual se evita que la fucsina empiece a hervir.

CAPÍTULO 3

Diseño del Sistema automático

3.1 Introducción

En este capítulo se pretende diseñar de manera específica cada uno de los bloques necesarios para poder obtener el sistema automático de tinción de muestras de esputo mediante el método de Ziehl Neelsen. Para esto se divide el diseño en 3 partes: estructura mecánica, hardware (circuitos electrónicos) y software. Para cada una de ellas, se fijan los requerimientos y alcances, se presentan las alternativas de solución, se detallan los criterios de selección y finalmente se realiza el diseño detallado y con la justificación adecuada, de tal manera que se puedan cumplir con los objetivos planteados.

3.2 Características generales del sistema

La automatización de un proceso que se realiza de manera manual parte por conocer perfectamente el proceso y sus requerimientos, lo cual se ha realizado en los capítulos anteriores. Luego de esto, se procede a fijar los alcances, para finalmente realizar el diseño del sistema automático. En ese sentido, se tiene que tener claro que el diseño de un sistema automático no solo involucra el hardware o circuitos electrónicos que permitan controlar el proceso, sino también la parte mecánica del mismo y el software de control.

Primero se debe plantear un tipo de estructura mecánica a la cual controlar. Para esto, según lo visto en el proceso, se necesita, básicamente considerar 4 partes principales: un soporte para el hardware, los dispensadores de los reactivos, un soporte principal para los dispensadores y una estructura que permita sostener el mechero y realizar el movimiento de vaivén necesario para calentar la muestra. Asimismo, se necesitan otras estructuras secundarias; tales como: los acoples que permitan accionar los dispensadores, el soporte o bandeja para sujetar la lámina, una estructura para canalizar los vapores para poder detectar los mismos, entre otros.

Por otro lado, para controlar y movilizar las estructuras mencionadas será necesario principalmente contar con varios motores. En ese sentido, se necesitan fuentes de alimentación y excitadores para los mismos. Por otro lado, se necesitarán diversos

sensores para cumplir funciones como la detención de los motores en las posiciones adecuadas, la identificación de los reactivos y/o etapas, la detección de los primeros vapores, el control del movimiento del mechero, entre otras.

Finalmente, para el control en sí del proceso se propondrá el uso de algún tipo de controlador programable, en el cual se pueda desarrollar el programa que monitoree y realice las diversas etapas de la tinción de Ziehl Neelsen. En la figura 3.2.1, se muestra un esquema general de lo necesario para desarrollar el sistema automático.



Figura 3.2.1: Diagrama general del sistema automático.

3.3 Diseño de la estructura mecánica del sistema

3.3.1 Introducción

Como se ha mencionado en el punto anterior, se necesita diseñar básicamente 4 estructuras principales, además de otras secundarias. Los requerimientos, las alternativas y el diseño de cada uno de ellas se muestran a continuación.

3.3.2 Dispensadores de los reactivos

Los dispensadores son los elementos en los cuales irán los reactivos que serán utilizados durante el proceso de tinción. En ese sentido, y teniendo en cuenta que en el proceso se requieren 4 reactivos: la fucsina, el azul de metileno, el alcohol ácido y el agua; se necesitan 4 dispensadores.

Los requerimientos para los dispensadores son:

- Capacidad de 50 a 100ml.
- Livianos.
- Fácil accionamiento de apertura y cierre.
- Tener medidor de volumen.

- Tamaño adecuado.
- Fácil de sujetar.

En base a estos requerimientos, se tienen las siguientes opciones: Jeringas (figura 3.3.2.1), cámaras de goteo (figura 3.3.2.2) acopladas a una botella, peras de decantación (figura 3.3.2.3) y buretas (figura 3.3.2.4).



Figura 3.3.2.1: Jeringas



Figura 3.3.2.2: Cámara de goteo



Figura 3.3.2.3: Peras de decantación



Figura 3.3.2.4: Buretas

En base a estas opciones y a los requerimientos señalados anteriormente, es posible realizar un cuadro comparativo (tabla 3.3.2.1), señalando las ventajas y desventajas de cada una de estas opciones:

Tabla 3.3.2.1: Comparación de las opciones de dispensadores

Requerimientos	Opciones de dispensadores			
	Jeringas	Cámara de goteo con acoplo de botella	Pera de decantación	Bureta
Capacidad	✓	✓	✓	✓
Liviano	✓	x	✓	✓
Fácil accionamiento de apertura y cierre	x	x	✓	✓
Medidor de volumen	✓	x	✓	✓
Tamaño	✓	✓	✓	x
Fácil de sujetar	✓	x	✓	x

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se amplía la información dada en la tabla 3.3.2.1 de cada una de las opciones de dispensadores.

- Jeringas: Si bien cumplen con la gran mayoría de requisitos, su accionamiento, considerando que debe ser automático, es complicado por varios motivos, tales como: se necesita ejercer mucha fuerza para accionarla, por lo cual el líquido puede dispensarse a mucha presión. Además, no regresa a su posición, por lo cual, en caso de que se necesite volver a accionarla (como en la etapa del agua), se tendría que conocer la posición anterior en la cual se quedó. Esto último es una complicación innecesaria.
- Cámara de goteo con acoplo a botella: Es la peor de las opciones debido a que se necesita de un acoplo a botellas, las cuales, por lo general, superan ampliamente la capacidad necesaria, aumentando su peso y complicando la forma de sujeción. Por otro lado, si bien cuentan con una llave para regular el flujo de líquido que se dispensa, este se desgasta (generando pérdidas) y se necesita de un engranaje que se acople a esa llave.
- Pera de decantación: Es la mejor de las opciones, ya que cumple con todos los requisitos. Cuenta con una manija que facilita la apertura y cierre sin generar pérdidas y tampoco se dispensa el líquido con mucha presión. Además, su forma externa facilita su sostenimiento.
- Bureta: Si bien cumple con la gran mayoría de los requisitos y, al igual que con la pera de decantación, cuenta con la misma manija de apertura y cierre, su tamaño demasiado largo dificulta la forma de sujetarla.

En base a estas comparaciones y a la tabla 3.3.2.1, se logra deducir que la mejor opción para los dispensadores de reactivos son las peras de decantación.

3.3.3 Soporte Principal

El soporte principal es la estructura en la cual se encontrarán principalmente los 4 dispensadores (según lo determinado anteriormente serían las peras de decantación). Además, en esta estructura se debe ubicar también el sistema de canalización de los vapores y el sensor que detectará los mismos en la etapa

de calentamiento de la fucsina. En ese sentido, los requerimientos que se pueden fijar para esta estructura son los siguientes:

- Estable.
- Estructura simple.
- Resistente (Posibilidad de soportar el peso de los dispensadores llenos).
- Dimensión mínima posible.
- Posibilidad de movilizar la ubicación de los dispensadores.
- Baja resistencia al movimiento.
- Fácil acoplo con la estructura de soporte de Hardware.

En base a estos requerimientos, se presentan las siguientes 2 opciones: Estructura rectangular con sistema piñon-cremallera (figura 3.3.3.1) y rueda dentada con rodaje central (figura 3.3.3.2).

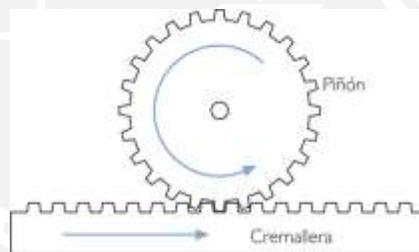


Figura 3.3.3.1: Sistema piñon-cremallera



Figura 3.3.3.2: Rueda dentada con rodaje central

Con estas opciones y los requerimientos señalados anteriormente, es posible realizar un cuadro comparativo (tabla 3.3.3.1), señalando ventajas y desventajas de cada uno de estos sistemas en la construcción del soporte principal:

Tabla 3.3.3.1: Comparación de opciones para el Soporte principal

Requerimientos	Opciones de Soporte principal	
	Sistema piñón-cremallera	Rueda dentada con rodaje central
Estable	✓	✓
Estructura simple	x	✓
Resistente	✓	✓
Dimensión mínima posible	x	✓
Posibilidad de movilizar la ubicación de los dispensadores.	✓	✓
Baja resistencia al movimiento.	x	✓
Fácil acoplo con la estructura de soporte de Hardware.	✓	✓

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se amplía la información dada en la tabla 3.3.3.1, con el fin de justificar de manera más detallada la elección del sistema de rueda dentada con rodaje central.

- Sistema piñón-cremallera: Con este sistema se debe considerar que el piñón sería parte de la caja reductora que estará acoplada al motor, por lo tanto el piñón estará fijo en una posición. Esto implica que el soporte principal debe tener una cremallera por lo cual su forma sería rectangular. Considerando ese detalle y además considerando que este soporte debe sostener 4 peras de decantación y el sistema de canalización de los vapores, se puede deducir que el soporte tendría una longitud considerable. Además, este sistema complica la estructura del soporte en sí misma y no tiene una baja resistencia al movimiento.
- Rueda dentada con rodaje central: Con este sistema, el soporte principal solo requiere de un tubo central unido a una base y que en la parte superior tenga rodajes que se puedan unir a la rueda dentada.

Además, el tener rodajes implica menor resistencia al movimiento (casi despreciable). Por último, el tener forma circular permite que tenga una menor dimensión.

Con estas consideraciones se justifica la elección del sistema de rueda dentada con rodaje central. En la figura 3.3.3.3 se muestra un bosquejo de cómo sería esta estructura a la cual se ha agregado una corona circular inferior unida a la rueda dentada con la finalidad de que las peras de decantación tengan una mayor estabilidad.

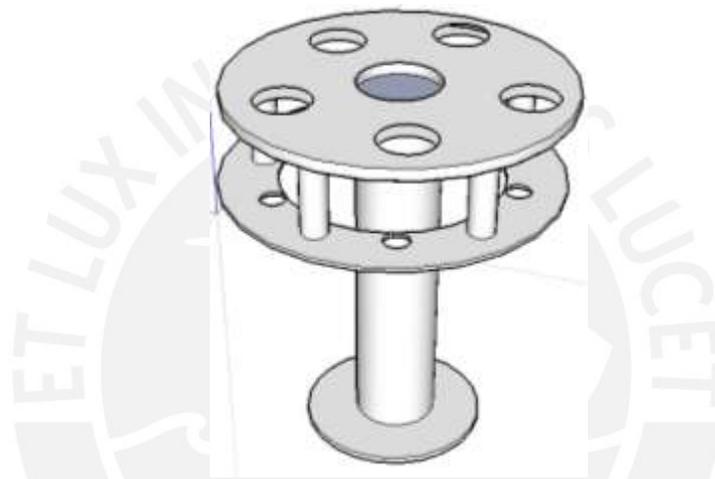


Figura 3.3.3.3: Soporte Principal

3.3.4 Soporte del Hardware

El soporte de hardware es donde se colocarán las diversas tarjetas electrónicas, así como también los motores que se utilizarán. Asimismo, debe tener varios niveles para poder colocar los motores que sostendrán la bandeja y abrirán las peras de decantación; así como también el motor que rotará el soporte principal. En ese sentido, los requerimientos de este soporte son:

- Estable.
- Tener varios niveles.
- Resistente.
- Posibilidad de sostener las tarjetas y componentes electrónicos.

Dado que los requerimientos son mínimos, se plantea una estructura rectangular con cuatro niveles: la base, un nivel donde estará el motor para la bandeja en la cual estará la lámina portaobjetos, un nivel para el motor que abrirá la llave de las peras de decantación y un último nivel para el motor que moverá la rueda del soporte principal. Asimismo, las diversas tarjetas electrónicas se podrán ubicar en cada uno de esos niveles según conveniencia. En la figura 3.3.4.1 se muestra un esquema del soporte de Hardware.

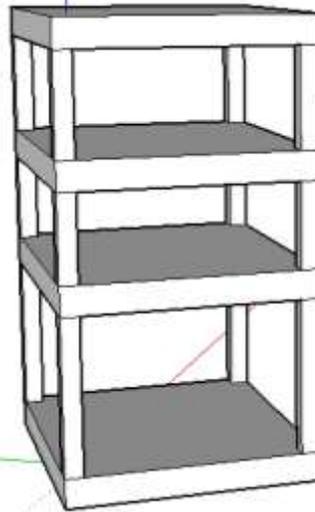


Figura 3.3.4.1: Soporte de Hardware

3.3.5 Estructura para el mechero

La estructura para el movimiento del mechero debe permitir sostener el mechero y movilizar el mismo linealmente en ambas direcciones, de tal manera que permita realizar el calentamiento homogéneo de toda la superficie de la lámina portaobjetos. En ese sentido, y dado que se utilizará un motor para guiar el movimiento del mechero, se requiere convertir el movimiento circular en un movimiento lineal. Por lo tanto, los requerimientos de esta estructura son:

- Convertir movimiento circular en movimiento lineal.
- Estructura simple.
- Sostener el mechero.
- Dimensión mínima posible (debido a que se ubicará entre el soporte de hardware y el soporte principal).

Para cumplir con estos requerimientos, en ambas opciones se plantea utilizar el mecanismo de biela – manivela. Sin embargo, una opción sería utilizar un brazo articulado, en el cual un segmento del brazo es la manivela (acoplada al motor) y el otro la biela (figura 3.3.5.1), y la otra opción sería utilizar un disco (manivela) con una biela (figura 3.3.5.2). En ambos casos se requieren de rieles o guías en las cuales se movilizará el mechero. En la tabla 3.3.5.1 se muestra una comparación entre ambas opciones.

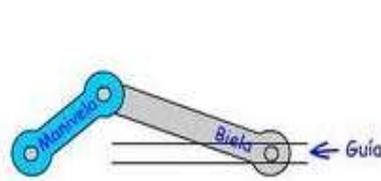


Figura 3.3.5.1: Brazo articulado

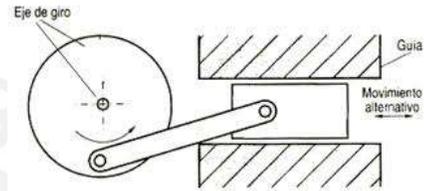


Figura 3.3.5.2: Disco y biela

Tabla 3.3.5.1: Comparación de opciones para la estructura del mechero

Requerimientos	Opciones de Soporte principal	
	Brazo articulado	Disco y biela
Convertir movimiento circular en movimiento lineal	✓	✓
Estructura simple	✓	x
Sostener el mechero	✓	✓
Dimensión mínima posible	✓	x

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 3.3.5.1, el brazo articulado representa la mejor opción para la estructura del mechero, debido a que simplifica la estructura y reduce la dimensión de la misma. A continuación, se detalla y aclara lo mostrado en esta tabla.

- Brazo articulado: Esta opción permite que la manivela vaya acoplada al motor y solo se requiere de un bloque que sostenga el motor. Asimismo,

reduce la dimensión de la longitud de la biela y de toda la estructura en sí misma.

- Disco y biela: En este caso se requiere que el motor movilice la rueda, para lo cual o bien se requiere de una rueda dentada o de una estructura que permita colocar el motor al centro de la rueda. En ambos casos, esto es más complicado que la opción de brazo articulado. Asimismo, el requerir de un disco implica una mayor dimensión; ya que para cubrir una mayor longitud lineal se requiere de un disco de mayor radio.

En la figura 3.3.5.3 se muestra un bosquejo de la estructura del mechero.

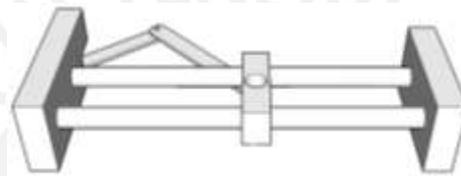


Figura 3.3.5.3: Estructura del mechero.

3.3.6 Otras estructuras

Otras estructuras que hay que considerar para poder tener un sistema funcionando de manera óptima, son las siguientes:

- Acoples para abrir y cerrar los dispensadores: Para abrir y cerrar las peras de decantación se requiere de una pequeña estructura en forma de “C” que, acoplada a un motor, permita que las manijas de las peras de decantación se coloquen en el medio y puedan girar 90°. En la figura 3.3.6.1 se muestra un bosquejo de esta estructura.

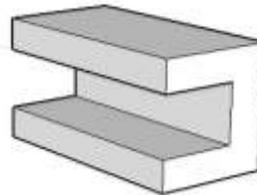


Figura 3.3.6.1: Acoples para abrir y cerrar los dispensadores.

- Soporte o bandeja para sujetar la lámina portaobjetos: Como se observó, uno de los problemas era que la lámina portaobjetos no tenía

un borde, por lo cual los reactivos se podrían desbordar. Por este motivo, se requiere de una estructura que permita poner un borde a la lámina, así como también que sujete la misma para el momento de desechar los reactivos, momento en el cual la lámina se girará. Por este motivo, este soporte debe acoplarse a un motor. En la figura 3.3.6.2 se muestra un bosquejo.

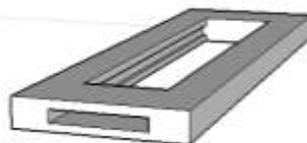


Figura 3.3.6.2: Soporte para lámina portaobjetos.

- Canalizador de vapores: Dado que se requiere detectar los vapores en la etapa del calentamiento de la fucsina, se requiere de una estructura que se posicione sobre la lámina portaobjetos y que canalice los vapores hacia el sensor. Es por eso, que se plantea un estructura en forma de pirámide rectangular unida a un tubo cuadrado de menor dimensión (figura 3.3.6.3). Este canalizador se colocaría en el soporte principal.

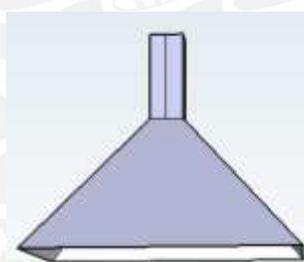


Figura 3.3.6.3: Canalizador de vapores.

- Canaleta para desecho de reactivos: Como se ha mencionado anteriormente, se requiere, en varios momentos del proceso, desechar los reactivos para permitir el dispensado del siguiente reactivo a utilizar. En ese sentido, se requiere de una estructura que canalice los líquidos hacia un depósito. Por tal motivo, se plantea la estructura que se muestra en la figura 3.3.6.4.

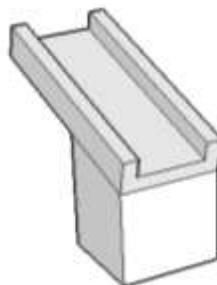


Figura 3.3.6.4: Canaleta para desecho de reactivos.

3.3.7 Equipo completo

Con las diversas estructuras mecánicas mostradas anteriormente, se puede realizar un bosquejo del equipo completo (ver figura 3.3.7.1) mostrando las posiciones que tendrían el soporte principal, el soporte de hardware, la estructura del mechero y la canaleta para desecho de reactivos. Hay que resaltar que todas estas estructuras estarían fijas sobre una misma base. Asimismo, cabe mencionar que el soporte de hardware tendrá planchas de acrílico en tres de sus caras laterales (menos en la que da hacia el soporte principal) para que las tarjetas electrónica no estén a la vista.

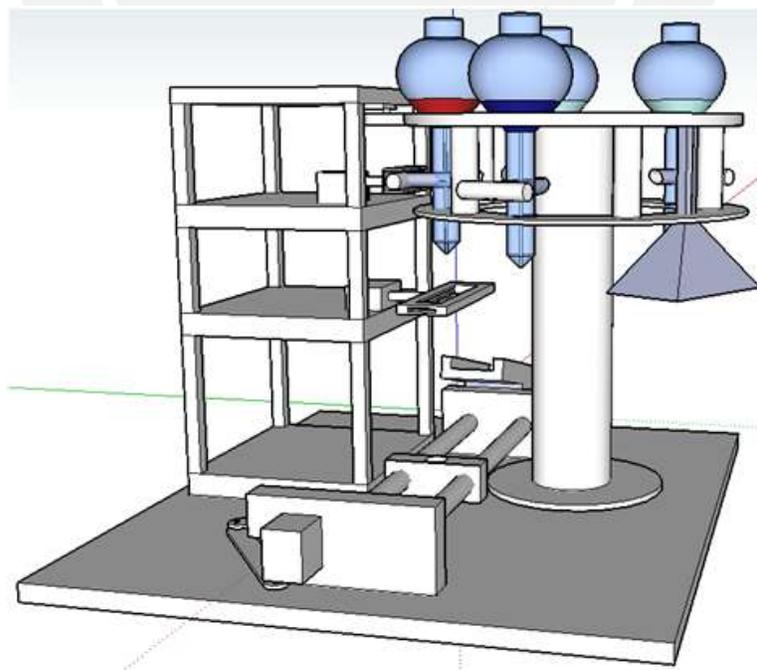


Figura 3.3.7.1: Bosquejo del equipo completo.

3.3.8 Ambiente de trabajo y Material del equipo

Como se puede suponer, el equipo se encontrará en un laboratorio de bacteriología. Por lo general, estos ambientes son sumamente limpios y ventilados, dado que así se reduce el riesgo de contagio al personal que ahí labora. Asimismo, los equipos que se utilizan en este laboratorio deben ser de fácil desinfección, esterilización y limpieza. Es por eso que la elección del material con el cual se construirá el equipo es fundamental, teniendo como requerimientos básicos los siguientes:

- Material de fácil limpieza, desinfección y esterilización.
- Material resistente a químicos y corrosión.

En ese sentido, los materiales con los cuales se realizan los equipos médicos y de laboratorio son por lo general de aluminio o acero inoxidable; ya que ambos cumplen con los requerimientos mencionados. Sin embargo; si bien el acero inoxidable presenta mayor resistencia a la corrosión, este es también más caro y más pesado (7850 Kg/m^3) que el aluminio (2700 Kg/m^3). Es por eso, que para lograr un equipo económico y resistente a la corrosión, se plantea utilizar ambos materiales para diferentes partes del equipo, según se menciona a continuación:

- Dispensadores: Las peras de decantación son equipos usados normalmente en los laboratorios. Estas están hechas de vidrio o pyrex, por lo cual son factibles de esterilizar y limpiar con facilidad.
- Soporte principal: Este será hecho básicamente de aluminio por no tener contacto directo con los reactivos o con la lámina portaobjetos. Asimismo, la rueda dentada se puede hacer de plástico (polietileno).
- Soporte de hardware: Al igual que el soporte principal, este será de aluminio. Cabe mencionar que las tarjetas serán colocadas con un aislamiento adecuado, dado que el aluminio es un material conductor.
- Estructura de mechero: Será principalmente de aluminio por las mismas razones que las mencionadas en el soporte principal.
- Acoples para abrir y cerrar dispensadores: Serán de aluminio. En el interior; es decir, en la zona que entrará en contacto con la manija de las peras de decantación, se colocará una funda o tela, para evitar el contacto directo del aluminio con el vidrio.

- Soporte para lámina portaobjetos: Será realizada de acero inoxidable debido a que entra en contacto directo con los reactivos y con la lámina donde se coloca la muestra.
- Canalizador de vapores: Este será hecho de acero inoxidable; ya que, por este pasarán los vapores y debe tener una muy buena respuesta a la corrosión.
- Canaleta para desecho de reactivos: Será hecha de acero inoxidable; ya que, entra en contacto directo con los reactivos.

Finalmente, cabe mencionar que la base del equipo donde se colocarán todas las partes del mismo, será de aluminio.

3.4 Diseño del Hardware

3.4.1 Sensores y acondicionamiento de la señal

3.4.1.1 Introducción

En la sección 3.2 se mencionó la necesidad de contar con diversos sensores para el desarrollo y correcto funcionamiento del sistema. En ese sentido, y profundizando en lo mencionado, se necesita:

- Un sensor de presencia: para que indique que la pera de decantación y/o el canalizador de vapores está posicionado sobre la lámina portaobjetos.
- Tres sensores de presencia: para determinar y controlar el movimiento en vaivén del mechero.
- Sensor/ sensores de identificación de reactivos: para poder determinar qué reactivo se ha posicionado sobre la lámina portaobjetos para poder seguir con la secuencia del método de Ziehl Neelsen de manera correcta.
- Un sensor detector de vapor: de buena sensibilidad que pueda detectar la presencia de vapores en la etapa del calentamiento de la fucsina.

A continuación, se eligen los sensores adecuados para cada una de las necesidades mencionadas. Asimismo, se procede con diseñar los circuitos electrónicos y el acondicionamiento de la señal para cada uno de ellos.

3.4.1.2 Sensor de presencia de dispensador y de mechero

Para poder determinar que una pera de decantación o el canalizador de vapor están posicionados al centro de la lámina portaobjetos se requiere de un sensor de presencia. Asimismo, para el caso del mechero, es necesario determinar y conocer tres posiciones: una a cada extremo de la lámina portaobjetos y una más alejada al punto de partida del mechero. Para poder determinar estas tres posiciones también se usarán tres sensores de presencia. En ese sentido, los requerimientos para elegir el sensor adecuado son:

- Dos estados de salida: 0V y 5V ('0' y '1' lógico para el controlador).
- Buen aislamiento eléctrico.
- Detección rápida que impida un corrimiento de las estructuras (peras de decantación y mechero) mayor a 7.5mm (10% de la longitud de la lámina portaobjetos).
- Bajo consumo de potencia.

Para poder cumplir con estos requerimientos se han considerado, básicamente, dos sensores ópticos: MOC70T3 (figura 3.4.1.2.1) y CNY70 (figura 3.4.1.2.2). En ese sentido, considerando a ambos sensores como buenas opciones para cumplir con los requerimientos, se muestra en la tabla 3.4.1.2.1, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, con el fin de elegir el sensor óptimo para la aplicación.



Figura 3.4.1.2.1: MOC70T3



Figura 3.4.1.2.2: CNY70

Tabla 3.4.1.2.1: Comparación de sensores de presencia

Requerimientos	Opciones de sensores de presencia			
	MOC70T3		CNY70	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Dos estados de salida: 0V y 5V (‘0’ y ‘1’ lógico)	Corte y Saturación.	✓	Corte y Saturación.	✓
Buen aislamiento eléctrico	Empaque permite buen aislamiento a interferencia externa.	✓	Mal aislamiento frente a interferencia externa.	x
Detección rápida que impida un corrimiento mayor a 7.5mm.	$t_{on}=20\mu s$ $t_{off}=80\mu s$	✓	No se menciona en la hoja de datos.	x
Bajo consumo de potencia	300mW	✓	200mW	✓

Fuente: Elaboración propia.

Ampliando la información mostrada en la tabla 3.4.1.2.1, se puede mencionar lo siguiente:

- MOC70T3: Este sensor cumple con todos los requerimientos mencionados; ya que permite dos estados a la salida, presenta una buena protección y/o aislamiento frente a interferencia de luz externa, tiene una detección rápida (tiempos t_{on} y t_{off} del orden de μs) y su consumo de potencia es bajo. Para poder detectar la presencia solo se requiere de un elemento que interrumpa la señal del emisor de luz hacia el optotransistor.
- CNY70: Este sensor, si bien tiene un menor consumo de potencia que el MOC70T3, y también permite dos estados a la salida, para esto requiere de un elemento reflector posicionado al frente. Asimismo, como se puede ver en su hoja de datos (figura 9 de ese documento) su voltaje de salida depende en gran medida de la distancia a la cual se ubique el

elemento reflector. Asimismo, no presenta protección y/o aislamiento frente a interferencias de luz externa. Por último, en la hoja de datos, el fabricante no menciona los tiempos t_{on} y t_{off} , por lo cual se asume son mayores al del MOC70T3. Por lo tanto, tendría una detección más lenta.

Según lo mencionado anteriormente y lo mostrado en la tabla 3.4.1.2.1, se puede concluir que el sensor óptimo es el MOC70T3. En base a este, se realiza el diseño del circuito para el acondicionamiento de la señal, de tal manera que se puedan cumplir con los requerimientos mencionados.

En primer lugar se muestra en la figura 3.4.1.2.3 la configuración interna del MOC70T3, el cual se basa en un diodo infrarrojo y en un opto-transistor; y el esquemático del circuito electrónico que se plantea:

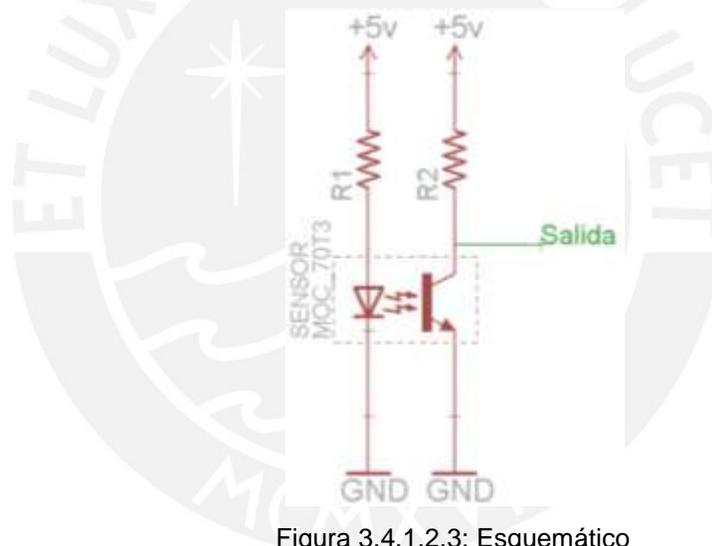


Figura 3.4.1.2.3: Esquemático

Para poder determinar R1 se asume una fuente de alimentación (V_{cc}) de 5V, y se opta por una corriente de 10mA para que circule por el LED (I_F). Con estos valores, podemos determinar la caída de voltaje en el LED (V_F) mediante la figura 1 de la hoja de datos de este sensor (anexo 1) (figura 3.4.1.2.4):

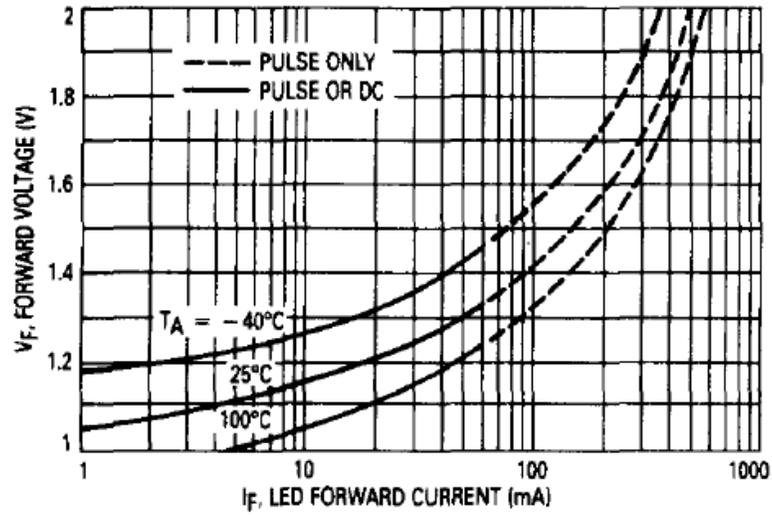


Figura 3.4.1.2.4: I_F vs. V_F .

Como se puede observar para $I_F=10\text{mA}$, corresponde una caída de voltaje $V_F= 1.1\text{V}$. Entonces R1 sería:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{5\text{V} - 1.1\text{V}}{10\text{mA}} = 390\Omega$$

Para determinar R2 se sabe; por la hoja de datos, que la caída de voltaje colector-emisor típica en saturación ($V_{CE(SAT)}$) es de 0.25V. Asimismo, mediante la figura 6 de la hoja de datos (figura 3.4.1.2.5) podemos saber el porcentaje de reducción de la corriente colector (I_C) con respecto a I_F .

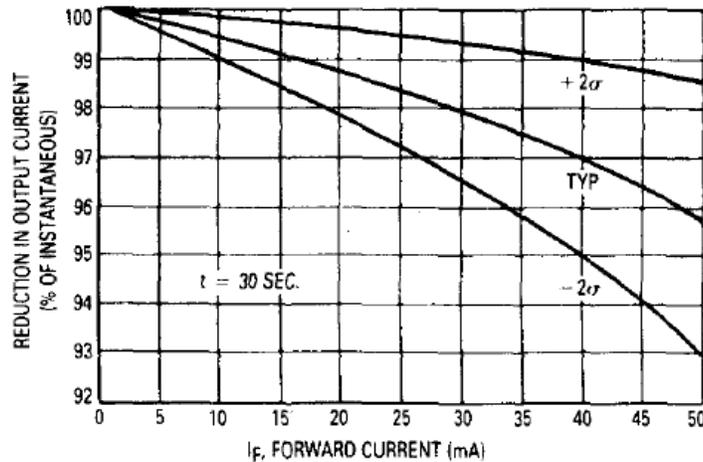


Figura 3.4.1.2.5: Reducción de I_C con respecto a I_F .

Como se puede observar, para $I_F=10\text{mA}$, la reducción está entre 100% y 99%. Tomando una reducción del 99%, se determina una corriente colector $I_C=0.1\text{mA}$. Por lo tanto, R_2 sería:

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{CE(SAT)}}{I_C} = \frac{5V - 0.25V}{0.1\text{mA}} = 47.5\text{k}\Omega$$

Finalmente, dado que $47.5\text{k}\Omega$ no es un valor comercial, se opta por $47\text{k}\Omega$. En ese sentido el esquemático sería como se muestra en la figura 3.4.1.2.6.

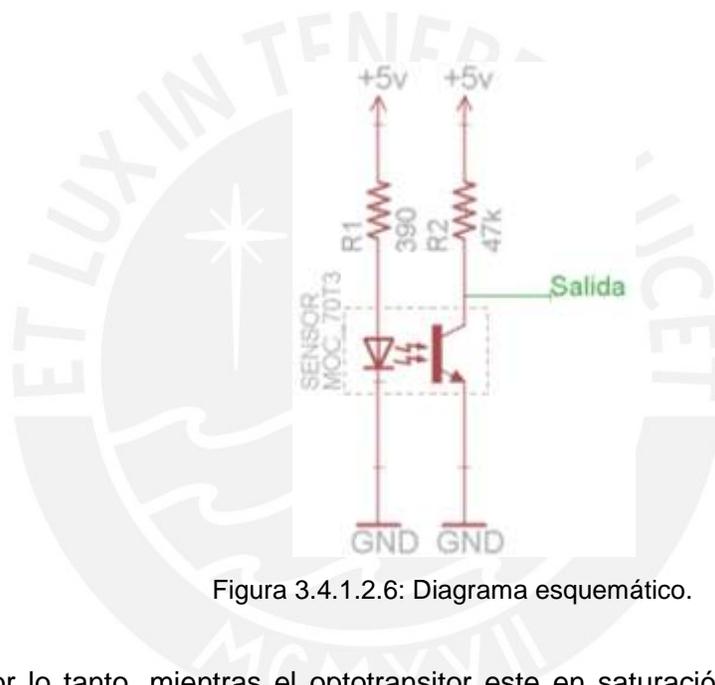


Figura 3.4.1.2.6: Diagrama esquemático.

Por lo tanto, mientras el optotransistor este en saturación, en la salida se tendrá un valor cercano a $V_{CE(SAT)}=0.25\text{V}$. En cambio, cuando pasa a corte porque algún objeto obstruye el paso de la luz, a la salida se tiene un valor muy cercano a $V_{CC}=5\text{V}$. Cabe recordar que como se requieren 4 sensores, se requieren también 4 circuitos como el mostrado.

Finalmente se muestra la cara de pistas (figura 3.4.1.2.7) y la cara de componentes (figura 3.4.1.2.8).

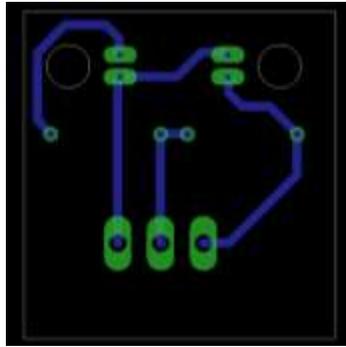


Figura 3.4.1.2.7: Cara de Pistas.

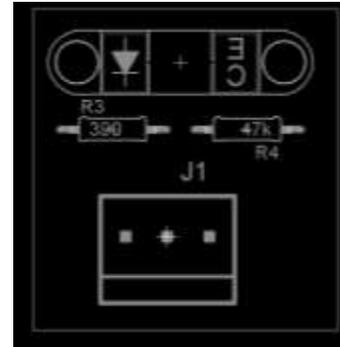


Figura 3.4.1.2.8: Cara de Componentes.

3.4.1.3 Sensor de identificación de reactivo y/o etapa

Para poder determinar el tipo de reactivo y/o etapa, se plantea identificarlos por una combinación de 3 bits. Para esto, se pueden usar 3 sensores, cada uno de los cuales puede tener a la salida '0' o '1' lógico. Combinando las salidas de estos 3 sensores se pueden tener hasta 8 combinaciones, con lo cual hay más combinaciones de las que se necesitan, que son básicamente 5: fucsina, canalizador de vapor, agua, alcohol ácido y azul de metileno. Por lo tanto, siguiendo con este planteamiento de solución se requiere elegir el sensor para cumplir con los siguientes requerimientos:

- Dos estados de salida: 0V y 5V ('0' y '1' lógico para el controlador).
- Buen aislamiento eléctrico.
- Tiempo de encendido (t_{on}) y tiempo de apagado (t_{off}) del orden de los μs para rápida lectura del código.
- Bajo consumo de potencia.

Como podemos notar, los requerimientos son los mismos que los del sensor de presencia. De igual manera que para ese caso, las opciones de sensores serían el MOC70T3 y el CNY70. Según lo desarrollado anteriormente y lo mostrado en la tabla 3.4.1.2.1, el sensor para identificación de reactivo y/o etapa sería el MOC70T3. Asimismo, el circuito esquemático, cara de componente y cara de pistas, ya han sido diseñados y se muestran en las figuras 3.4.1.2.6, 3.4.1.2.7 y 3.4.1.2.8 respectivamente.

3.4.1.4 Sensor de detección de vapor

Como se ha mencionado anteriormente, para el momento del calentamiento de la fucsina, el método de Ziehl Neelsen dado por la OMS y el INS indica que se deben detectar los primeros vapores. Para ello se plantea usar un sensor de humedad, dado que el porcentaje de humedad relativa que detecte este sensor aumentará al detectar los vapores. En otras palabras, comparando la señal sensada con una señal de referencia determinada, podemos saber si hay o no vapores. Para lograr esto, es fundamental elegir un adecuado sensor de humedad, el cual debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Bajo tiempo de respuesta.
- Tiempo de establecimiento del orden de los ms.
- Rango de operación mayor a 90% HR.
- Resolución menor o igual a 1% HR.
- Voltaje de alimentación de 5V.
- Resistente a vapor de químicos.
- Bajo consumo de corriente.

En base a estos requerimientos, se presentan dos opciones: DHT22 (figura 3.4.1.4.1) y HIH-5031 (figura 3.4.1.4.2). Asimismo, en la tabla 3.4.1.4.1 se comparan estas opciones en base a los requerimientos mencionados:



Figura 3.4.1.4.1: DHT22



Figura 3.4.1.4.2: HIH-5031

Tabla 3.4.1.4.1: Comparación de sensores de humedad

Requerimientos	Opciones de sensores de humedad			
	DHT22		HIH-5031	
	Característica	¿Ventaja?	Característica	¿Ventaja?
Bajo tiempo de respuesta.	En promedio 2s. ¹	✓	Típico 5s.	x
Tiempo de establecimiento del orden de los ms.	No se menciona. ²	✓	70ms	✓
Rango de operación mayor a 90% HR.	0 – 100% HR	✓	0 – 100% HR	✓
Resolución menor o igual a 1% HR.	0.1% HR	✓	No se menciona. ³	✓
Voltaje de alimentación de 5V.	3.3V a 6V	✓	2.7V a 5.5V	✓
Resistente a vapor de químicos.	No resiste. Daña su sensibilidad.	x	Resistente	✓
Bajo consumo de corriente.	Medición: 1.5mA Espera: 50uA	x	Máximo 500uA.	✓

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 3.4.1.4.1, ambos sensores cumplen con la mayoría de los requerimientos, pero también presentan ciertas desventajas cada uno. En el caso del DHT22, este sensor no es resistente a vapores de químicos; por lo cual, es probable que la exposición al vapor de la fucsina dañe su sensibilidad. Asimismo, tiene un mayor consumo de corriente. Para el caso del HIH-5031, el sensor presenta un mayor tiempo de respuesta. Sin embargo; cabe señalar que de todos los sensores observados, salvo el DHT22, el menor tiempo de respuesta encontrado es 5s. Teniendo esto en consideración y observando las desventajas del sensor DHT22, se decide optar por el sensor HIH-5031, con el cual se

¹ En la hoja de datos se utiliza el término período de sensado.

² Si bien no se menciona el tiempo de establecimiento del sensor DHT22, por lo observado en la hoja de datos se asume que cumple con el requerimiento.

³ En la hoja de datos no mencionan la resolución o sensibilidad del sensor HIH-5031. Sin embargo; por el dato de repetibilidad (0.5% HR), se demuestra que cumple con el requerimiento.

tendrán que realizar pruebas para comprobar si el tiempo de respuesta es crítico o no.

Con el sensor de humedad seleccionado, se procede a realizar el diseño del circuito electrónico, para lo cual se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La tarjeta electrónica estará ubicada en el soporte principal, el cual girará, por lo cual la fuente de alimentación será proporcionada por una batería de 9v.
- Se debe regular el voltaje de 9V a 5V; ya que el sensor tiene un voltaje de alimentación de 5V.
- Se debe indicar cuando el nivel de la batería es bajo.
- El nivel de comparación se debe poder adaptar (según las condiciones de humedad del día).
- La humedad relativa a partir de la cual se asumirá que hay vapores será de 95%.

Como se ha mencionado, el circuito estará alimentado por una batería de 9V, por lo cual se requiere de un regulador de voltaje a 5V. Por otro lado, la señal de salida del sensor ingresará a un comparador, con el cual se encenderá un led infrarrojo en el caso de detección de vapor. Para esto se plantea el siguiente circuito esquemático (figura 3.4.1.4.3):

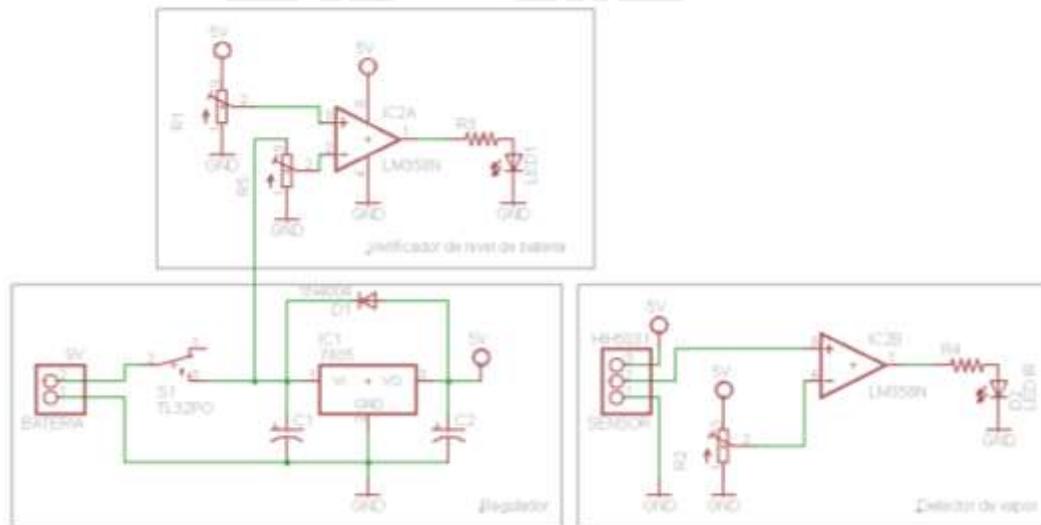


Figura 3.4.1.4.3: Diagrama esquemático para el sensor de humedad.

Como se puede observar, el circuito consta de tres etapas: Regulación de 9V a 5V, verificación del nivel de la batería y la detección de vapor en sí misma. Para la etapa de regulación, se ha tomado como elemento base el regulador TLE4274-V50 (anexo 2); debido a que este solo requiere que el voltaje de entrada (V_i) sea 0.5V más que el voltaje deseado a la salida (V_o). Esta ventaja permitirá una mayor duración de la batería; dado que, para un $V_o=5V$ se requiere mínimo de un $V_i=5.5V$. Asimismo, se ha considerado un interruptor (S_1), el cual se debe presionar en el momento del calentamiento y se debe abrir culminada esta etapa, para de esta manera conseguir una mayor duración de la batería. Igualmente, se ha colocado un diodo de protección 1N4004 (anexo 3), el cual soporta hasta 1A; dado que, al abrir el interruptor, el capacitor C_2 buscará descargarse. Si no colocamos el diodo, el capacitor introducirá corriente al regulador. Es por eso que, al colocar el diodo, la corriente fluye por él y ya no se introduce al regulador. Finalmente, los valores de C_1 y C_2 , se obtienen de la figura 3 de la hoja de datos del regulador elegido (anexo 2). Por lo tanto; sus valores son:

$$C_1 = 100nF$$

$$C_2 = 22\mu F$$

Para verificar el nivel de batería, se utiliza un amplificador operacional (opamp) en configuración de comparador. El opamp seleccionado es el lm358n (anexo 4), básicamente por entregar un buen nivel de corriente a la salida. Este dispositivo tendrá un nivel de saturación positiva (V_{sat+}) de 5V y un nivel de saturación negativa (V_{sat-}) de 0V; de tal manera que cuando la señal de la entrada positiva o no inversora (V_+) sea mayor a la de la entrada negativa o inversora (V_-) se obtenga a la salida (V_o) un voltaje de 5V (V_{sat+}) y viceversa. Por este motivo, y dado que se quiere encender un led en el caso de que la señal de la batería sea menor a un nivel de referencia, esta última estará conectada a la entrada no inversora, mientras que la señal de la batería ingresará a la entrada inversora.

Para esto, como se mencionó anteriormente, se debe asegurar que el nivel de batería que ingrese al regulador sea mayor o igual a 5.5V. Sin embargo; solo se tiene una fuente de 5V, motivo por el cual se utilizarán dos

potenciómetros de precisión como divisores resistivos. Es decir; R1 y R5 serán potenciómetros de precisión cuyo valor es:

$$R_1 = R_5 = 10K\Omega$$

Para el caso de R5, uno de los conectores de los extremos estará conectado a la señal de la batería, mientras que el otro extremo estará conectado a tierra. El terminal central será conectado a la entrada inversora y el potenciómetro estará fijado en la mitad, de tal manera que al opamp ingrese siempre la mitad del voltaje de la batería. Es decir:

$$R_{5\text{ superior}} = R_{5\text{ inferior}} = 5K\Omega$$

Por otro lado, para el caso de R1, uno de los extremos estará conectado a 5V y el otro a tierra. El terminal central estará conectado a la entrada no inversora y debemos asegurar un nivel de referencia mínimo de 2.75V (la mitad de 5.5V). Sin embargo, por seguridad fijaremos el nivel de referencia a 2.8V. Con esta consideración, calculamos $R_{1\text{ superior}}$ y $R_{1\text{ inferior}}$:

$$V_{ref} = V_+ = 2.8V$$

$$V_{ref} = \frac{V_i \times R_{1\text{ inferior}}}{R_{1\text{ superior}} + R_{1\text{ inferior}}} = \frac{V_i \times R_{1\text{ inferior}}}{R_1}$$

$$2.8V = \frac{5V \times R_{1\text{ inferior}}}{10K\Omega} \Rightarrow R_{1\text{ inferior}} = 5.6K\Omega$$

$$R_1 = R_{1\text{ superior}} + R_{1\text{ inferior}}$$

$$10K\Omega = R_{1\text{ superior}} + 5.6K\Omega \Rightarrow R_{1\text{ superior}} = 4.4K\Omega$$

Finalmente, como se ha mencionado, se quiere encender un led cuando el nivel de la batería se menor al de referencia. En ese sentido, falta determina el valor para R3. Para ello, sabemos que el voltaje de salida del opamp será de 5V, la caída de voltaje típica en el led es de 1.2V y la corriente será de 20mA (mínima corriente de salida del opamp lm358n). Entonces:

$$R_3 = \frac{5V - 1.2V}{20mA} = 190\Omega \cong 220\Omega \text{ (valor comercial)}$$

Por último, para la etapa de la detección de vapor tenemos al sensor HIH-5031 (anexo 5), el cual está conectado a 5V y a tierra. La señal sensada ingresa a la entrada no inversora de un opamp (lm358n), el cual está en configuración de comparador. La señal de referencia estará conectada a la entrada inversora a través de un potenciómetro de precisión que actúa como divisor resistivo. Al igual que para el opamp de verificación de batería, este tendrá $V_{sat+} = 5V$ y $V_{sat-} = 0V$. Como se mencionó en los requerimientos para el circuito, se fijará el potenciómetro de tal manera que la señal de referencia equivalga al 95%HR. Para determinar este voltaje utilizamos la ecuación de la recta del comportamiento del sensor:

$$V_{out} = V_{supply} \times (0.00636 (\%HR) + 0.1515)$$

$$V_{out} = 5V \times (0.00636 (95) + 0.1515) = 3.78V \cong 3.8V$$

Teniendo este valor de referencia y asumiendo que R_2 es de $10K\Omega$, estimamos $R_{2\text{-superior}}$ y $R_{2\text{-inferior}}$, sabiendo que los extremos de R_2 están conectados a 5V y a tierra:

$$V_{ref} = V_+ = 3.8V$$

$$V_{ref} = \frac{V_i \times R_{2\text{-inferior}}}{R_{2\text{-superior}} + R_{2\text{-inferior}}} = \frac{V_i \times R_{2\text{-inferior}}}{R_2}$$

$$3.8V = \frac{5V \times R_{2\text{-inferior}}}{10K\Omega} \Rightarrow R_{2\text{-inferior}} = 7.6K\Omega$$

$$R_1 = R_{1\text{-superior}} + R_{1\text{-inferior}}$$

$$10K\Omega = R_{1\text{-superior}} + 7.6K\Omega \Rightarrow R_{1\text{-superior}} = 2.4K\Omega$$

Finalmente, determinamos R_4 de la misma manera como se calculó R_3 , pero considerando que la caída de voltaje en el led infrarrojo es de 1.45V típicamente.

$$R_4 = \frac{5V - 1.45V}{20mA} = 177.5\Omega \cong 180\Omega \text{ (valor comercial)}$$

Con este último valor determinado, ya hemos calculado todos los componentes. Sin embargo; debemos evaluar si el regulador requiere de

un disipador. Para ello, debemos calcular la potencia y corriente de cada uno de los componentes que alimenta. Esto se muestra en la tabla 3.4.1.4.2:

Tabla 3.4.1.4.2: Estimación de potencia y corriente de carga del regulador

Componente	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
LM358N	5	1.2	6
HIH-5031	5	0.5	2.5
Potenciómetros (x2)	5	0.5 (x2)	2.5 (x2)
Led y Led IR	5	20 (x2)	100
TOTAL:		42.7	113.5

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores calculados, debemos determinar la potencia total disipada por el regulador según la siguiente fórmula (donde I_L es la corriente de carga e I_G es la corriente de fuga):

$$P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I_L + (V_{in} \times I_g)$$

$$P_d = (9 - 5) \times 0.0427 + (9 \times 0.008) = 0.243W$$

En seguida, determinamos la temperatura máxima permitida en el componente. Esta se puede determinar en base a la temperatura máxima en la junta del empaque (T_j) y a la temperatura del ambiente (T_a). Si bien $T_{j\text{máx}} = 125^\circ\text{C}$, se tomará por medida de seguridad $T_j = 100^\circ\text{C}$:

$$T_{ja\text{ (máx)}} = T_{j\text{ (máx)}} - T_{a\text{ (máx)}} = 125^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 100^\circ\text{C}$$

Finalmente, en base a lo anterior se determina el máximo valor de resistencia térmica entre la junta del empaque y el medio ambiente:

$$\theta_{ja} = \frac{T_{ja\text{ (máx)}}}{P_d} = \frac{100^\circ\text{C}}{0.243W} = 308.64^\circ\text{C/W}$$

Como se aprecia, la resistencia térmica calculada es mucho mayor que la permitida por el regulador ($\theta_{ja} = 65^\circ\text{C/W}$), motivo por el cual no es necesario el uso de un disipador. Entonces, el circuito electrónico final se muestra en

la figura 3.4.1.4.4. Asimismo, en la figura 3.4.1.4.5 y en la figura 3.4.1.4.6 se muestran la cara de pistas y la cara de componentes de este circuito.

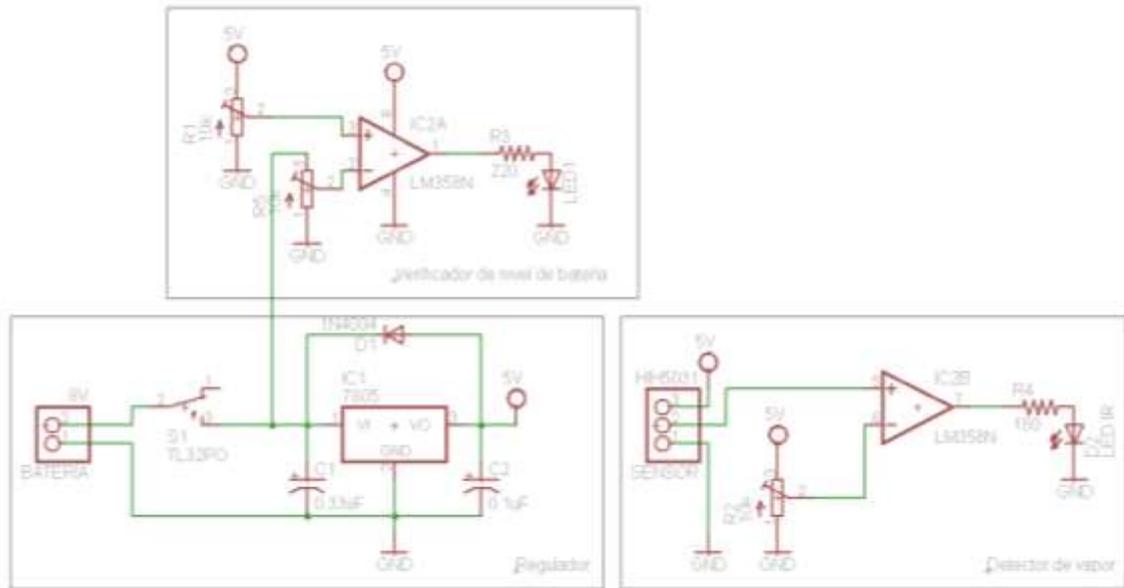


Figura 3.4.1.4.4: Esquemático completo (con valores) del detector de vapor.

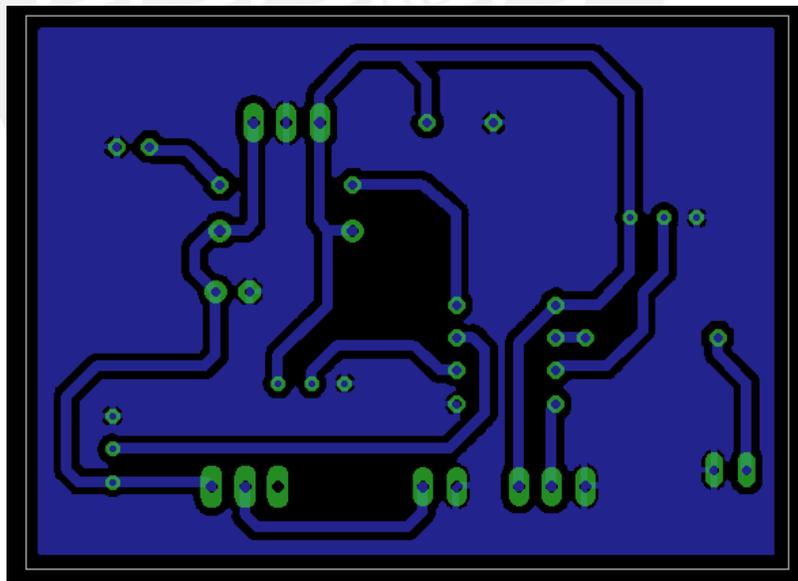


Figura 3.4.1.4.5: Cara de pistas del detector de vapor.

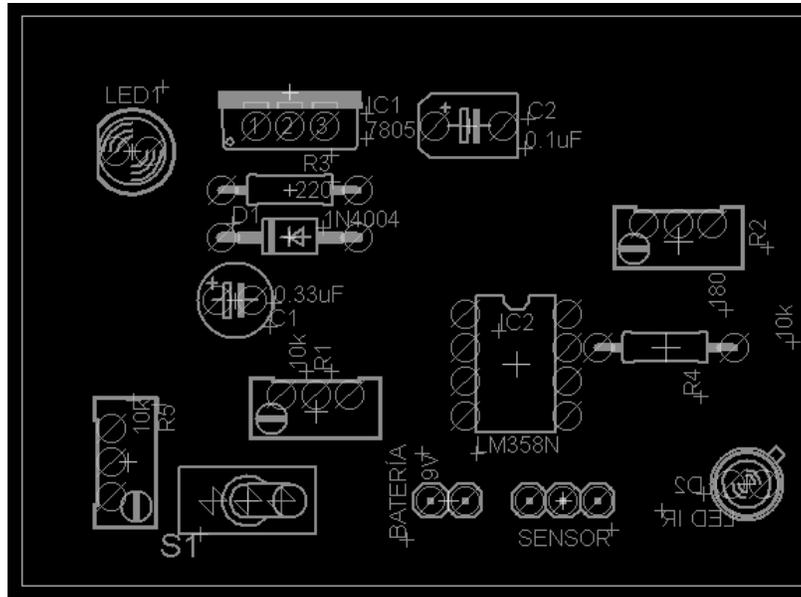


Figura 3.4.1.4.6: Cara de componentes del detector de vapor.

3.4.2 Potencia (Motores) y excitadores

3.4.2.1 Introducción

Para poder automatizar el proceso de manera adecuada, se requiere de varios motores que puedan ejecutar los diferentes procedimientos según lo requerido en cada etapa del proceso. En ese sentido, se requiere seleccionar cuatro motores:

- Un motor para rotación de la rueda del soporte principal: Esto nos va a permitir realizar la búsqueda de cada una de las diversas etapas; ya que los reactivos y el canalizador de vapores irán rotando junto con la rueda dentada.
- Un motor para el movimiento del mechero: Este motor se encargará de realizar el movimiento de vaivén del mechero para la etapa de calentamiento de la fucsina.
- Un motor para abrir y cerrar los dispensadores: Este motor movilizará el acople para abrir y cerrar las peras de decantación para dispensar los reactivos sobre la lámina portaobjetos.
- Un motor para girar el soporte de lámina portaobjetos: Esto nos servirá para verter los reactivos que están en la lámina portaobjetos

hacia la canaleta para desecho de reactivos. Asimismo, nos servirá para enjuagar la lámina.

A continuación, se eligen cada uno de estos motores y se muestran los circuitos esquemáticos necesarios para controlar los mismos según los requerimientos en cada caso.

3.4.2.2 Motor para rotación de la rueda dentada del soporte principal

Como se ha mencionado, este motor será el encargado de hacer rotar los reactivos que se encuentran en la rueda dentada. Para esto, debemos calcular el torque que movilizará el motor. En ese sentido, se considerará lo siguiente:

- Las cuatro peras de decantación están llenas en su totalidad (100ml) con los diversos reactivos. Además, éstas tienen un peso aproximado de 150g sin líquido.
- La fricción de la rueda dentada con el tubo central se va a desperdiciar; debido a que se cuenta con rodajes.
- La rueda dentada tiene un radio de 12cm y un espesor de 1cm. Asimismo, es hecha de plástico (polietileno) y tiene cinco orificios circulares, cuatro de ellos de 2.5cm y uno de 0.5 cm de radio.
- La corona circular inferior a la rueda dentada tiene un radio mayor de 12cm y un radio menor de 8cm. Asimismo, tiene un espesor de 0.5cm y cuenta con 5 orificios de 0.3 cm de radio cada uno.
- La rueda dentada y la corona circular están unidas por 5 tubos circulares de 0.5cm de radio y 8cm de alto.
- El canalizador de vapores está formado por una pirámide rectangular de 6cm de altura, de medidas de la base de igual valor que las medidas de la lámina portaobjetos (75mm x 25mm). Esta pirámide está unida a un tubo cuadrado de 9cm de altura y de longitud de lado que ingrese por el orificio de 0.3cm de radio de la corona circular; es decir, de longitud de lado de 0.42cm. Asimismo, todos los metales con los que se conforme el canalizador tendrán un espesor de 0.2cm.

Con todas estas consideraciones y conociendo las densidades de los diversos materiales y reactivos (Martín, 1999) (ver tabla 3.4.2.2.1) podemos estimar la carga máxima que movilizará este motor. A continuación, se muestra la tabla 3.4.2.2.1 y los cálculos realizados:

Tabla 3.4.2.2.1: Densidad de los materiales y reactivos

Material o Reactivo	Densidad
Agua	1000 Kg/m ³
Alcohol Ácido	866 Kg/m ³
Azul de Metileno	1230 Kg/m ³
Fucsina Básica Fenicada	990 Kg/m ³
Alcohol	789 Kg/m ³
Aluminio	2700 Kg/m ³
Acero Inoxidable	7850 Kg/m ³
Plástico (polietileno)	952 Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

En seguida; se procede con los cálculos:

- Peso de 4 peras de decantación sin líquido = $4 \times 150g = 600g = 0.6Kg$.
- Peso de Fucsina = $990 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{1 l}{1000 ml} \times 100ml = 0.099Kg$.
- Peso de Alcohol Ácido = $866 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{1 l}{1000 ml} \times 100ml = 0.087Kg$.
- Peso de Azul de Metileno = $1230 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{1 l}{1000 ml} \times 100ml = 0.123Kg$.
- Peso de Agua = $1000 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{1 l}{1000 ml} \times 100ml = 0.1Kg$.
- Peso de rueda dentada:
 - Volumen de la rueda sin orificios = $\pi r^2 h = \pi \times (12cm)^2 \times 1cm$
Volumen de la rueda sin orificios = $452.39cm^3$
 - Volumen de orificios = $4\pi r_1^2 h + 1\pi r_2^2 h$
Volumen de orificios = $4\pi \times (2.5cm)^2 \times 1cm + \pi \times (0.5cm)^2 \times 1cm$
Volumen de orificios = $79.33cm^3$
 - Volumen de rueda con orificios = $452.39cm^3 - 79.33cm^3$
Volumen de rueda con orificios = $373.06cm^3$

- Peso de rueda dentada = $373.06cm^3 \times \frac{952kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000000cm^3}$
 Peso de rueda dentada = 0.355Kg
- Peso de corona circular:
 - Volumen de corona sin orificios = $\pi h(R^2 - r^2)$
 Volumen de corona sin orificios = $\pi \times 0.5cm \times ((12cm)^2 - (8cm)^2)$
 Volumen de corona sin orificios = $125.66 cm^3$
 - Volumen de orificios = $5\pi r_1^2 h = 5\pi \times (0.3cm)^2 \times 0.5cm$
 Volumen de orificios = $0.71cm^3$
 - Volumen de corona con orificios = $125.66cm^3 - 0.71cm^3$
 Volumen de rueda con orificios = $124.95cm^3$
 - Peso de corona circular = $124.95cm^3 \times \frac{2700kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000000cm^3}$
 Peso de corona circular = 0.337Kg
- Peso de tubos:
 - Volumen de tubos = $5\pi r^2 h = 5\pi \times (0.5cm)^2 \times 8cm$
 Volumen de tubos = $31.42cm^3$
 - Peso de tubos = $31.42cm^3 \times \frac{2700kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000000cm^3}$
 Peso de tubos = 0.085Kg
- Peso del canalizador de vapores:
 - Volumen del tubo cuadrado = $h(L^2 - l^2)$
 Volumen del tubo cuadrado = $9cm \times ((0.42cm)^2 - (0.38cm)^2)$
 Volumen del tubo cuadrado = $0.288cm^3$
 - Volumen de la pirámide = $\left(2x \frac{(B_1+b)h}{2} + 2x \frac{(B_2+b)h}{2}\right) \times espesor$
 Volumen de la pirámide = $(B_1 + 2b + B_2) \times h \times espesor$
 Volumen de la pirámide = $(7.5 + 2(0.42) + 2.5)cm \times 6cm \times 0.2cm$
 Volumen de la pirámide = $13.008cm^3$
 - Peso del canalizador = $13.296cm^3 \times \frac{7850kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000000cm^3}$
 Peso del canalizador = 0.104Kg

Con estos pesos independientes y asumiendo que están distribuidos de manera homogénea, se puede aproximar los mismos a un solo peso aplicado al centro de la rueda dentada. Con esta consideración, podemos

calcular el torque necesario para mover la rueda dentada, tomando la distancia como el radio de la rueda. En ese sentido:

$$\text{Peso total} = 1.89\text{Kg}$$

$$\text{Fuerza (peso)} = 1.89\text{Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18.54\text{N}$$

$$\text{Torque}_{\text{rueda dentada}} = 18.54\text{N} \times 0.12\text{m} = 2.225\text{Nm}$$

Sin embargo; para calcular el torque del motor, debemos considerar el engranaje que irá unido al eje del motor y la relación de dientes entre este engranaje y la rueda dentada. Para calcular esta relación de dientes, y con esto poder calcular el torque del motor, asumimos lo siguiente:

- La rueda dentada tiene un radio de 12cm.
- El engranaje tiene un radio de 2 cm.
- La medida de cada diente y cada espacio entre ellos es la misma.
- La medida de los dientes de la rueda dentada y del engranaje es la misma.

Con estas consideraciones se calcula la relación de dientes en base a los radios:

$$\text{Relación de dientes} = \frac{12}{2} = 6$$

Entonces, con esta relación, podemos obtener el torque del motor de la siguiente manera:

$$\text{Torque}_{\text{motor}} = \frac{\text{Torque}_{\text{rueda dentada}}}{\text{Relación de dientes}} = \frac{2.225\text{Nm}}{6} = 0.371\text{ Nm}$$

Además del torque calculado, debemos elegir la velocidad a la cual girará el motor. Para esto, se debe establecer un rango de velocidades, mínima y máxima, y en base a ellos optar por una velocidad adecuada. En ese sentido, para determinar la velocidad máxima se debe considerar:

- El tiempo de respuesta del sensor MOC70T3 es de 80us.
- La barra que interrumpirá la señal del sensor tiene un ancho de 1cm.

Con estas consideraciones, calculamos la velocidad máxima de la rueda dentada:

$$\text{Longitud de arco}_{\text{Rueda dentada}} = 2\pi \times 12\text{cm} = 75.40\text{cm}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{max.rueda dentada}} = \frac{1\text{cm}}{80\text{us}} \times \frac{1000000\text{us}}{1\text{s}} \times \frac{60\text{s}}{1\text{m}} \times \frac{1\text{rev}}{75.40\text{cm}} = 9946.95\text{rpm}$$

Como se puede notar, esta velocidad es muy alta, por lo tanto el sensor no tendrá problemas con la detección de la barra. Por otro lado; para la velocidad mínima se debe considerar el tiempo (aproximado) que el operario demora al hacer el proceso. En ese sentido consideramos lo siguiente:

Tiempos fijos del proceso = 8min

Tiempos variables del proceso = 2 min (aprox)

Tiempos total del proceso = 10 min (aprox)

Tomando en cuenta solo los tiempos variables del proceso, se puede deducir que se tienen 2min para realizar las búsquedas de los reactivos y para el dispensado de los mismos. Sin embargo; para determinar la velocidad mínima de la rueda dentada solo nos interesa el tiempo que se tiene para realizar las búsquedas. Es por eso que, considerando que el realizar las búsquedas demora más tiempo que el dispensado de los reactivos, estimamos un tiempo de 1.5min para este fin. Asimismo, tomando en cuenta el peor de los casos, la rueda dentada debe girar aproximadamente 7 vueltas completas para realizar las búsquedas durante todo el proceso (ver figura 3.4.2.2.1). Con esto determinamos la velocidad mínima del disco.

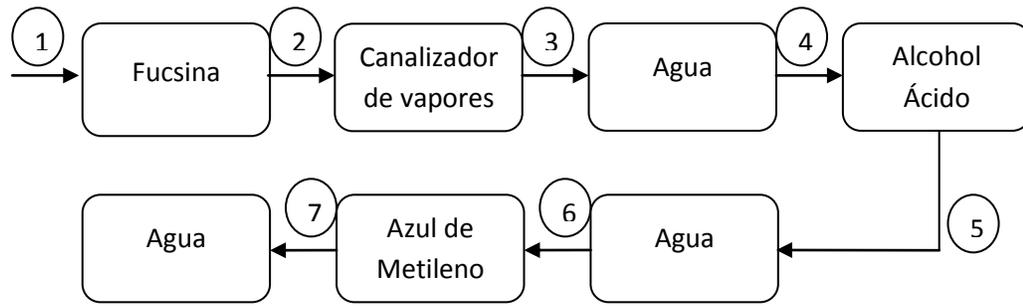


Figura 3.4.2.2.1: Número de cambios en el proceso.

$$\text{Velocidad}_{\text{min.rueda dentada}} = \frac{7\text{rev}}{1.5\text{min}} = 4.67\text{rpm}$$

Considerando las velocidades máximas y mínimas, así como también los 30s asumidos para el dispensado, tenemos 8.5min fijos para el proceso. Asimismo, como se ha calculado anteriormente, un operario demora aproximadamente 10min para realizar la tinción de una muestra⁴. Buscando disminuir ese tiempo, asumimos que el tiempo para realizar la búsqueda de cada reactivo y/o etapa es de 30s, con lo cual tendríamos un tiempo total de 9min para realizar la tinción. Con estas consideraciones, calculamos la velocidad del motor, sabiendo que la relación de dientes entre la rueda dentada y el engranaje del motor es de 6:

$$\text{Velocidad}_{\text{rueda dentada}} = \frac{7\text{rev}}{0.5\text{min}} = 14\text{rpm}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{motor}} = 14\text{rpm} \times 6 = 84\text{rpm}$$

Finalmente, con la velocidad y el torque del motor, calculamos la potencia mecánica útil (Chapman, 2000):

$$\text{Potencia}_{\text{mecánica útil}} = \text{Torque} \times \text{velocidad} \times \frac{\pi}{30}$$

$$\text{Potencia}_{\text{mecánica útil}} = 0.371\text{Nm} \times 84\text{rpm} \times \frac{\pi}{30} = 3.26\text{W}$$

⁴ Normalmente los laboratoristas realizan la tinción de varias muestras a la vez. Se ha aproximado el tiempo que les tomaría la tinción de una sola muestra.

Como se puede notar, los requerimientos para este motor no son muy exigentes. En base a ello, se presentan las siguientes opciones y se evalúa si cumplen con los requerimientos (ver tabla 3.4.2.2.2):

Tabla 3.4.2.2.2: Comparación entre motores DC

Requerimientos	Opciones de motor DC			
	Crouzet 82869011		Crouzet 82861018	
	Característica	¿Ventaja?	Característica	¿Ventaja?
Torque (0.371Nm)	Máximo: 2Nm	✓	Máximo: 0.5Nm	✓
Velocidad (84rpm)	108 rpm	✓	108 rpm	✓
Potencia mecánica (3.26W)	22.6W	✓	5.7W	✓
Voltaje nominal	24V	✓	24V	✓
Consumo de corriente	125mA	✓	125mA	✓

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, ambos motores cumplen con los requerimientos señalados. Sin embargo; el motor Crouzet 82869011 sobredimensiona el torque requerido, y es un motor de mayor tamaño y peso que el motor Crouzet 82861018. Por ese motivo; y dado que este último también cumple con todos los requerimientos, optamos por el Crouzet 82861018 (anexo 6).

El circuito excitador y de control para este motor tiene los siguientes requerimientos:

- Tener la posibilidad de cambiar de giro.
- Contar con un habilitador para encendido y apagado por el controlador.
- Tener un aislamiento eléctrico entre la etapa de control y la etapa de potencia.

Con estos requerimientos, se plantea utilizar el circuito integrado L298 (anexo 7), el cual cuenta con dos puentes h para controlar el sentido de giro del motor (de los cuales se usará uno para este motor), así como también con un pin habilitador del puente h, y por consecuencia, del motor.

Cabe mencionar que el L298 tiene por puente h un habilitador y dos entradas y su funcionamiento es como se muestra en la tabla 3.4.2.2.3.

Tabla 3.4.2.2.3: Lógica del L298

Habilitador	Entrada 1	Entrada 2	Motor
0	0	0	Detenido
0	0	1	Detenido
0	1	0	Detenido
0	1	1	Detenido
1	0	0	Detenido
1	0	1	Derecha
1	1	0	Izquierda
1	1	1	Detenido

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de datos del L298.

Como se puede observar, para detener el motor basta con mandar un '0' lógico al habilitador. Asimismo, para el cambio de giro, si bien se requieren 2 bits, uno es el negado del otro, por lo cual, para consumir menos pines del controlador se puede tener un solo pin del mismo, el cual se conectaría directamente a una entrada del L298, así como también a un inversor. La salida del inversor se conectará a la otra entrada.

Por otro lado, para el aislamiento eléctrico entre la etapa de control y de potencia, se usará el optoacoplador 4N35 (anexo 8) por tener un buen porcentaje de CTR (current transfer ratio). El circuito esquemático que se plantea se muestra en la figura 3.4.2.2.2:

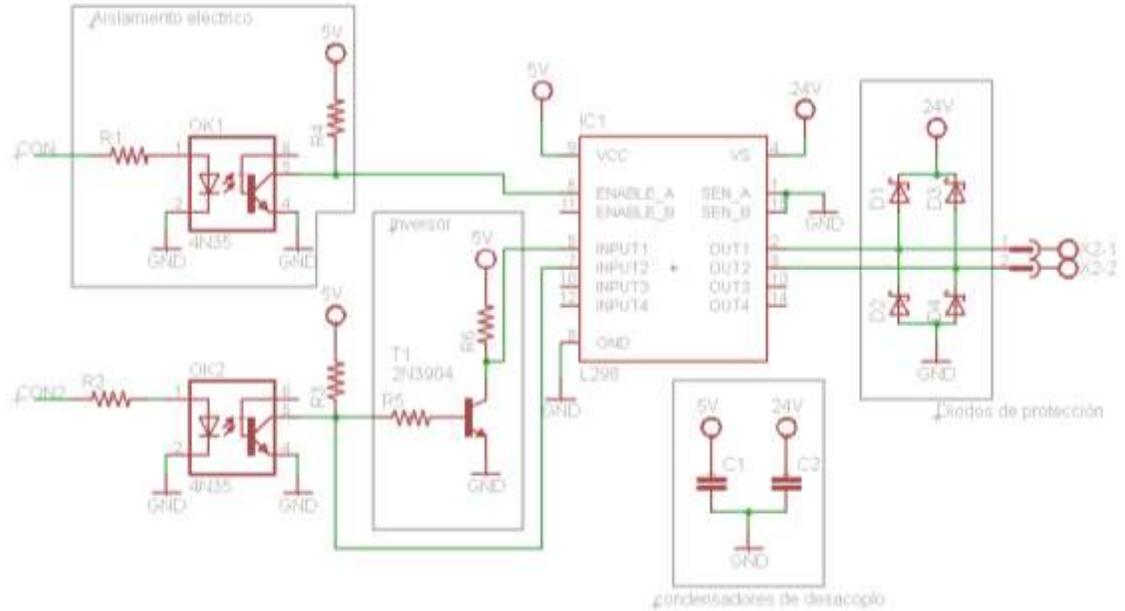


Figura 3.4.2.2.2: Esquemático de excitación y control para el motor.

Para los condensadores de desacoplo, los cuales son cerámicos, el fabricante recomienda en la hoja de datos del componente, que estos sean de 100nF. Es decir:

$$C_1 = C_2 = 100\text{nF}$$

Para los diodos de protección, el fabricante recomienda, en la figura 6 de su hoja de datos del driver (anexo 7), que estos sean de recuperación rápida. Los diodos Schottky cumplen con este requisito (Walters y Werner, 1997). Asimismo, estos diodos deben poder soportar los 3A de corriente máxima que podría circular por la salida. Es por estas condiciones que se elige el diodo 1N5821 (anexo 9).

Para calcular el valor de R1 y R2, asumimos que el voltaje de salida en alta (V_{OH}) del controlador es de 4.2V y la corriente I_F es de 1 mA. Con estas condiciones, se ve en la figura 5 de la hoja de datos del 4n35 (anexo 8) que la caída de voltaje en el diodo es de 1.1V aproximadamente. Conociendo la caída de voltaje en el diodo, determinamos los valores de R1 y R2.

$$R_1 = R_2 = \frac{4.2\text{V} - 1.1\text{V}}{1\text{mA}} = 3.1\text{K}\Omega \cong 2.7\text{K}\Omega \text{ (valor comercial)}$$

Con este valor comercial, recalculamos la corriente:

$$I_F = \frac{4.2V - 1.1V}{2.7K\Omega} = 1.15mA$$

Por otro lado, en la hoja de datos del 4n35, se estima que para la corriente I_F determinada el CTR es de 100%. Asimismo, el voltaje colector-emisor en saturación ($V_{ce(sat)}$) es de 0.3V. Considerando estos detalles, podemos determinar los valores de R3 y R4:

$$I_C = 1.15mA \times 100\% = 1.15mA$$

$$R_3 = R_4 = \frac{5V - 0.3V}{1.15mA} = 4.08K\Omega \cong 3.9K\Omega \text{ (valor comercial)}$$

Con los valores de R3 y R4 recalculamos la corriente colector:

$$I_C = \frac{5V - 0.3V}{3.9K\Omega} = 1.2mA$$

Con esto, ya se tiene diseñada la parte del aislamiento eléctrico. Por lo tanto sólo falta diseñar la parte del inversor. Para realizar el inversor se ha optado por el transistor BJT de tipo NPN 2n3904 (anexo 10). Para calcular las resistencias R5 y R6, asumimos una corriente colector (I_C) de 1mA. Con ello, observamos que:

- La ganancia de corriente, h_{fe} , en saturación es de 10.
- El voltaje colector-emisor en saturación ($V_{CE(SAT)}$) es de 0.2V.
- El voltaje base-emisor en saturación ($V_{BE(SAT)}$) está entre 0.65V y 0.85V.

Con ello calculamos los valores de R5 y R6. Primero obtenemos el valor de R6:

$$R_6 = \frac{5V - 0.2V}{1mA} = 4.8K\Omega \cong 4.7K\Omega \text{ (valor comercial)}$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{5V - 0.2V}{4.7K\Omega} = 1.02mA$$

En seguida, determinamos el valor de la corriente de base (I_B):

$$I_B = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{1.02mA}{10} = 0.102mA$$

Con la corriente I_B , determinamos la caída de voltaje en R_3 y el rango de valores para R_5 :

$$V_{R3} = 3.9K\Omega \times 0.102mA = 0.4V$$

$$R_{5 \min} = \frac{(V_{CC} - V_{R3}) - V_{BE(SAT)max}}{I_B} = \frac{(5V - 0.4V) - 0.85V}{0.102mA} = 45.09K\Omega$$

$$R_{5 \min} = \frac{(V_{CC} - V_{R3}) - V_{BE(SAT)min}}{I_B} = \frac{(5V - 0.4V) - 0.65V}{0.102mA} = 38.73K\Omega$$

Finalmente, optamos por un valor dentro del rango:

$$R_5 = 39K\Omega$$

Con todos los valores calculados, el circuito quedaría como se muestra en la figura 3.4.2.2.3. Asimismo, en la tabla 3.4.2.2.4 se detallan los estados en varios puntos de la etapa de aislamiento e inversor.

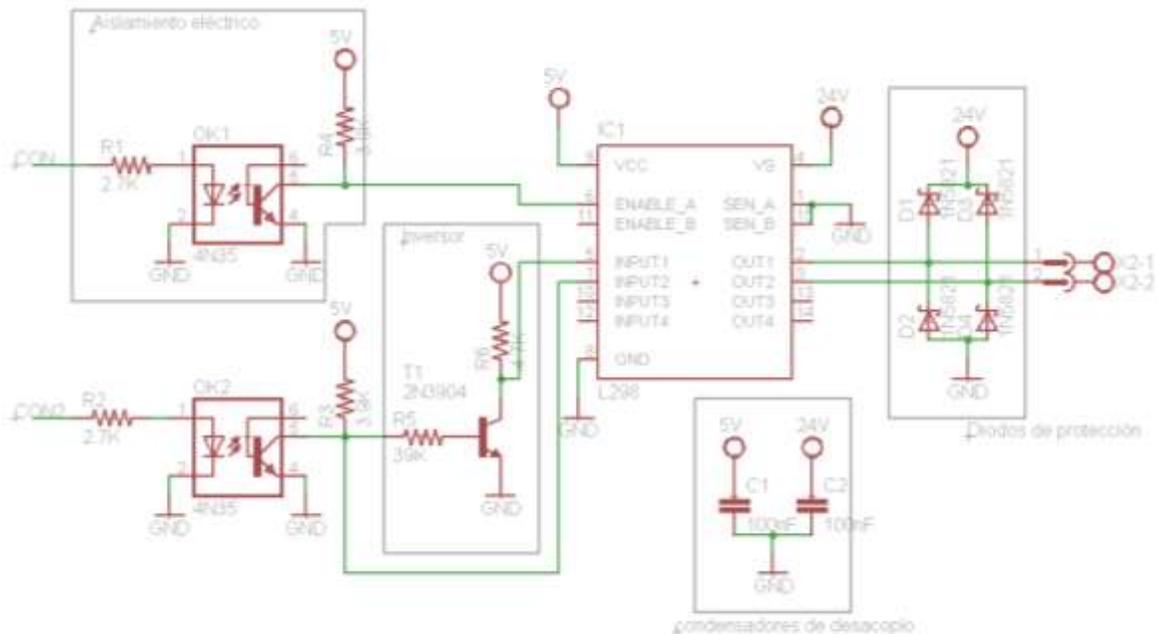


Figura 3.4.2.2.3: Esquemático con valores para excitación y control de motores.

Tabla 3.4.2.2.4: Estados en etapas de aislamiento e inversor.

Controlador	Optotransistor (4n35)	Input 2	BJT	Input 1
'0'	corce	$\approx 5V$	Saturación	$\approx 0V$
'1'	saturación	$\approx 0V$	corce	$\approx 5V$

Fuente: Elaboración propia.

La cara de pistas y la cara de componentes de este circuito se muestran posteriormente junto con la etapa del controlador y de las fuentes de alimentación.

3.4.2.3 Motor para movimiento del mechero

El motor para movilizar el mechero será el encargado de realizar el movimiento de vaivén de esta estructura para realizar el calentamiento de la muestra. Al igual que para el motor de la rueda dentada, debemos calcular el torque, la velocidad y la potencia del motor.

Para calcular el torque de este motor debemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El peso aproximado del mechero es de 30g y tiene capacidad para 20ml.
- El peso del soporte del mechero, el cual es una estructura rectangular de 8cmx4cmx4cm con dos orificios circulares de 0.75cm de radio para el paso de los rieles. Asimismo, tiene un orificio más en la parte superior de una profundidad de 2 cm y un radio de 0.9cm para el mechero.
- La fricción existente entre el rodaje (de acero) del soporte de mechero y los rieles de aluminio.
- La longitud del brazo articulado es de 14.4cm.

Con estas consideraciones, procedemos a realizar los cálculos necesarios para poder obtener el torque del motor. En ese sentido, se debe aclarar que la fricción a calcular es la fricción estática; ya que esta es mayor a la fricción dinámica. Para esto en primer lugar debemos calcular el peso del soporte de mechero:

- Peso de mechero sin alcohol = $30g = 0.03Kg$.
- Peso de Alcohol = $789 \frac{Kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000 l} \times \frac{1 l}{1000 ml} \times 20ml = 0.016Kg$.
- Peso de soporte de mechero:
 - Volumen del soporte sin orificios = $8cm \times 4cm \times 4cm = 128 cm^3$
 - Volumen de orificios de rieles = $2\pi r^2 h = 2\pi \times (0.75cm)^2 \times 4cm$
Volumen de orificios de rieles = $14.13cm^3$
 - Volumen de orificio de mechero = $\pi r^2 h = \pi \times (0.9cm)^2 \times 2cm$
Volumen de orificio de mechero = $5.09cm^3$
 - Volumen del soporte con orificios = $128 - 14.13 - 5.09$
Volumen del soporte con orificios = $108.78cm^3$
 - Peso del soporte = $108.78cm^3 \times \frac{2700kg}{m^3} \times \frac{1 m^3}{1000000cm^3}$
Peso del soporte = $0.294Kg$

Con estos pesos, podemos calcular la fricción estática máxima, es decir la fricción que el motor deberá romper para poder movilizar el soporte del mechero. Para ello, debemos saber que en este caso la fuerza de la normal es equivalente al peso total y que el factor de fricción estática entre el tubo de aluminio y el rodamiento de acero es de $\mu_s=0.61$ (Serway, 2008):

$$\text{Peso total} = 0.34Kg$$

$$\text{Fuerza (peso)} = 0.34Kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} = 3.54N$$

$$\text{Fricción}_{\text{estática máxima}} = \mu_s N = \mu_s \text{Peso}$$

$$\text{Fricción}_{\text{estática máxima}} = 0.61 \times 3.54N = 2.16N$$

Finalmente, se calcula el torque del motor considerando que son dos rieles y que el brazo articulado está totalmente estirado, el cual es el peor de los casos:

$$\text{Fricción}_{\text{estática máxima total}} = 2 \times 2.16N = 4.32N$$

$$\text{Torque}_{\text{motor (sin caja reductora)}} = 4.32N \times 0.144m = 0.622Nm$$

Por otro lado, para calcular la velocidad de este motor, el principal requerimiento es que al recibir la señal de sensor de vapor, el mechero se retire a la posición más lejana en un plazo máximo de 2s. Con esta condición podemos calcular la velocidad mínima del motor (sin caja reductora) considerando que el eje unido al brazo articulado es de 1cm de diámetro:

$$\text{Velocidad}_{\text{lineal mínima}} = \frac{140\text{cm}}{2\text{s}} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 0.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{angular mín. del motor (rpm)}} = \frac{0.7 \text{ m/s}}{0.01\text{m}} \times \frac{60}{\pi} = 1336.9 \cong 1337\text{rpm}$$

Asimismo, para la velocidad máxima del motor se toman en cuenta las mismas condiciones que para el motor de rotación de rueda dentada; es decir, el tiempo de respuesta del sensor MOC70t3 (80us) y el marcador de 1cm. Con esto se obtiene:

$$\text{Velocidad}_{\text{max.mechero}} = \frac{1\text{cm}}{80\text{us}} \times \frac{1000000\text{us}}{1\text{s}} \times \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 125 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{angular máxima del motor (rpm)}} = \frac{125 \text{ m/s}}{0.01\text{m}} \times \frac{60}{\pi} = 238732\text{rpm}$$

Como se observa, esta velocidad es muy alta por lo cual no habrá problema con la detección del sensor MOC70t3. Finalmente, con el torque y la velocidad mínima (velocidad elegida) obtenemos la potencia del motor (Chapman, 2000):

$$\text{Potencia}_{\text{mecánica útil}} = 0.622\text{Nm} \times 1337 \text{ rpm} \times \frac{\pi}{30} = 87.09 \text{ W}$$

Asimismo, considerando una caja reductora con relación de transformación de 4; podemos recalculer el torque y la velocidad del motor.

$$\text{Torque}_{\text{motor (con caja reductora)}} = \frac{0.622\text{Nm}}{4} = 0.156\text{Nm}$$

$$\text{Velocidad}_{\text{ang. mín. del motor (con caja reductora)(rpm)}} = 1337 \text{ rpm} \times 4 = 5348 \text{ rpm}$$

En base a estos requerimientos, en la tabla 3.4.2.3.1 se presentan dos motores DC:

Tabla 3.4.2.3.1: Comparación entre motores DC

Requerimientos	Opciones de motor DC			
	Portescap 25GT2R82 – 219P - 2		Portescap 25GST2R82 – 216P - 2	
	Característica	¿Ventaja?	Característica	¿Ventaja?
Torque (arranque: 0.156Nm)	Arranque: 0.258Nm	✓	Arranque: 0.160Nm	✓
Velocidad (5348rpm)	10300rpm	✓	10300rpm	✓
Potencia mecánica (87.09W)	278.28W	✓	172.58W	✓
Voltaje Nominal	24V	✓	24V	✓
Consumo de corriente	Arranque: 2 A Vacío: 120mA	x	Arranque: 1.45 A Vacío: 70mA	✓

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, ambos motores cumplen con los requerimientos de torque y velocidad, y ambos sobrepasan ampliamente la potencia requerida. Sin embargo; básicamente por tener un menor consumo de corriente se opta por el motor Portescap 25GST2R82 – 216P – 2 (anexo 11).

Por otro lado, debemos demostrar que a la velocidad máxima del motor elegido, se cumple con el objetivo de que la detención del motor sea en la posición exacta con un error máximo de $\pm 5\%$. En ese sentido, considerando esta velocidad y el tiempo de respuesta del sensor demostramos cuanto se moviliza la estructura:

$$\text{Velocidad lineal} = 10300 \times 0.01 \times \frac{\pi}{60} = 5.39 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Distancia recorrida}_{\text{en } 80\mu\text{s}} = \frac{80\mu\text{s} \times 5.39\text{m}}{1000000\mu\text{s}} = 0.4312\text{mm}$$

Con ello, se demuestra que se cumple ampliamente con ese objetivo. Entonces, dado que los requerimientos para el circuito electrónico de

momento los motores funcionarán al mismo tiempo, se toma la corriente de salida del motor del mayor corriente. En ese sentido, el motor de mayor corriente consume en el arranque 1.45A. Sabiendo que la corriente en el arranque es instantánea y normalmente es entre 5 y 7 veces más la de consumo consideramos:

$$I_{consumo} = \frac{1.45A}{5} = 290mA$$

Por otro lado, la caída total de voltaje colector emisor en saturación ($V_{CE(SAT)}$) es de 3.2V. Con ello, la potencia disipada en la salida sería:

$$P_{D out} = 3.2V \times 290mA = 928mW.$$

Asimismo, debemos calcular la potencia disipada en la alimentación lógica, alimentación de potencia y entrada y habilitador.

$$P_{D VSS} = 5V \times 36mA = 180mW.$$

$$P_{D VS} = 12V \times 70mA = 840mW.$$

$$P_{D in, hab} = 5V \times 0.1mA \times 3 = 1.5mW.$$

Entonces, la potencia total disipada por el L298, sería:

$$P_{D total} = 928mW + 180mW + 840mW + 1.5mW = 1949.5mW = 1.95W.$$

En seguida, determinamos la temperatura máxima permitida en el componente. Para ello, sabemos que la temperatura máxima en la junta del empaque (T_j) es de 150°C; sin embargo, se considerará por seguridad $T_j = 125^\circ C$. Entonces:

$$T_{ja (máx)} = T_j (máx) - T_a (máx) = 125^\circ C - 25^\circ C = 100^\circ C$$

Finalmente, en base a lo anterior se determina el máximo valor de resistencia térmica entre la junta del empaque y el medio ambiente:

$$\theta_{ja} = \frac{T_{ja (máx)}}{P_d} = \frac{100^\circ C}{1.95W} = 51.3^\circ C/W$$

Como se aprecia, la resistencia térmica calculada es mayor que la permitida por el regulador ($\theta_{ja} = 35^\circ C/W$), motivo por el cual no es necesario el uso de un disipador.

3.4.2.4 Motor para abrir y cerrar dispensadores

Para abrir y cerrar los dispensadores se requiere de un motor que pueda girar la manija de las peras de decantación, de tal manera que el reactivo pueda ser vertido sobre la muestra. Para esto, al igual que para los motores anteriores, se tiene que calcular el torque necesario. Para ello tomamos en cuenta las siguientes consideraciones:

- El eje del motor sujetará el acople para abrir y cerrar los dispensadores. Este está conformado por tres segmentos rectangulares de 4cmx2cm. Asimismo, tiene un espesor de 0.2cm y está hecho de aluminio.
- La fricción estática entre la manija (vidrio) y la pera de decantación en sí misma (vidrio) es de $\mu_s=0.94$ (Serway, 2008)
- La distancia del eje del motor a la manija de las peras de decantación es de 4cm.

Con estos datos procedemos a calcular el torque del motor:

- Peso del acople:
 - Volumen del acople = $3 \times 4\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.2\text{cm} = 4.8 \text{ cm}^3$
 - Peso del acople = $4.8\text{cm}^3 \times \frac{2700\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000000\text{cm}^3} = 0.013 \text{ Kg}$
 - Fuerza (peso) = $0.013\text{Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.13\text{N}$
- Fricción estática entre manija y peras de decantación:
 - Peso de pera de decantación = 0.15Kg
 - Fuerza (peso) = $0.15\text{Kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.47\text{N}$
 - Fricción_{estática máxima} = $\mu_s N = \mu_s \text{Peso}$
 Fricción_{estática máxima} = $0.94 \times 1.47\text{N} = 1.38\text{N}$
- Torque_{motor} = $1.51\text{N} \times 0.04\text{m} = 0.06\text{Nm}$

Por otro lado, para este motor no hay ningún requerimiento en cuestión de velocidad; debido a que este motor no girará una vuelta completa. Sin embargo; lo que si es necesario es que tenga un control preciso en el movimiento de ángulos determinados. En ese sentido, surge la opción de utilizar un servomotor. Es por eso que en la tabla 3.4.2.4.1 se comparan un

motor DC con un servomotor, con el fin de determinar cuál sería conveniente utilizar en este caso:

Tabla 3.4.2.4.1: Comparación entre motor DC y servomotor

Requerimientos	Opciones de motor			
	Servomotor		Motor DC	
	Característica	¿Ventaja?	Característica	¿Ventaja?
Movimiento a posiciones precisas	Muy preciso.	✓	No tan preciso. Requiere de sensores.	x
Circuito de excitación	No requiere. Control por software.	✓	Si requiere.	x
Sensores de apoyo	No requiere.	✓	Si requiere.	x
Torque necesario	Cumple con el torque calculado.	✓	Cumple con el torque calculado.	✓

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la tabla, para este caso y básicamente por necesitar de movimientos precisos y a posiciones exactas, se optará por un servomotor. Para ello, para elegir el servomotor adecuado es necesario convertir torque calculado a unidades de Kg-cm.

$$\text{Torque}_{\text{motor}} = 0.06\text{Nm} \times \frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \times \frac{1}{9.81 \text{ m/s}^2} = 0.612\text{Kg} - \text{cm}$$

Como se puede apreciar, el torque para el servomotor es mínimo. En ese sentido, se tienen diversas alternativas. Entre ellas, se muestran en la tabla 3.4.2.4.2 dos servomotores, uno de la marca Hitec y otro de Airtronics, y se comparan sus características:

Tabla 3.4.2.4.2: Comparación entre servomotores

Requerimientos	Opciones de servomotor			
	Hitec HS322 - HD		Airtronics 94102Z	
	Característica	¿Ventaja?	Característica	¿Ventaja?
Torque (0.612 Kg - cm)	3 – 3.7 Kg - cm	✓	3.02 – 3.82 Kg - cm	✓
Velocidad	0.19 – 0.15 s/60°	✓	0.20 – 0.16 s/60°	✓
Voltaje de alimentación	4.8 – 6V	✓	4.8 – 6V	✓
Precio	US\$ 9.95	✓	US\$ 11.99	x

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, ambos servomotores son aptos para ser usados. Básicamente por un tema de precio se elige el Hitec HS322 – HD (anexo 12) (figura 3.4.2.4.1).



Figura 3.4.2.4.1: Servomotor Hitec HS322 – HD.

En general, todos los servomotores tienen 3 pines de conexión: Vcc, GND y control. Para este caso, el servomotor estará conectado a una fuente de 5V (Vcc=5V) y la señal de control es una modulación PWM que se obtendrá del controlador. Por este motivo, lo único que se requiere es tener un aislamiento eléctrico, el cual es el mismo al realizado para los motores anteriores. El esquemático se muestra en la figura 3.4.2.4.2:

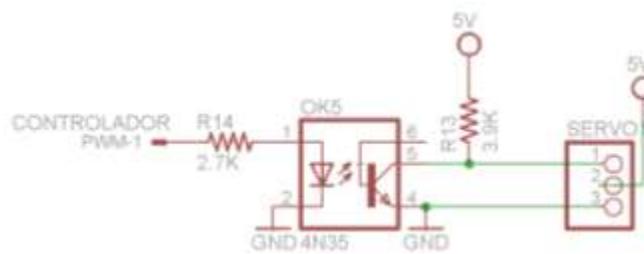


Figura 3.4.2.4.2: Diagrama esquemático para servomotor.

Al igual que para los motores anteriores, la cara de pistas y la cara de componentes se realizará junto con la del controlador y la de las fuentes.

3.4.2.5 Motor para girar el soporte de lámina portaobjetos

Para poder enjuagar la muestra, se requiere, fundamentalmente, de un motor que gire el soporte de la lámina portaobjetos un ángulo de 45° cada vez que se dispense el agua. Es por este requerimiento que, al igual que en el caso del motor para abrir y cerrar los dispensadores y por lo mostrado en la tabla 3.4.2.4.1, se considera más adecuado optar por un servomotor que por un motor DC. En ese sentido, para poder seleccionar el servomotor adecuado debemos calcular el torque considerando lo siguiente:

- No se tomará en cuenta el peso de la lámina portaobjetos.
- El soporte de la lámina portaobjetos está hecho de acero inoxidable y tiene las siguientes características: El marco exterior tiene las dimensiones de 7.0cm x 3.5cm x 1cm y el marco interior es de 6.3cm x 2.5cm x 1cm.
- La distancia del eje de motor al punto de unión con el soporte de lámina portaobjetos es de 3.5cm.

Con estas consideraciones, procedemos a calcular el torque del servomotor:

- Peso del soporte de lámina portaobjetos:
 - Volumen del marco exterior = $7 \times 3.5 \times 1 = 24.5 \text{ cm}^3$
 - Volumen del marco interior = $6.3 \times 2.5 \times 1 = 15.75 \text{ cm}^3$
 - Volumen del soporte de lámina = $24.5 - 15.75 = 8.75 \text{ cm}^3$
 - Peso del soporte = $8.75 \text{ cm}^3 \times \frac{7850 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000000 \text{ cm}^3} = 0.069 \text{ Kg}$
- $\text{Torque}_{\text{motor}} = 0.069 \text{ Kg} \times 3.5 \text{ cm} = 0.24 \text{ Kg} - \text{cm}$

Como se puede observar, el torque calculado para este motor es menor al torque calculado para el servomotor de abrir y cerrar dispensadores. Por este motivo y por lo mostrado en la tabla 3.4.2.4.2, se puede elegir el mismo servomotor, es decir, el Hitec HS322-HD. Asimismo, este servomotor también estará conectado a una fuente de 5V y la señal de

control PWM la obtendrá del controlador. De igual manera, solo se requiere aislar la etapa de control de la de potencia como se puede observa en la figura 3.4.2.4.2.

3.4.3 Pulsadores, Indicadores y Control

3.4.3.1 Introducción

Para poder obtener un sistema automático, es necesario de un dispositivo de control que reciba las diferentes señales de los sensores, las procese y genere las señales adecuadas para los actuadores, en este caso, los motores. Asimismo, este dispositivo será el encargado de temporizar las diversas etapas del proceso. Por todas estas razones, es necesario elegir un controlador adecuado.

En este caso se optará por un micro-controlador como dispositivo de control; ya que muchos de estos tienen las características necesarias para cumplir con los requerimientos. Cabe mencionar que es en este dispositivo en el que se grabará el programa o software.

Asimismo, el sistema debe contar también con algún tipo de interfaz que permita al usuario iniciar el método y conocer en qué etapa se encuentra en cada momento. Para ello, y dado que no se requiere de un gran interfaz que de mayor interacción con el usuario, se hará uso de pulsadores y leds indicadores. A continuación, se procede a elegir el micro-controlador y a diseñar el circuito electrónico del mismo, en el cual se incluyen los indicadores y pulsadores.

3.4.3.2 Elección del Micro-controlador y esquemático

Como se mencionó en la introducción, se debe elegir un micro-controlador adecuado según una serie de requerimientos determinados. En ese sentido, debemos fijar ciertos requerimientos:

- Contar con uno o más temporizadores (timers).
- Contar con por lo menos 2 PWM.
- Tener la posibilidad de interrupción externa.

Asimismo, otro requerimiento es la cantidad de pines de entrada y salida.

Para ello lo contabilizamos de la siguiente manera:

- 1 sensor de presencia de dispensadores.
- 3 sensores para posición del mechero.
- 3 sensores para identificación de reactivo.
- 1 receptor infrarrojo para sensor de humedad.
- 1 pulsador de inicio.
- 1 habilitador del motor de rotación de la rueda dentada.
- 1 pin de dirección para el motor de rotación de la rueda dentada.
- 1 habilitador para el motor del mechero.
- 1 pin de dirección para el motor del mechero.
- 1 pin de salida para el servomotor de apertura y cierre de dispensadores.
- 1 pin de salida para el servomotor de giro del soporte de lámina portaobjetos.
- 5 leds indicadores (1 por cada etapa: fucsina, canalizador de vapores, agua, alcohol ácido y azul de metileno).
- 1 led indicador de encendido.
- 1 led indicador de espera de presión del pulsador de inicio.

Sumando todo lo pines señalados anteriormente, se determina que son necesarios 22 pines de entrada y/o salida. Con este requerimiento y los mencionados previamente debemos elegir el micro-controlador; ya que para este caso no es necesario tener puertos de comunicación ni una alta velocidad de procesamiento.

Como se ha mencionado, los requerimientos mencionados pueden ser cumplidos por diversos micro-controladores. Sin embargo; para elegir uno podemos comparar dos marcas diferentes. Para ello tomamos como opción el ATmega88 de Atmel y el PIC 16f876a de Microchip. La comparación entre ellos se muestra en la tabla 3.4.3.2.1.

Tabla 3.4.3.2.1: Comparación de micro-controladores.

Requerimientos	Opciones de micro-controlador			
	ATmega 88 (Atmel)		PIC 16f876a (Microchip)	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Contar con 1 o más temporizadores (timers).	3 timers.	✓	3 timers	✓
Contar con por lo menos 2 PWM.	6 canales de PWM.	✓	2 canales de PWM.	✓
Interrupción externa.	Tiene interrupción externa.	✓	Tiene interrupción externa.	✓
Por lo menos 22 I/O pines.	23 I/O pines.	✓	22 I/O pines.	✓

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, ambos micro-controladores cumplen con los requerimientos mencionados. Es por ello que, si bien se pueden elegir ambos, optamos por el ATmega 88; dado que se tiene experiencia previa trabajando con micro-controladores de la familia Atmel.

Para poder diseñar el circuito del microcontrolador, primero debemos hacer la distribución de pines de entrada y salida. Para ello, debemos saber que el ATmega 88 (anexo 13) cuenta con tres puertos: B, C y D. Tanto el puerto B como el puerto D tienen 8 pines o bits, mientras que el puerto C tiene 7. La distribución de los requerimientos anteriormente mencionados en cada uno de estos pines se muestra en la tabla 3.4.3.2.2:

Tabla 3.4.3.2.2: Distribución de pines de entrada y salida.

Puerto B							
PB7	PB6	PB5	PB4	PB3	PB2	PB1	PB0
Led Fucsina	Led Canalizador	Led Agua	Led Alcohol Ácido	Led Azul de Metileno	PWM Bandeja	PWM apertura y cierre	Led Encendido
Puerto C							
	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1	PC0
		Led Espera	Pulsador Inicio	Hab. Mechero	Dir. Mechero	Hab. Rueda	Dir. Rueda
Puerto D							
PD7	PD6	PD5	PD4	PD3	PD2	PD1	PD0
Receptor IR	Presencia	Pos. Mechero	Pos. Mechero	Pos. Mechero	Id. reactivo	Id. reactivo	Id. reactivo

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, en el puerto B se han colocado los diversos leds indicadores de encendido y de cada una de las etapas. Asimismo, PB2 y PB1 se han fijado como las salidas de las señales PWM para los servomotores; dado que corresponden a los canales de PWM del timer 1. Por otro lado, el puerto C ha sido designado principalmente al control de los motores DC (habilitador y dirección de cada uno). De la misma manera, se ha colocado en este puerto al pulsador de inicio y al led indicador de espera de presión del pulsador de inicio. Por último, en el puerto D se han designado las entradas de los diversos sensores (presencia, posición del mechero e identificación de reactivos); así como también, la interrupción externa para el sensor de vapor proveniente de un receptor infrarrojo.

Con la distribución de los pines ya definida, podemos diseñar el circuito electrónico tomando como referencia el documento “Application note: Atmel AVR042: AVR Hardware design considerations”. Con estas consideraciones se plantea el siguiente circuito electrónico (ver figura 3.4.3.2.1):

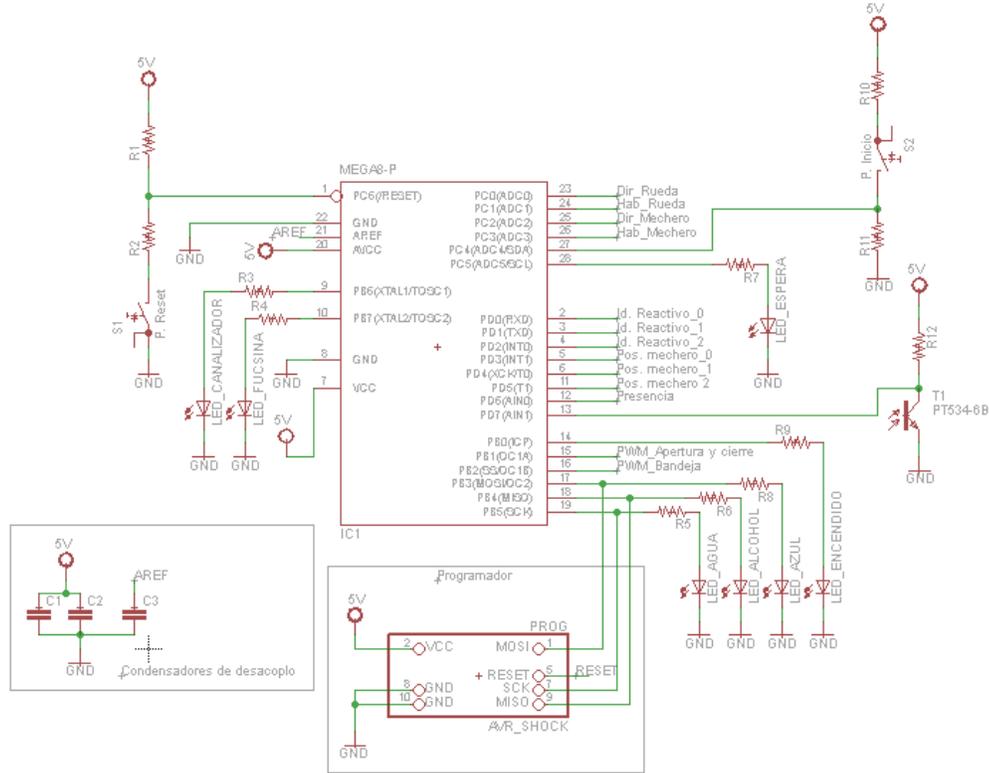


Figura 3.4.3.2.1: Esquemático del Controlador.

Por recomendación del fabricante en el documento mencionado anteriormente, los condensadores de desacoplo C4, C7 y C9 tienen un valor ya definido:

$$C_1 = C_2 = C_3 = 100nF$$

Asimismo, para el pulsador de Reset y para el pulsador de inicio, el fabricante recomienda valores adecuados para R1, R2 y R10, R11, respectivamente. En ese sentido:

$$R_1 = R_{10} = 10 K\Omega$$

$$R_2 = R_{11} = 330 \Omega$$

Por otro lado, los valores de las resistencias R3, R4, R5, R6, R7, R8 y R9 son iguales, dado que el esquemático y la función de todas ellas es la misma. Para determinar su valor, debemos saber que el microcontrolador tiene una salida de voltaje en nivel alto $V_{OH}=4.2V$. Así mismo, la caída de voltaje típica en los leds es de 1.2V. Por último, sabiendo que la corriente

máxima por pin de entrada y salida es de 40mA asumimos una corriente de salida de $I_{OH} = 10mA$. Con estas consideraciones, determinamos los valores de las resistencias:

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R_9 = \frac{4.2V - 1.2V}{10mA} = 300 \Omega \cong 330\Omega$$

Con el valor de las resistencias determinado, solo falta determinar el valor de R12. Para ello, debemos conocer algunos parámetros del fototransistor a utilizar. En este caso, se utiliza el PT534-6B (anexo 14), dado que puede ser aplicado con luz infrarrojo. Este fototransistor tiene un voltaje colector emisor de saturación ($V_{CE(SAT)}$) de 0.4V. Asimismo, tiene una corriente de colector (I_C) típica de 1.2mA. Con estos valores determinamos R12:

$$R_{12} = \frac{5V - 0.4V}{1.2mA} = 3.83 K\Omega \cong 3.9 K\Omega$$

Con esto el circuito quedaría como se muestra en la figura 3.4.3.2.2.

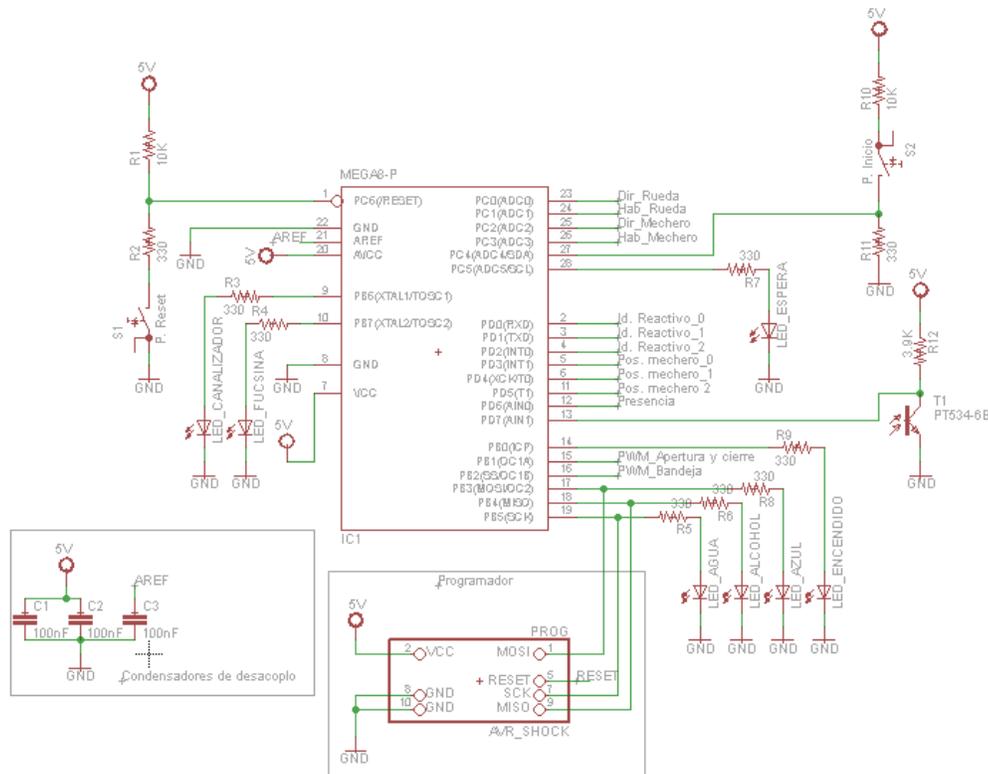


Figura 3.4.3.2.2: Esquemático del Controlador con valores de componentes.

La cara de pistas y la cara de componentes se mostrarán junto con la etapa de los motores y la etapa de las fuentes, dado que todo estará en una misma tarjeta electrónica para disminuir la cantidad de conexiones con cable.

3.4.4 Fuentes de alimentación

Para finalizar con la parte de Hardware, falta diseñar la fuente de alimentación con la cual se alimentará al sistema. Para este caso, se utilizará una fuente de alimentación lineal; dado que, al requerirse un equipo de precio cómodo y que pueda ser adquirido por todos los hospitales, una fuente conmutada significaría un mayor costo del equipo, lo cual no es beneficioso.

El primer paso para diseñar la fuente es obtener los valores de voltaje y corriente que esta debe proporcionar. Estos valores se muestran en la tabla 3.4.4.1.

Tabla 3.4.4.1: Requerimientos eléctricos por etapas.

Etapa: Sensores				
Cantidad	Sensor	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
7	MOC70t3 (led)	5	70	0.35
7	MOC70t3 (transistor)	5	0.7	0.0035
TOTAL			70.7	0.354
Etapa: Motores y excitadores				
Cantidad	Dispositivo	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
1	Motor DC (Rueda)	24	125	3
1	Motor DC (Mechero)	24	1450	34.8
2	Servomotores ⁵	5	1434	7.17
1	L298 (Vs) ⁶	24	70	1.68
1	L298 (Vss) ⁷	5	36.6	0.183
6	4N35 (transistor)	5	7.2	0.036
2	2N3904	5	2.04	0.0102
TOTAL			3124.84	46.88

⁵ Corriente de arranque a 5V calculada a partir de la hoja de datos del servomotor.

⁶ Parte de potencia del L298.

⁷ Parte lógica del L298.

Etapa: Control				
Cantidad	Dispositivo	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
1	ATmega 88 ⁸	5	1	0.005
1	Optotransistor	5	1.2	0.006
2	Pulsadores	5	1	0.005
7	Leds	5	70	0.35
6	4N35 (led)	5	6.9	0.035
TOTAL			80.1	0.401

Fuente: Elaboración propia.

En base a esta tabla, se opta por diseñar una fuente con dos salidas de voltaje. Una de ellas alimentará a todos los dispositivos con un voltaje de 5V, y la otra salida hará lo mismo pero para los dispositivos de 24V. La primera de ellas tendrá una salida digital y otra analógica; debido a que alimentará la etapa de control y de sensores, pero también alimentará a los servomotores. Por el contrario, la salida de 24V, será exclusiva para los motores. Cabe mencionar que en todo momento sólo funciona un motor a la vez. Es por eso que para fijar los requerimientos de la fuente solo se considera el motor de mayor corriente. En ese sentido; los requerimientos de esta fuente se muestran en la tabla 3.4.4.2:

Tabla 3.4.4.2: Requerimientos de la fuente de alimentación.

Fuente	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
	5	Mayor que 913.64	Mayor que 4.57
	24	Mayor que 1520	Mayor que 36.48

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar, que si bien la corriente de los motores y servomotores es un poco alta, esta es instantánea y será mucho menor durante la mayor parte del tiempo.

A partir de los requerimientos mostrados en la tabla 3.4.4.2, se decide por determinar los siguientes parámetros de diseño de la fuente, los cuales se muestran en la tabla 3.4.4.3:

⁸ Consumo de corriente de la figura 30-4 de la hoja de datos para 1MHz, 5V y 25°C.

Tabla 3.4.4.3: Parámetros máximos de la fuente de alimentación.

Fuente	Voltaje (V)	Corriente (A)
1.1	5	1.5
1.2	24	2

Fuente: Elaboración propia.

a) Fuente 1.1:

El primer paso para diseñar una fuente es reducir un voltaje de 220 AC a un valor cercano al que se necesita a la salida. Luego esta tensión será rectificada por un puente de diodos y, posteriormente filtrada. Finalmente ingresará a un regulador el cual entregará el voltaje necesario.

Para hacer el diseño de la fuente hacemos uso de las curvas de Shade (Shade, 1943), las cuales se muestran en las figuras 3.4.4.1, 3.4.4.2 y 3.4.4.3

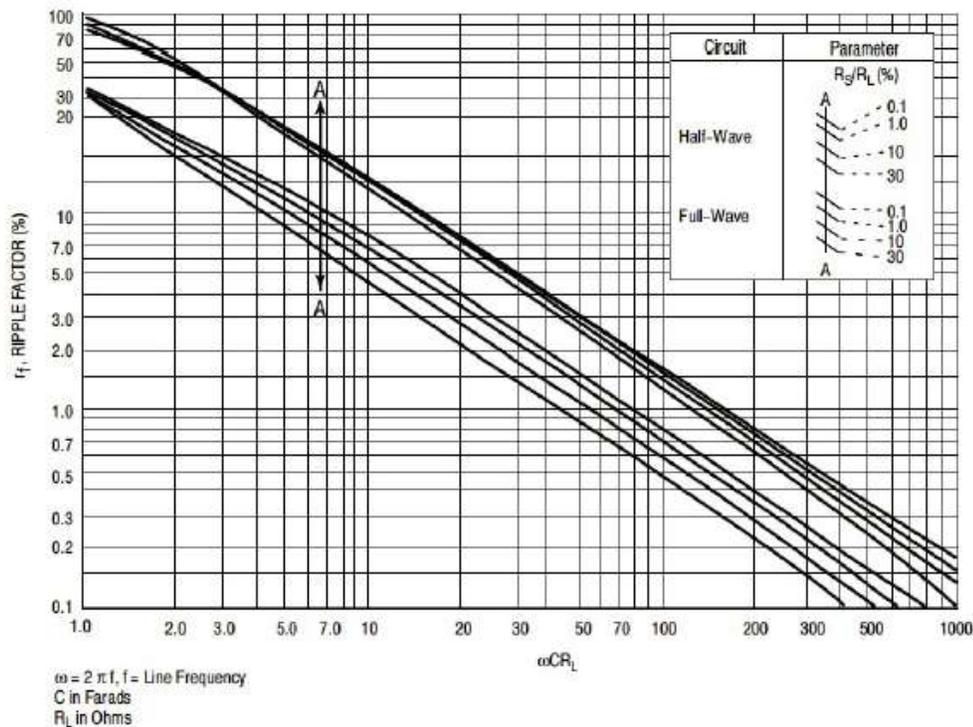


Figura 3.4.4.1: Gráfica r_f vs. wCR_L

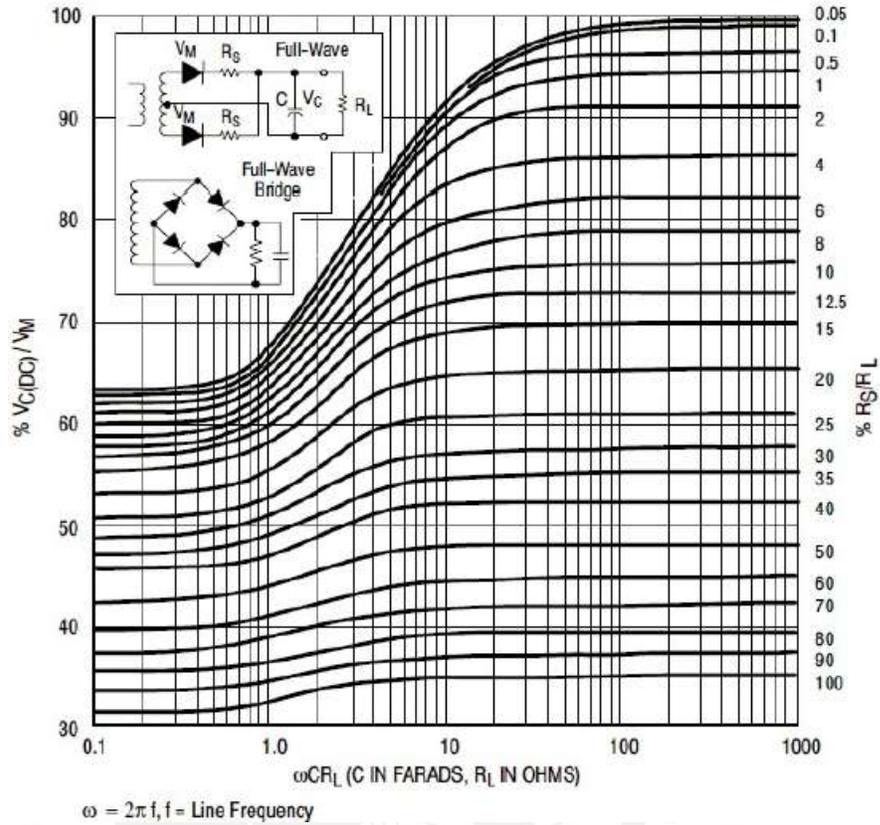


Figura 3.4.4.2: Gráfica utilizada para hallar $V_{c(dc)}/V_M$ en %.

Figure 8-4. Relation of RMS and Peak-to-Average Diode Current in Capacitor-Input Circuits

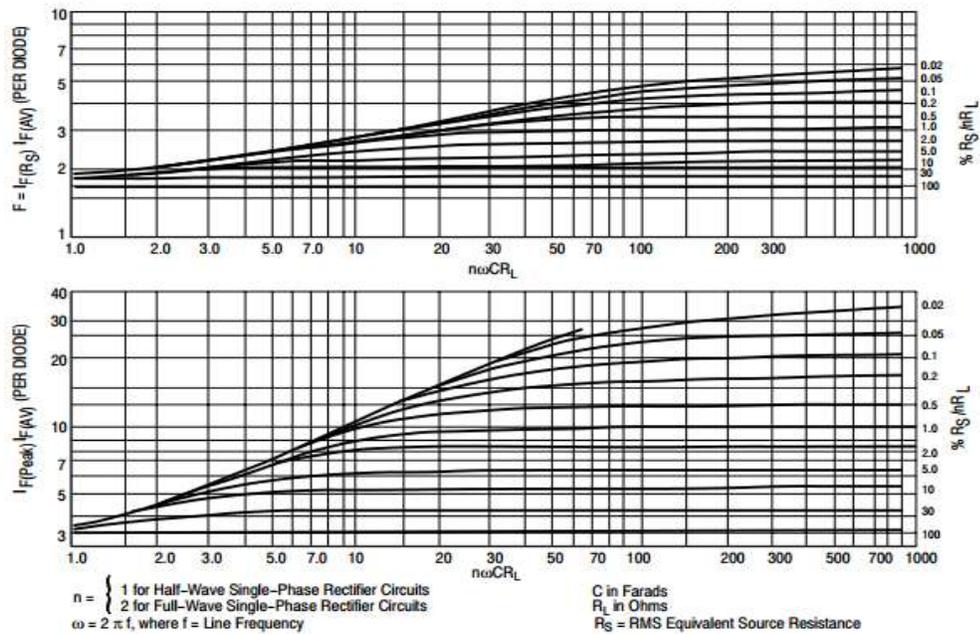


Figura 3.4.4.3: Gráfica utilizada para poder determinar I_F RMS y pico.

Primero debemos fijar un valor para $V_{C(dc)}$, considerando que se utilizará el regulador LM7805 (anexo 15), así como también un voltaje de seguridad de 1V. Entonces:

$$V_{C(dc)} = V_{out} + V_{dropout} + V_{seguridad}$$

$$V_{C(dc)} = 5V + 2V + 1V = 8V$$

Con este valor y la corriente de carga, podemos determinar la resistencia de carga R_L :

$$R_L = \frac{V_{C(dc)}}{I_{carga}} = \frac{8V}{1.5A} = 5.33\Omega$$

Seguidamente, necesitamos saber el valor de R_S . Para ello, se realizó la medición de la resistencia de devanado del secundario de varios transformadores cuya salida sea cercana al valor de $V_{C(dc)}$. Con ello, se comprobó que R_S tiene un valor entre 0.8Ω y 1Ω . Entonces, optamos por un valor de 0.9Ω . Con ello, determinamos el porcentaje de la relación entre R_S/R_L :

$$\frac{R_S}{R_L} = \frac{0.9}{5.33} = 0.169 \equiv 16.9\%$$

A continuación, debemos hallar un factor de rizado, para lo cual asumimos un voltaje de rizado de $1V_{pp}$:

$$r_f = \frac{V_{rizado(pp)}}{2\sqrt{2} V_{C(dc)}} \times 100\% = \frac{1V}{2\sqrt{2} \times 9V} \times 100\% = 3.93\%$$

Con el factor de rizado y la relación entre R_S/R_L , obtenemos mediante la gráfica 3.4.4.1 un valor estimado para wCR_L . Sin embargo; dado que en la gráfica no hay una recta para 16.9%, debemos interpolar.

$$wCR_{L\ 10\%} = 16$$

$$wCR_{L\ 30\%} = 12$$

$$\frac{16 - 12}{10 - 30} = \frac{16 - wCR_{L\ 16.9\%}}{10 - 16.9} \Rightarrow wCR_{L\ 16.9\%} = 14.62$$

Con ello determinamos el valor del filtro capacitivo C:

$$C = \frac{14.62}{wR_L} = \frac{14.62}{2\pi \times 60 \times 5.33} = 7275.94\mu F \approx 7300\mu F \text{ (valor comercial)}$$

Con el valor de C elegido se recalcula wCR_L :

$$wCR_L = 2\pi \times 60 \times 7300\mu F \times 5.33 = 14.67$$

Con este nuevo valor y con la relación entre R_S/R_L , obtenemos en la gráfica 3.4.4.2, el porcentaje de relación entre el voltaje dc a la entrada del regulador ($V_{C(dc)}$) y el voltaje máximo a la salida del transformador.

Para ello, debemos interpolar dos veces:

$$\begin{aligned} \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{10 / 15\%}} &= 69\% \quad \text{y} \quad \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{20 / 15\%}} &= 70\% \\ \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{10 / 20\%}} &= 65\% \quad \text{y} \quad \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{20 / 20\%}} &= 65\% \\ \frac{69 - 70}{10 - 20} &= \frac{69 - \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{14.67 / 15\%}}}{10 - 14.67} \Rightarrow \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{14.67 / 15\%}} &= 69.467\% \\ & \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{14.67 / 20\%}} &= 65\% \\ \frac{69.467 - 65}{15 - 20} &= \frac{69.467 - \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{14.67 / 16.9\%}}}{15 - 16.9} \\ \Rightarrow \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)}_{14.67 / 16.9\%}} &= 67.78\% \end{aligned}$$

Con ello determinamos $V_{T(máx)}$:

$$V_{T(máx)} = \frac{V_{C(dc)}}{67.78\%} = \frac{8V}{67.78\%} = 11.8V$$

Finalmente, pasamos este valor a su valor eficaz:

$$V_{rms} = \frac{V_{T(máx)}}{\sqrt{2}} = \frac{11.8V}{\sqrt{2}} = 8.34V_{rms}$$

Es decir, el voltaje en el secundario del transformador debe ser, aproximadamente, de $8.34V_{rms}$. Por último, calculamos los parámetros necesarios para poder determinar la corriente que circulará por el puente de diodos, sabiendo que es un rectificador de onda completa ($n=2$):

$$\% \frac{R_S}{nR_L} = \frac{0.9}{2 \times 5.33} \times 100 = 8.44\% \quad \text{y} \quad nwCR_L = 2 \times 14.67 = 29.34$$

Con ello obtenemos, mediante la figura 3.4.4.3, la relación de la corriente $I_{F\ rms}$ y pico.

$$\text{Relación } I_{F\ rms} = 2 \quad \text{y} \quad \text{Relación } I_{F\ pico} = 5.2$$

Finalmente, calculamos la corriente rms y pico por diodo:

$$I_{F\ rms} = 2x \frac{I_L}{n} = 2x \frac{1.5}{2} = 1.5A \quad \text{y} \quad I_{F\ pico} = 5.2x \frac{I_L}{n} = 5.2x \frac{1.5}{2} = 3.9A$$

Con los valores calculados elegimos el puente de diodos 3KBP06M (anexo 16), por satisfacer las necesidades.

b) Fuente 1.2:

De igual manera que para la fuente 1.1; para la fuente 1.2 seguimos los mismos pasos. Primero se fija un valor para $V_{C(dc)}$, considerando que se utilizará el regulador LM7824 (anexo 15):

$$V_{C(dc)} = V_{out} + V_{dropout} + V_{seguridad}$$

$$V_{C(dc)} = 24V + 2V + 2V = 28V$$

Con este valor y la corriente de carga, podemos determinar la resistencia de carga R_L :

$$R_L = \frac{V_{C(dc)}}{I_{carga}} = \frac{28V}{2A} = 14\Omega$$

Seguidamente, optamos por un valor de R_S de 0.8Ω y con ello, determinamos el porcentaje de la relación entre R_S/R_L :

$$\frac{R_S}{R_L} = \frac{0.8}{14} = 0.057 \equiv 5.7\%$$

A continuación, debemos hallar un factor de rizado, para lo cual asumimos un voltaje de rizado de $1V_{pp}$:

$$r_f = \frac{V_{rizado(pp)}}{2\sqrt{2} V_{C(dc)}} \times 100\% = \frac{1V}{2\sqrt{2} \times 28V} \times 100\% = 1.26\%$$

Con el factor de rizado y la relación entre R_S/R_L , obtenemos mediante la gráfica 3.4.4.1 un valor estimado para wCR_L . Sin embargo, dado que en la gráfica no hay una recta para 5.7%, debemos interpolar.

$$wCR_{L\ 1\%} = 56$$

$$wCR_{L\ 10\%} = 45$$

$$\frac{56 - 45}{1 - 10} = \frac{56 - wCR_L 5.7\%}{1 - 5.7} \Rightarrow wCR_L 5.7\% = 50.3$$

Con ello determinamos el valor del filtro capacitivo C:

$$C = \frac{50.3}{wR_L} = \frac{50.3}{2\pi \times 60 \times 14} = 9530.3\mu F \cong 9500 \mu F \text{ (valor comercial)}$$

Con el valor de C elegido se recalcula wCR_L :

$$wCR_L = 2\pi \times 60 \times 9500\mu F \times 14 = 50.1$$

Con este nuevo valor y con la relación entre R_S/R_L , obtenemos en la gráfica 3.4.4.2, el porcentaje de relación entre el voltaje dc a la entrada del regulador ($V_{C(dc)}$) y el voltaje máximo a la salida del transformador:

$$\begin{aligned} \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)} 4\%} &= 85\% \\ \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)} 6\%} &= 82\% \\ \frac{85 - 82}{4 - 6} &= \frac{85 - \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)} 5.7\%}}{4 - 5.7} \Rightarrow \% \frac{V_{C(dc)}}{V_{T(máx)} 5.7\%} = 82.45\% \end{aligned}$$

Con ello determinamos $V_{T(máx)}$:

$$V_{T(máx)} = \frac{V_{C(dc)}}{82.45\%} = \frac{28V}{82.45\%} = 33.96V$$

Finalmente, pasamos este valor a su valor eficaz:

$$V_{rms} = \frac{V_{T(máx)}}{\sqrt{2}} = \frac{33.96V}{\sqrt{2}} = 24.01V_{rms}$$

Es decir, el voltaje en el secundario del transformador debe ser, aproximadamente, de $24.01V_{rms}$. Por último, calculamos los parámetros necesarios para poder determinar la corriente que circulará por el puente de diodos, sabiendo que es un rectificador de onda completa ($n=2$):

$$\% \frac{R_S}{nR_L} = \frac{0.8}{2 \times 14} \times 100 = 2.86\% \quad \text{y} \quad nwCR_L = 2 \times 50.1 = 100.2$$

Con ello obtenemos, mediante la figura 3.4.4.3, la relación de la corriente $I_{F\ rms}$ y pico.

$$\text{Relación } I_{F\ rms} = 2.6 \quad \text{y} \quad \text{Relación } I_{F\ pico} = 7$$

Finalmente, calculamos la corriente rms y pico por diodo:

$$I_{F\ rms} = 2.6x \frac{I_L}{n} = 2.6x \frac{2}{2} = 2.6A \quad \text{y} \quad I_{F\ pico} = 7x \frac{I_L}{n} = 7x \frac{2}{2} = 7A$$

Con los valores calculados elegimos el puente de diodos 3KBP06M (anexo 16), por satisfacer las necesidades.

Entonces, el diagrama esquemático de la fuente sería como el que se muestra en la figura 3.4.4.4:

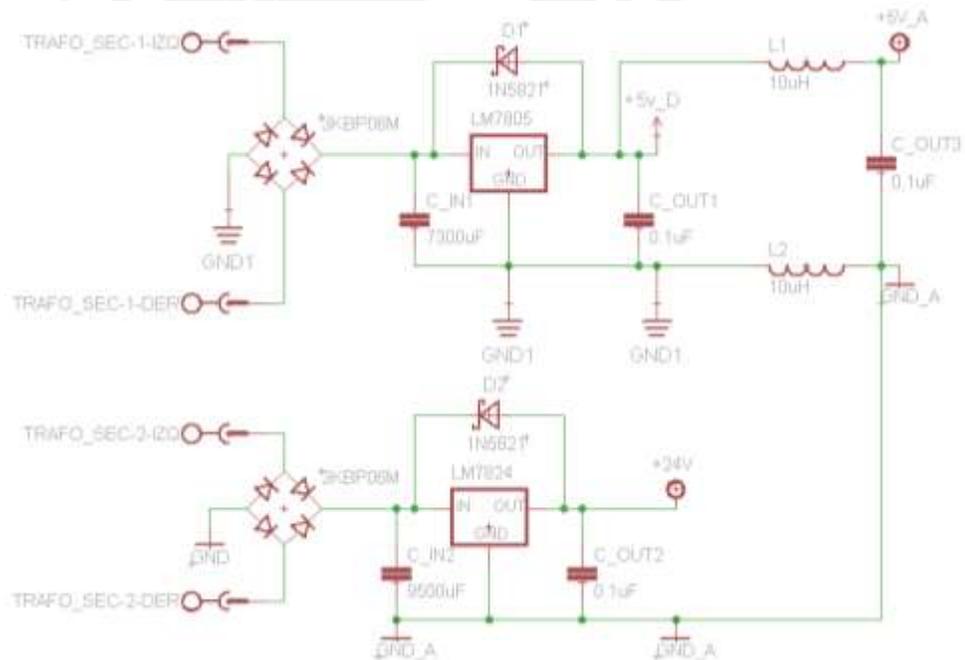


Figura 3.4.4.4: Esquemático de fuentes de alimentación.

Cabe señalar que C_OUT1, C_OUT2 y C_OUT3 son condensadores de desacoplo y su valor se obtiene de la hoja de datos de los reguladores y del ATmega88 respectivamente. Asimismo, se han utilizado dos bobinas (L1 y L2) para aislar la etapa analógica de la digital para la alimentación de 5V de los servomotores. Los valores de las mismas se obtuvieron de

la hoja de datos del microcontrolador. Por último, se han considerado diodos de protección para cada uno de los reguladores.

Finalmente, debemos calcular si los reguladores requieren de un disipador. Para ello calculamos la potencia disipada por cada uno de ellos.

$$P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I_L + (V_{in} \times I_g)$$

$$P_{d\ 7805} = (11.8 - 5) \times 0.914 + (11.8 \times 0.008) = 6.31W$$

$$P_{d\ 7824} = (33.96 - 24) \times 1.52 + (33.96 \times 0.008) = 15.41W$$

En seguida, determinamos la temperatura máxima permitida en el componente. Esta se puede determinar en base a la temperatura máxima en la junta del empaque (T_j) y a la temperatura del ambiente (T_a). Si bien $T_{j\ máx} = 125^\circ C$, se tomará por medida de seguridad $T_j = 100^\circ C$:

$$T_{ja\ (máx)} = T_j\ (máx) - T_a\ (máx) = 100^\circ C - 25^\circ C = 75^\circ C$$

Finalmente, en base a lo anterior se determina el máximo valor de resistencia térmica entre la junta del empaque y el medio ambiente:

$$\theta_{ja\ 7805} = \frac{T_{ja\ (máx)}}{P_d} = \frac{75^\circ C}{6.31W} = 11.89^\circ C/W$$

$$\theta_{ja\ 7824} = \frac{T_{ja\ (máx)}}{P_d} = \frac{75^\circ C}{15.41W} = 4.87^\circ C/W$$

Como se aprecia, la resistencia térmica calculada para ambos casos es menor que la permitida por el regulador ($\theta_{ja} = 65^\circ C/W$), motivo por el cual es necesario el uso de un disipador para empaque TO-220 para ambos reguladores. En el anexo 17 se muestran opciones de disipadores. Por otro lado; en la figura 3.4.4.5 y en la figura 3.4.4.6 se muestran la cara de pistas y la cara de componentes de este circuito, junto con el del controlador y el de los motores. Cabe mencionar que esta tarjeta electrónica se ha realizado utilizando componentes en empaque SMD y para los leds indicadores y para los sensores se han utilizado

conectores; ya que estos se encontrarán en otras tarjetas. Asimismo, esta se ha realizado en doble capa.

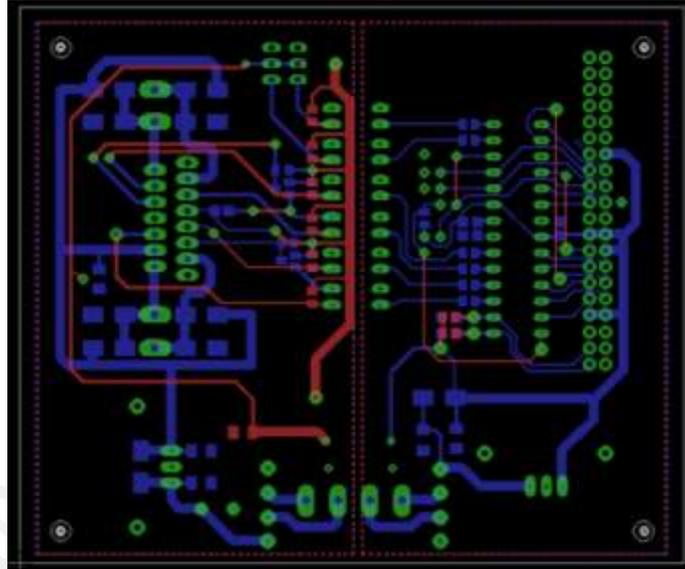


Figura 3.4.4.5: Cara de pistas: fuentes, controlador y motores.

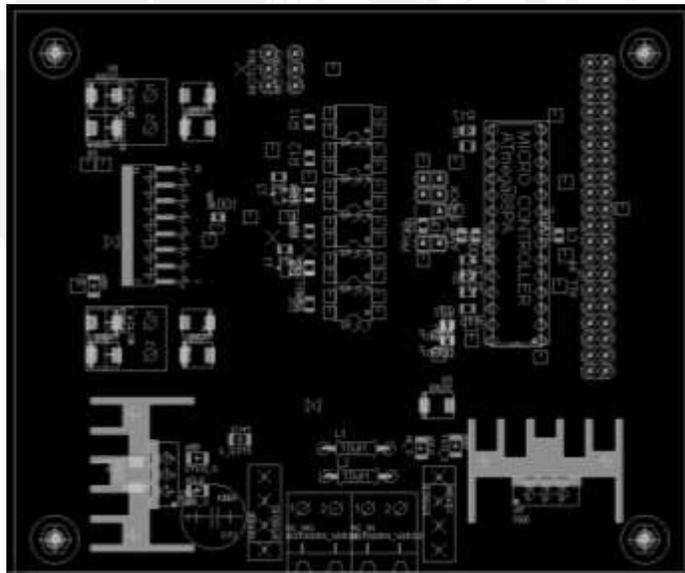


Figura 3.4.4.6: Cara de componentes: fuentes, controlador y motores.

Cabe mencionar que en el anexo 18 se muestra el esquemático completo de todo el sistema diseñado.

3.5 Diseño del Software

3.5.1 Introducción

Contando con el diseño de la estructura mecánica del equipo y de los diversos circuitos electrónicos, lo que falta es esquematizar, mediante diagramas de flujo, el programa o software que se debe desarrollar; teniendo en cuenta las señales que se adquieren de los sensores y pulsadores y las señales que se envían a los motores e indicadores, para poder controlar de manera adecuada el proceso. En ese sentido, se muestran los diagramas de flujo del programa principal y de las diversas subrutinas que permitirán la automatización, en sí misma, del método de tinción de Ziehl Neelsen.

3.5.2 Programa principal

El diagrama de flujo del programa principal (figura 3.5.2.1) consiste, básicamente, en hacer el llamado de las diversas subrutinas que se utilizan en el proceso, de tal manera que se pueda seguir con el método de Ziehl Neelsen. En ese sentido, el programa principal llama a 5 subrutinas, las cuales coinciden con los reactivos y/o etapas del método:

- Subrutina Fucsina
- Subrutina Mechero
- Subrutina Agua
- Subrutina Alcohol Ácido
- Subrutina Azul de Metileno

Asimismo, si bien no se aprecia en el diagrama de flujo del programa principal, cabe mencionar que dentro de las subrutinas mencionadas se llama a otras subrutinas de apoyo, las cuales son:

- Subrutina buscar_etiqueta
- Subrutina usar_valvula
- Subrutina campana

Por otro lado, debe haber también una subrutina de interrupción para la etapa de detección de vapores. Es decir, el programa cuenta en general con 9 subrutinas. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del programa principal (figura 3.5.2.1).

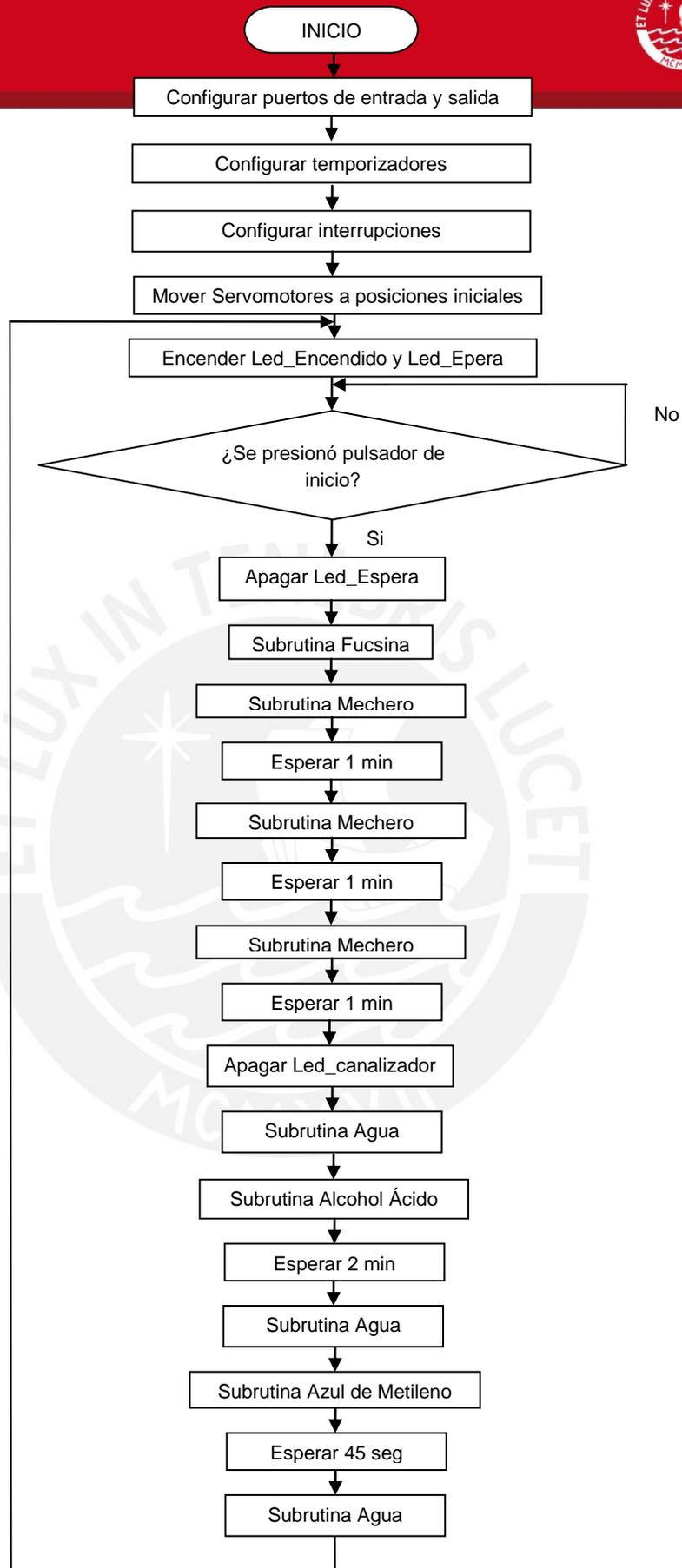


Figura 3.5.2.1: Diagrama de flujo del programa principal.

3.5.3 Subrutinas

3.5.3.1 Subrutina Fucsina

En esta subrutina, lo que se busca es que se realice el dispensado de la fucsina sobre la muestra. Para ello, se actualiza el registro en el cual se tendrá el código a buscar con el código correspondiente a la fucsina y se procede a llamar a las subrutinas buscar_etiqueta y usar_válvula para que se ubique la pera de decantación que contiene la fucsina y se realice el dispensado. En la figura 3.5.3.1.1, se muestra un diagrama de flujo de esta subrutina.

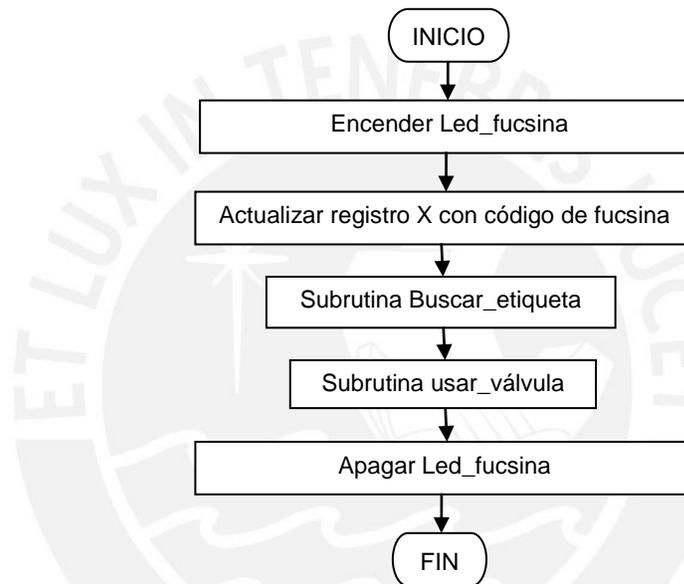


Figura 3.5.3.1.1: Diagrama de flujo de la etapa de la Fucsina.

3.5.3.2 Subrutina Mechero

Para el caso de la subrutina de mechero, primero se realiza el llamado a la subrutina campana para ubicar el canalizador de vapores sobre la muestra. Posteriormente, se habilitan las interrupciones y se realiza el calentamiento en movimiento de vaivén. Para ellos vamos a considerar que el mechero empieza en la posición donde se ubica el sensor denominado pos_mechero 0 (posición más lejana) y que el movimiento de vaivén se realiza entre pos_mechero 1 y pos_mechero 2 (ver figura 3.5.3.2.1). El movimiento de vaivén se realizará hasta que ocurra la interrupción externa; es decir hasta que se detecten los vapores, luego de

lo cual se retorna, se deshabilitan las interrupciones y se retorna al programa principal. El diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la figura 3.5.3.2.2.

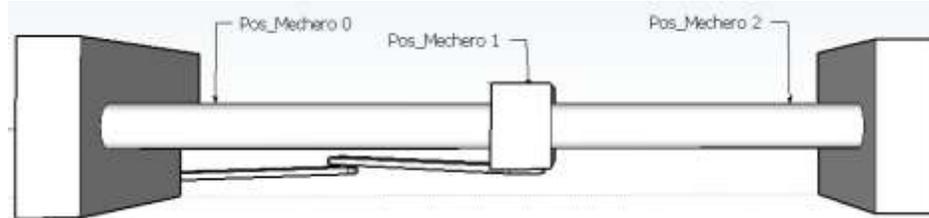


Figura 3.5.3.2.1: Ubicación de las posiciones del mechero.

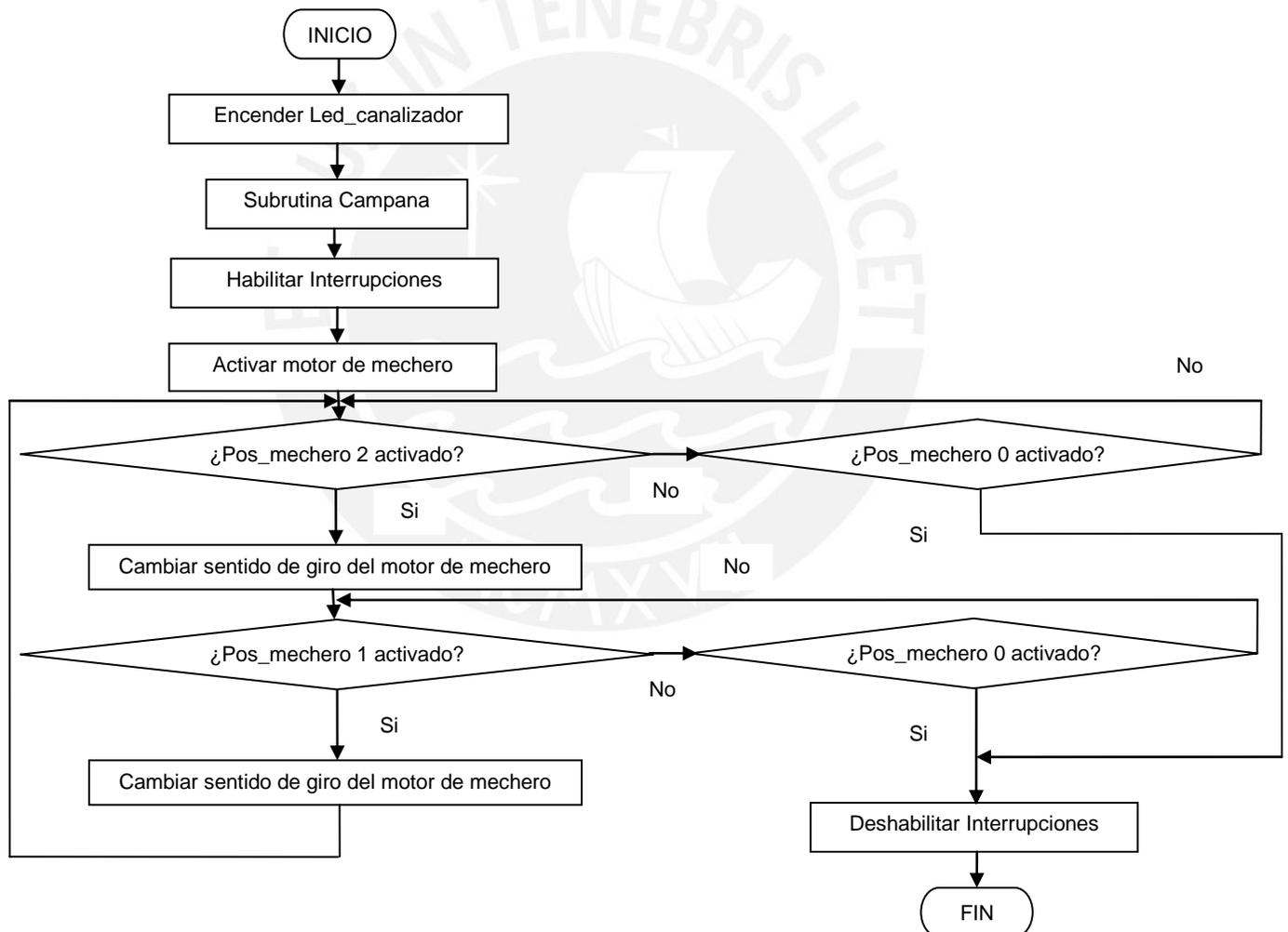


Figura 3.5.3.2.2: Diagrama de flujo de la subrutina de mechero.

3.5.3.3 Subrutina Agua

En la subrutina de la etapa del agua lo que se pretende es realizar el enjuague de la muestra. Al igual que en la subrutina de la fucsina, se actualiza el registro con el código del agua y se hace el llamado a las subrutinas de buscar_etiqueta y usar_válvula. Sin embargo; antes de llamar a la subrutina usar_válvula, se hace girar el servomotor del soporte de lámina portaobjetos un ángulo de 45° para que el agua fluya hacia la canaleta de desecho de reactivos. De la misma manera, al retornar de esa subrutina, se regresa el servomotor a la posición inicial. En la figura 3.5.3.3.1 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

S

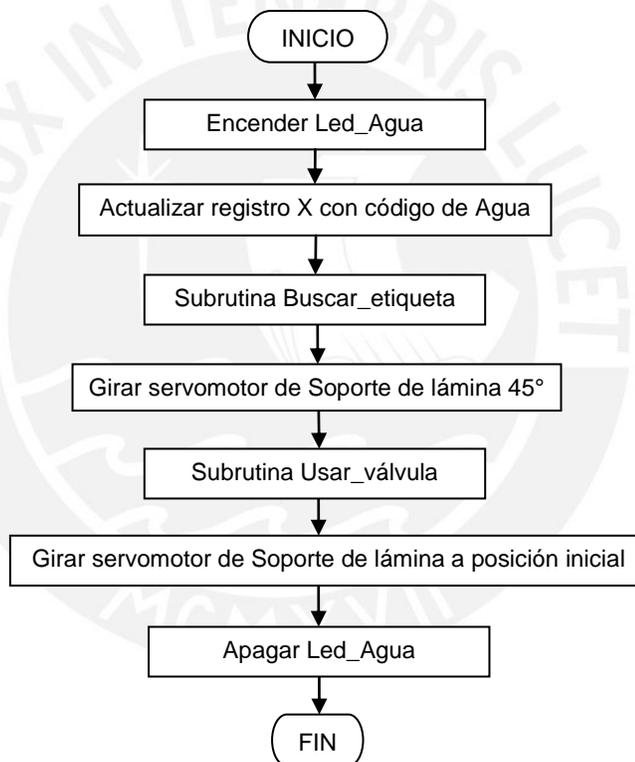


Figura 3.5.3.3.1: Diagrama de flujo de la etapa del Agua.

3.5.3.4 Subrutina Alcohol Ácido

En la subrutina del alcohol ácido el accionar es el mismo al de la etapa de la fucsina. El diagrama de flujo de esta etapa se muestra en la figura 3.5.3.4.1.

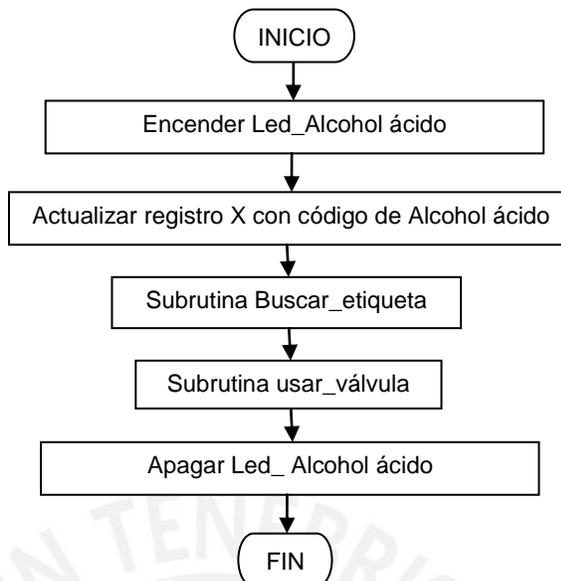


Figura 3.5.3.4.1: Diagrama de flujo de la etapa del Alcohol ácido.

3.5.3.5 Subrutina Azul de Metileno

Al igual que con las etapas de la fucsina y del alcohol ácido, para el azul de metileno la subrutina tiene el mismo objetivo y por lo tanto sigue el mismo procedimiento. En la figura 3.5.3.5.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente a este reactivo.

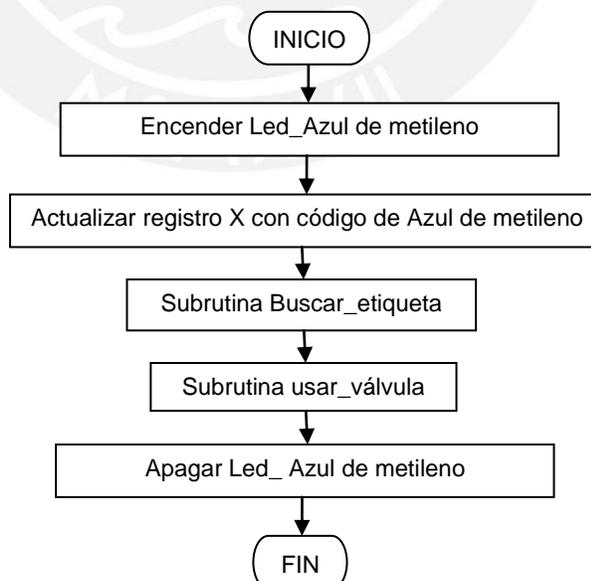


Figura 3.5.3.5.1: Diagrama de flujo de la etapa del Azul de metileno.

3.5.3.6 Subrutina buscar_etiqueta

Esta subrutina tiene como objetivo fundamental buscar e identificar el tipo de reactivo correcto correspondiente a cada una de las etapas. Para ello, al recibir la señal del sensor de presencia de que se ubicó una pera de decantación, detiene el motor de la rueda dentada y evalúa si el código que recibe de los sensores de identificación de reactivos es el código correspondiente a la respectiva etapa en la que se encuentra. Si esto no es correcto reinicia la búsqueda. El diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la figura 3.5.3.6.1

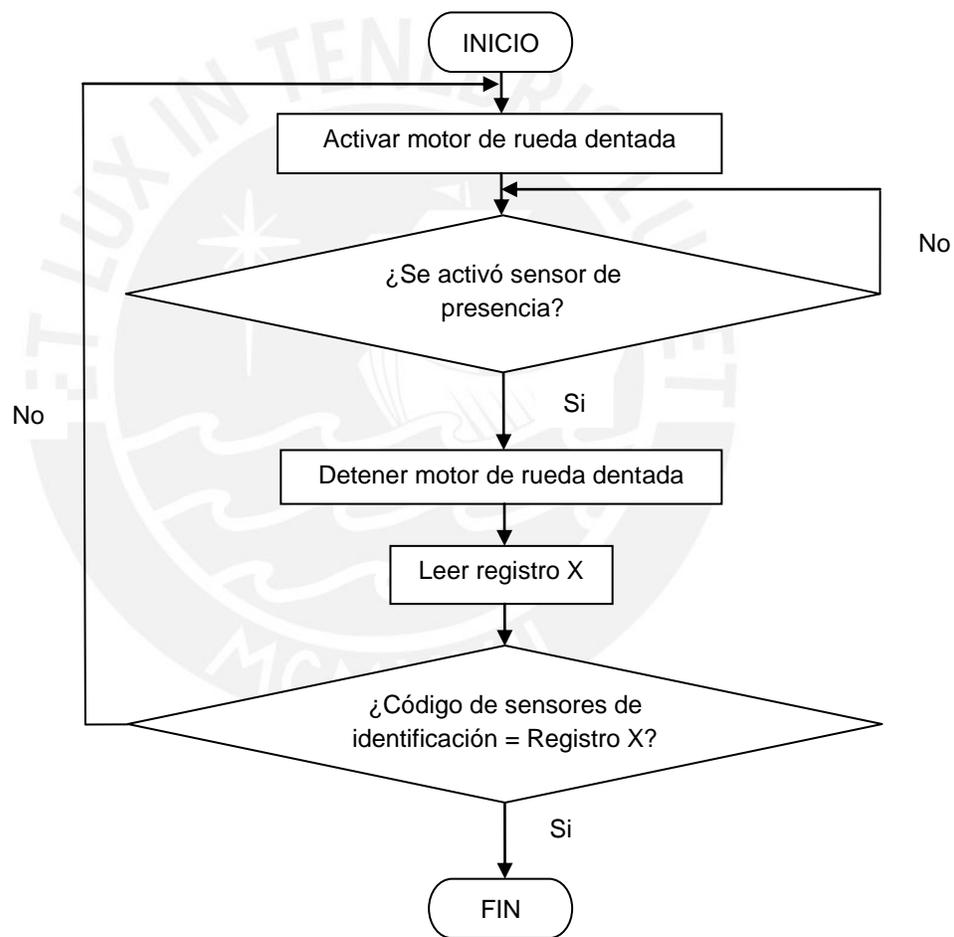


Figura 3.5.3.6.1: Diagrama de flujo de la etapa buscar_etiqueta.

3.5.3.7 Subrutina usar_válvula

En esta subrutina se realiza el dispensado de los diversos reactivos. Para ello se hace girar el servomotor de apertura y cierre de dispensadores un ángulo de 90° , se espera 5 segundos y se regresa a la posición inicial. En la figura 3.5.3.7.1 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

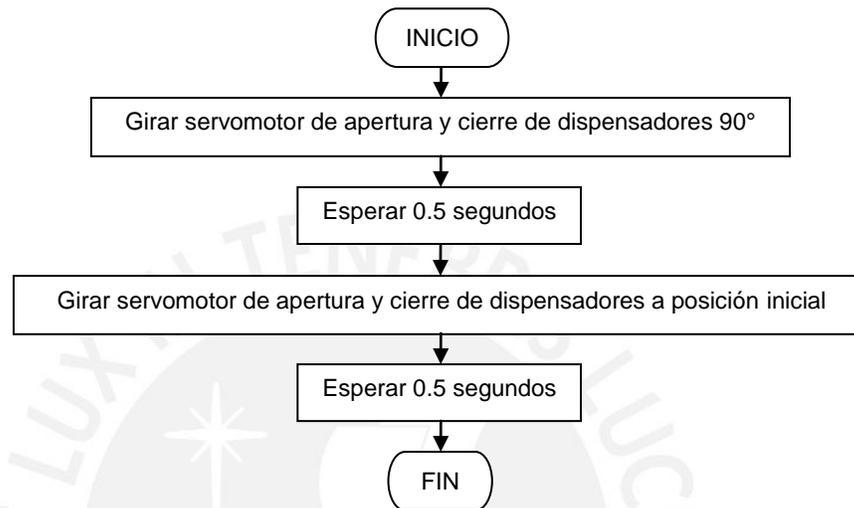


Figura 3.5.3.7.1: Diagrama de flujo de la subrutina usar_válvula.

3.5.3.8 Subrutina Campana

Esta subrutina es llamada dentro de la subrutina de mechero, con el único objetivo de ubicar el canalizador de vapores sobre la muestra. El diagrama de flujo de esta subrutina se muestra en la figura 3.5.3.8.1.

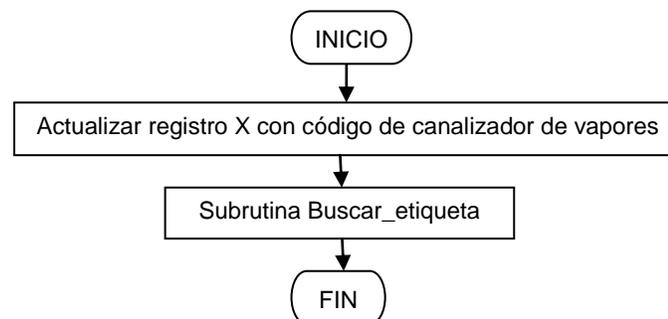


Figura 3.5.3.8.1: Diagrama de flujo de la subrutina campana.

3.5.3.9 Subrutina de Interrupción

Como se mencionó en la subrutina de mechero, la subrutina de interrupción se va a realizar en el momento en el que se active el detector de vapor. En esta subrutina se direcciona el mechero a la posición más lejana (pos_mechero 0) y se deshabilita el motor. En la figura 3.5.3.9.1 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

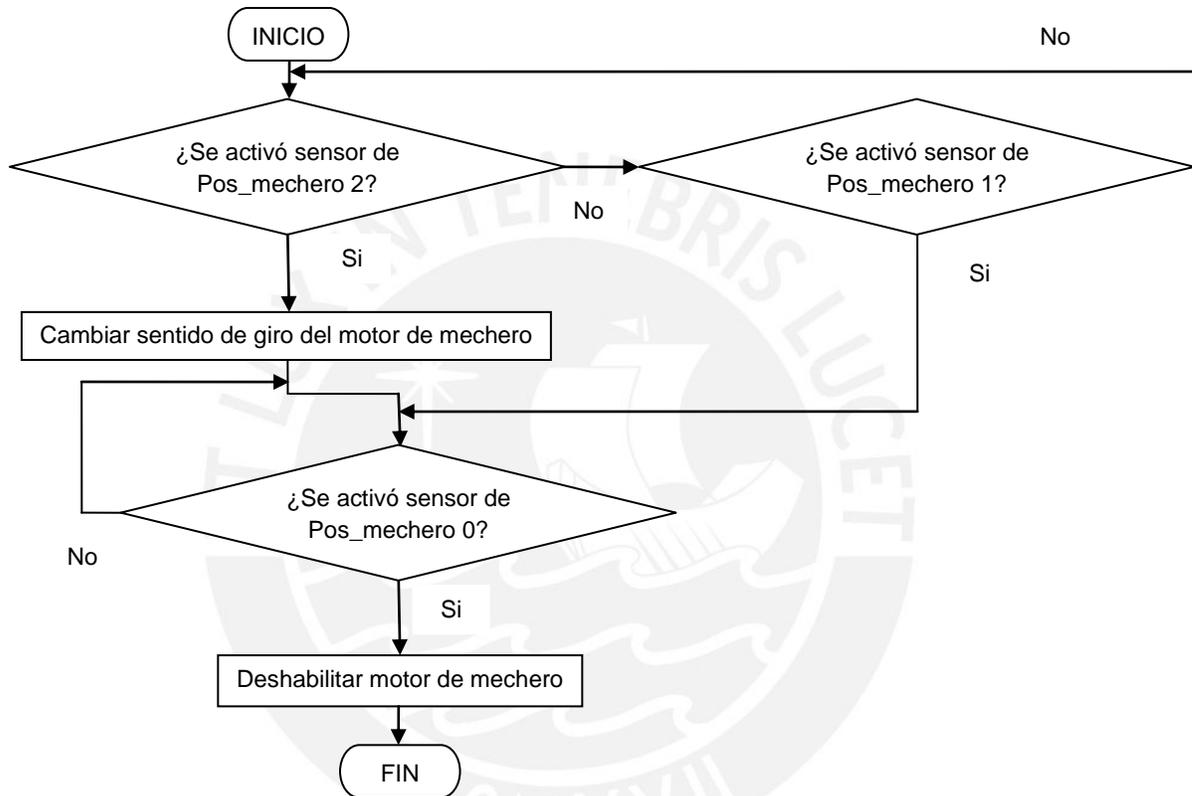


Figura 3.5.3.9.1: Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción.

3.6 Costo del prototipo

El equipo diseñado debe buscar ser económico; de tal manera que pueda ser adquirido por todos los hospitales, laboratorios y centros de salud, y así permitir una mejor tinción de Ziehl Neelsen y por consecuencia un mejor diagnóstico. En ese sentido, en la tabla 3.6.1, se estima el costo de desarrollo que tendría este prototipo.

Tabla 3.6.1: Costo de componentes y desarrollo de un prototipo.

Concepto	Costo (S/.)
Materiales y desarrollo de estructuras mecánicas	S/. 3,000.00
Desarrollo de las tarjetas electrónicas	S/. 350.00
Motor DC Portescap 25GST2R82 – 216P – 2	S/. 280.00
Motor DC Crouzet 82861018	S/. 260.00
4 Peras de decantación	S/. 100.00
Sensor HIH-5031	S/. 100.00
2 Servomotores Hitec HS322-HD	S/. 60.00
10 Diodos Schottky 1N5821	S/. 50.00
Transformador con dos secundarios	S/. 50.00
Microcontrolador ATmega 88	S/. 25.00
Driver L298	S/. 20.00
43 Resistencias de diversos valores	S/. 12.90
6 Optoacopladores 4N35	S/. 12.00
Batería 9V	S/. 11.00
2 Puentes de diodos 3KBP06M	S/. 10.00
2 Reguladores: LM7805, LM7824	S/. 8.00
7 Sensores MOC70t3	S/. 7.00
3 Potenciómetros de precisión de 10KΩ	S/. 6.00
Regulador TLE 4274-V50	S/. 5.00
8 Leds	S/. 4.00
Optotransistor PT534-6B	S/. 4.00
12 Capacitores de diversos valores	S/. 3.60
2 Disipadores para empaque TO-220	S/. 3.00
2 bobinas o inductores	S/. 2.00
2 Transistores 2N3904	S/. 2.00
Led Infrarrojo	S/. 2.00
2 Interruptores	S/. 1.00
Opamp LM358N	S/. 1.00
2 Pulsadores	S/. 1.00
Diodo 1N4004	S/. 1.00
TOTAL	S/. 4,391.50

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia, el costo del prototipo es de S/.4391.50, el cual es un poco elevado y no podría ser adquirido por todos los hospitales y laboratorios. Sin embargo; cabe mencionar que este costo se reduciría en un buen porcentaje si se logra que se desarrolle este equipo en grandes cantidades. En ese sentido, se estima que el costo del equipo sería menor a los S/.2000.00, lo cual lo hace bastante asequible.



CAPÍTULO 4:

Simulaciones y Resultados

4.1 Introducción

En el presente capítulo se busca comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos electrónicos anteriormente diseñados. Asimismo, se busca demostrar, mediante simulaciones, que el software realiza los pasos del método de tinción de Ziehl Neelsen en la secuencia adecuada. Para ello, primero se muestran los ensayos realizados con los diversos circuitos y los resultados obtenidos con cada uno de ellos. En ese sentido, se realizan las siguientes pruebas:

- Comprobación del voltaje de salida del sensor MOC70t3.
- Ensayo de la etapa de regulación de voltaje de la batería del circuito detector de vapores.
- Prueba de la etapa de verificación de nivel de batería del circuito detector de vapores.
- Ensayo del circuito de detección de vapores.
- Comprobación del receptor infrarrojo.
- Prueba de la etapa de aislamiento eléctrico del circuito de excitación de motores.
- Comprobación de la etapa de aislamiento eléctrico y del inversor del circuito de excitación de motores.
- Ensayo del circuito de excitación y control de motores.

Finalmente, se realiza una simulación del programa para comprobar que las señales que se envían a los motores son las correctas, que se cumplen con todas las etapas de la tinción y que la temporización es precisa. Cabe mencionar que para realizar las mediciones se utilizaron multímetros Fluke 179.

4.2 Ensayo de los circuitos electrónicos y resultados

4.2.1 Ensayo del sensor MOC70t3

En este primer ensayo, se hizo la prueba del sensor MOC70t3 (circuito de la figura 3.4.1.2.6) en dos estados: cuando no hay presencia de un marcador y cuando si hay presencia de un marcador. Los resultados obtenidos para ambas pruebas se muestran en las figuras 4.2.1.1 y 4.2.1.2 respectivamente.



Figura 4.2.1.1: Ensayo del sensor MOC70t3 sin presencia de marcador.



Figura 4.2.1.2: Ensayo del sensor MOC70t3 con presencia de marcador.

Como se puede observar en estas figuras, cuando no hay presencia de un marcador el voltaje de salida es de 0.1V; mientras que, cuando si hay presencia de un marcador el voltaje de salida es de 4.96V. Con ello, y sabiendo que para el ATmega 88 se considera nivel bajo hasta el 20% de VCC y nivel alto desde el 60% del mismo, se demuestra que los valores obtenidos están dentro del rango.

$$V_{IL}(\text{máx}) = 0.2 (5) = 1V > 0.1V$$

$$V_{IH}(\text{mín}) = 0.6 (5) = 3V < 4.96V$$

Esto nos demuestra que no habrá problemas con la detección del '0' y del '1'; ya que los valores obtenidos están dentro de los rangos respectivos.

4.2.2 Ensayo de la etapa de regulación del detector de vapor

En este ensayo se realizó la prueba de la etapa de regulación del circuito detector de vapor (figura 3.4.1.4.4). En ese sentido, y dado que no se tenía el regulador TLE4274-V50, se adaptó el circuito para el regulador LM7805. Es decir, considerando que el LM7805 necesita que su voltaje de entrada tenga 2V más que el voltaje deseado a la salida, se ensayo que la salida se mantenga igual a 5V desde un voltaje de entrada de 9V (voltaje de batería) hasta un voltaje de entrada de 7V. Como se podrá ver en las figuras 4.2.2.1 y 4.2.2.2 el voltaje de salida se mantiene constante y en el valor deseado.

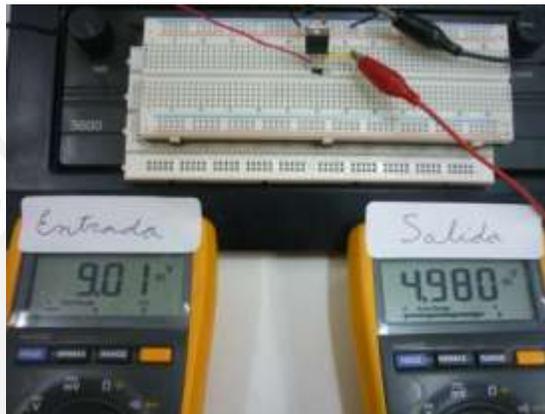


Figura 4.2.2.1: Ensayo de la etapa de regulación con V_{IN} de 9V.

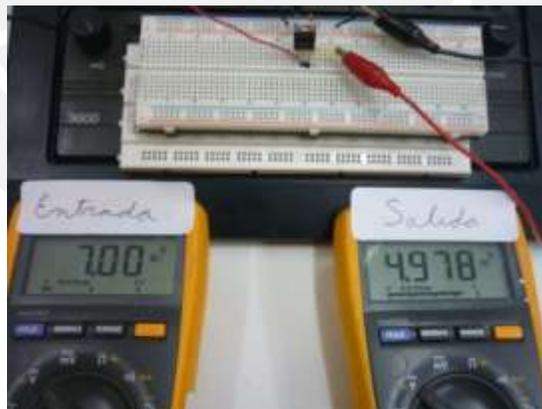


Figura 4.2.2.2: Ensayo de la etapa de regulación con V_{IN} de 7V.

4.2.3 Ensayo del verificador de nivel de batería del detector de vapor

En este tercer ensayo se busca demostrar el funcionamiento de la etapa de verificación de nivel de batería del circuito detector de vapor (esquemático de la figura 3.4.1.4.4). Sin embargo; al igual que en el ensayo anterior, se adaptó el circuito al regulador LM7805. Es decir, el led en vez de encender a 5.6V

enciende a 7V. Para construir el circuito se usaron dos potenciómetros de precisión de $10K\Omega$, uno largo y uno alto. El potenciómetro largo es el que se utiliza como divisor resistivo de la señal de 9V (en el esquemático equivale a R_5), mientras que el potenciómetro alto (equivalente a R_1) se utiliza para fijar el voltaje de referencia de entrada al comparador.

Antes de construir el circuito se midió el valor real de los potenciómetros. En ese sentido se obtuvo lo siguiente:

$$\text{Potenciómetro largo} \equiv R_5 = 9.88K\Omega$$

$$\text{Potenciómetro alto} \equiv R_1 = 10.46K\Omega$$

Conociendo el valor real de los potenciómetros, se determinó el valor de ambos divisores resistivos realizando los mismos cálculos que los mostrados en el diseño. En ese sentido se fijó:

$$R_{5 inferior} = 4.94K\Omega$$

$$R_{5 superior} = 4.94K\Omega$$

$$R_{1 inferior} = 7.32K\Omega$$

$$R_{1 superior} = 3.14K\Omega$$

Con los valores fijados se construyó el circuito y se demostró que con una entrada de 9V y hasta un voltaje mayor a 7V el led está apagado (figura 4.2.3.1), mientras que para un voltaje de de 7V en la entrada el led se enciende (figura 4.2.3.2).

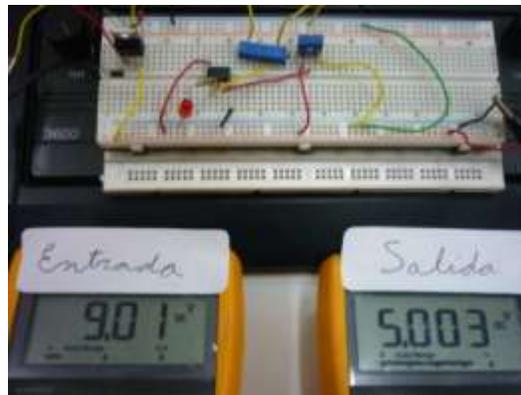


Figura 4.2.3.1: Ensayo de la verificación de nivel de batería ($V_{IN}=9V$, led apagado).

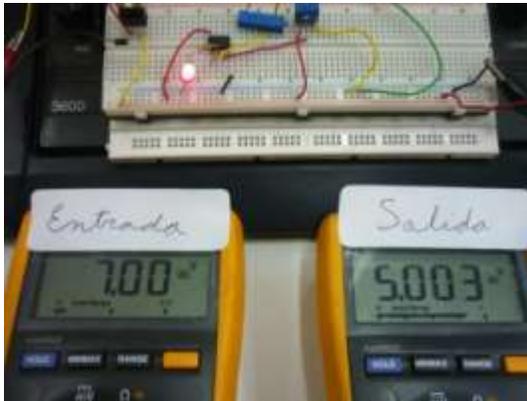


Figura 4.2.3.2: Ensayo de la verificación de nivel de batería ($V_{IN}=7V$, led encendido).

4.2.4 Ensayo del detector de vapor

Para este ensayo se utilizó una fuente de voltaje variable para simular el sensor de vapor, y se comprobó que para el voltaje de referencia correspondiente a 95% HR se enciende un led. Al igual que para el caso anterior, se utilizó un potenciómetro equivalente a R_2 y se estimó los valores del divisor resistivo:

$$R_2 = 9.6K\Omega$$

$$R_{2\text{ superior}} = 2.3K\Omega$$

$$R_{2\text{ inferior}} = 7.30K\Omega$$

Con ello se construyó el circuito de la figura 3.4.1.4.4 y se comprobó que tanto para un voltaje pequeño (equivalente a un bajo % HR) (figura 4.2.4.1) como para un voltaje cercano al de referencia (figura 4.2.4.2) no se enciende el led. En cambio, a penas el voltaje del sensor supera el de referencia (por lo tanto se supera el 95% HR fijado) se enciende el led (figura 4.2.4.3).

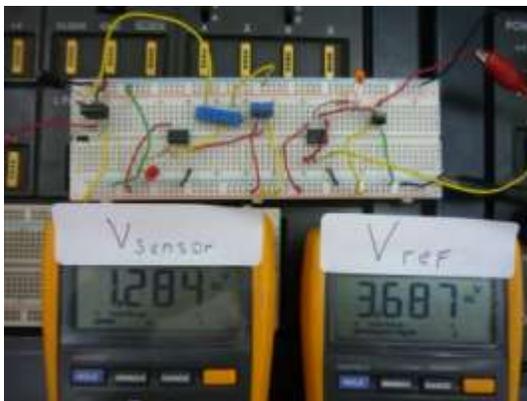


Figura 4.2.4.1: Ensayo del detector de vapor para bajo V_{Sensor} (led apagado).



Figura 4.2.4.2: Ensayo del detector de vapor para V_{Sensor} cercano a V_{Ref} (led apagado).

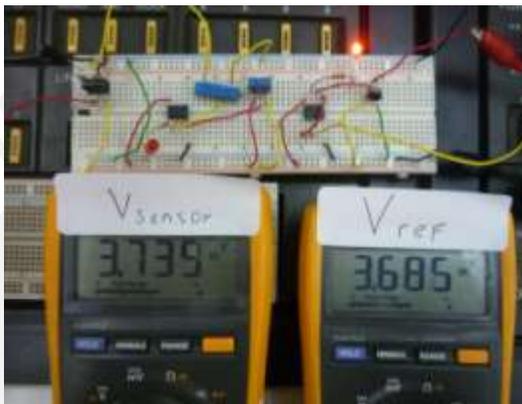


Figura 4.2.4.3: Ensayo del detector de vapor para V_{Sensor} mayor a V_{Ref} (led encendido).

4.2.5 Ensayo del receptor infrarrojo

Para el ensayo del receptor infrarrojo se unió esta etapa con la del detector de vapor. Sin embargo; se utilizó un optotransistor del cual no se tenía información; por lo cual, se construyó el esquemático diseñado para esta etapa, el cual forma parte del controlador (figura 3.4.3.2.1) y se realizaron diversas pruebas. Al colocar la resistencia de $3.9\text{K}\Omega$, no se obtenían los estados requeridos a la salida. Por ese motivo, se fue cambiando esa resistencia, hasta llegar a $1\text{M}\Omega$, con la cual se consiguió 5V y 0V a la salida en los momentos de no detección (figura 4.2.5.1) y de detección de vapor (figura 4.2.5.2) respectivamente. Considerando una caída de voltaje colector emisor en saturación de 0.4V , podemos calcular la corriente:

$$I_c = \frac{5\text{V} - 0.4\text{V}}{1\text{M}\Omega} = 4.6\mu\text{A}$$



Figura 4.2.5.1: No detección de vapor y 5V a la salida del receptor IR.



Figura 4.2.5.2: Detección de vapor y 0V a la salida del receptor IR.

Asimismo, se comprueba que no habrá problemas con la interpretación de los resultados de nivel alto o bajo por el ATmega88.

$$V_{IL(max)} = 0.2 (5) = 1V > 0.715V$$

$$V_{IH(min)} = 0.6 (5) = 3V < 4.57V$$

4.2.6 Ensayo del aislamiento eléctrico

En este ensayo se comprobó la etapa de aislamiento eléctrico del circuito de excitación de motores (figura 3.4.2.2.3). En ese sentido, se demostró que este se comporta como un inversor de voltaje; dado que, para una entrada de nivel alto (5V) la salida del optoacoplador 4N35 es de nivel bajo (cercano a 0V) (figura 4.2.5.1) y viceversa (figura 4.2.5.2).

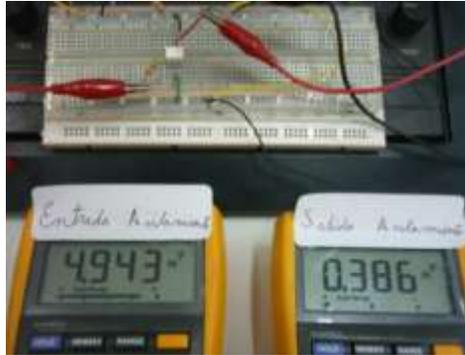


Figura 4.2.5.1: Ensayo del aislamiento eléctrico para $V_{IN}=5V$.

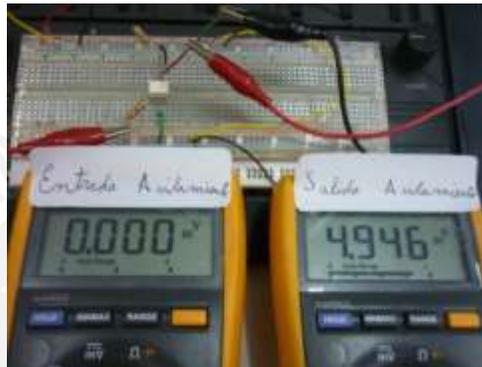


Figura 4.2.5.1: Ensayo del aislamiento eléctrico para $V_{IN}=0V$.

4.2.7 Ensayo del aislamiento eléctrico y del inversor

Para este caso se ensayó la etapa del aislamiento eléctrico y del inversor del circuito de excitación de motores (figura 3.4.2.2.3) para comprobar los valores mostrados en la tabla 3.4.2.2.4. En ese sentido, en la figura 4.2.6.1 se muestra el ensayo para una entrada al aislamiento (correspondiente a la salida del microcontrolador) en nivel alto (5V); mientras que en la figura 4.2.6.2 se muestra el ensayo para una entrada al aislamiento en nivel bajo (0V).



Figura 4.2.6.1: Ensayo del aislamiento eléctrico y del inversor con $V_{IN}=5V$.

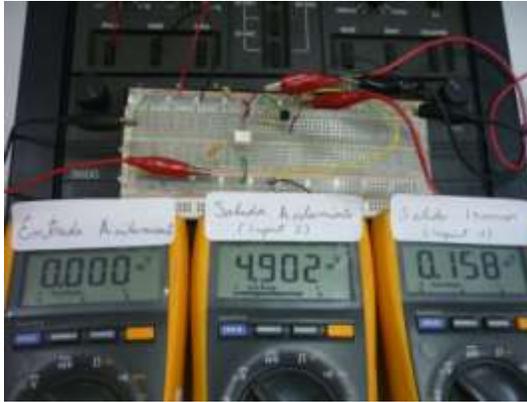


Figura 4.2.6.2: Ensayo del aislamiento eléctrico y del inversor con $V_{IN}=0V$.

Como se puede ver en estas figuras, los valores obtenidos serán bien reconocidos por el L298 y no habrá confusión entre un nivel bajo y un nivel alto; ya que, en todos los casos están dentro del rango debido:

$$V_{IL\ min} = -0.3V < 0.386V < V_{IL\ máx} = 1.5V$$

$$V_{IL\ min} = -0.3V < 0.158V < V_{IL\ máx} = 1.5V$$

$$V_{IH\ min} = 2.3V < 4.941V < V_{IH\ máx} = V_{SS} (5V)$$

$$V_{IH\ min} = 2.3V < 4.902V < V_{IH\ máx} = V_{SS} (5V)$$

4.2.8 Ensayo del circuito de excitación y control de motores

En este último ensayo se comprueba el circuito de excitación y control de motores (esquemático de la figura 3.4.2.2.3) para un solo motor. En ese sentido, se demuestra la tabla 3.4.2.2.3, de la lógica del driver L298. Para ello se realizaron 2 pruebas, una sin motor y otra con motor. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2.8.1.

Tabla 4.2.8.1: Ensayo del circuito de excitación y control de motores.

Sin motor				
Hab.	IN1	IN2	$V_{sin\ motor}$	Figura
4.98V	4.97V	0.38V	11.67V	4.2.8.1
4.98V	0.16V	4.93V	-11.86V	4.2.8.2
0V	0.16V	4.94V	0.21V	4.2.8.3
0V	4.98V	0.39V	0.21V	4.2.8.4

Con motor					
Hab.	IN1	IN2	V _{con motor}	Motor	Figura
4.15V	4.12V	0.37V	3.78V	Antihorario	4.2.8.5
4.15V	0.17V	4.10V	-3.67V	Horario	4.2.8.6
-0.01V	0.16V	4.12V	0.00V	Detenido	4.2.8.7
-0.01V	4.15V	0.41V	0.00V	Detenido	4.2.8.8

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2.8.1: Primer ensayo sin motor.

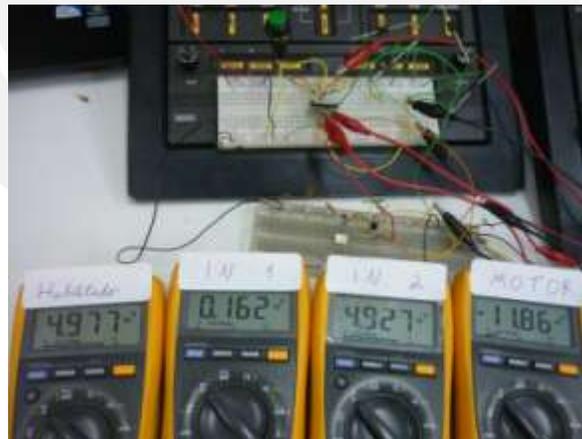


Figura 4.2.8.2: Segundo ensayo sin motor.



Figura 4.2.8.3: Tercer ensayo sin motor.



Figura 4.2.8.4: Cuarto ensayo sin motor.



Figura 4.2.8.5: Primer ensayo con motor.



Figura 4.2.8.6: Segundo ensayo con motor.



Figura 4.2.8.7: Tercer ensayo con motor.



Figura 4.2.8.8: Cuarto ensayo con motor.

4.3 Simulación del programa

Finalmente, se realizó la simulación de un programa de prueba, en el cual no se consideran los leds indicadores. Este programa completo se muestra en el anexo 19. El código de la subrutina principal se muestra en la figura 4.3.1.

```
int main(void)
{
    Configurar_Puertos();
    Configurar_TIC00();
    Configurar_TIC01();
    Configurar_Interrupciones();
    Servo_peras_pos1();
    Servo_bandeja_pos3();
    while((PINC & 0b00010000)==0b00000000){}
    Fucsina();
    Mechero();
    Agua();
    Alcohol_Acido();
    delay_seg = 1200;
    Delay();
    Agua();
    Azul_Metileno();
    delay_seg = 450;
    Delay();
    Agua();
    PORTC = PORTC & 0b00000000;
    return 0;
}
```

Figura 4.3.1: Subrutina principal.

Con ese programa se comprobó el estado de los pines y el cumplimiento de todas las etapas del método de tinción. Para ello, primero se muestra el estado del pulsador de inicio (PC4). En la figura 4.3.2 se muestra que mientras este no es presionado, el programa está en espera. Por el contrario, en la figura 4.3.3 se muestra que al presionar el mismo, el programa continúa a la siguiente instrucción.

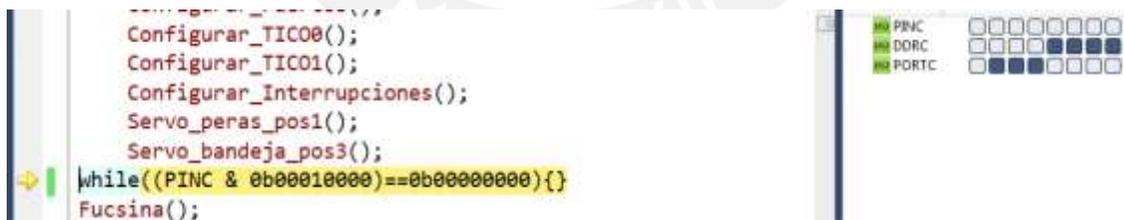


Figura 4.3.2: Pulsador de inicio (PINC 4) sin presionar.

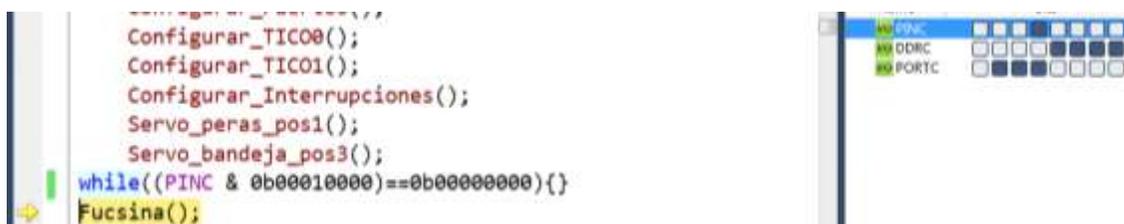
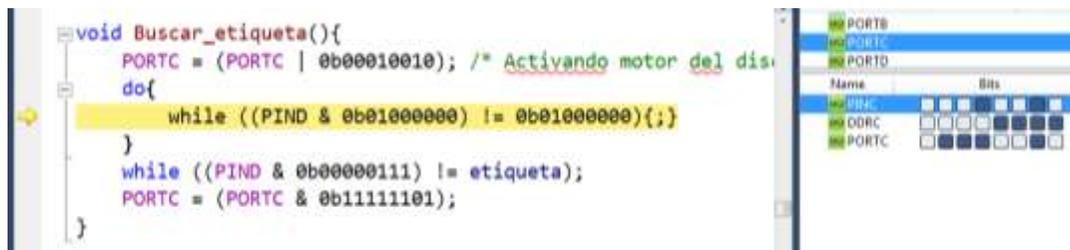


Figura 4.3.3: Pulsador de inicio (PINC 4) presionado.

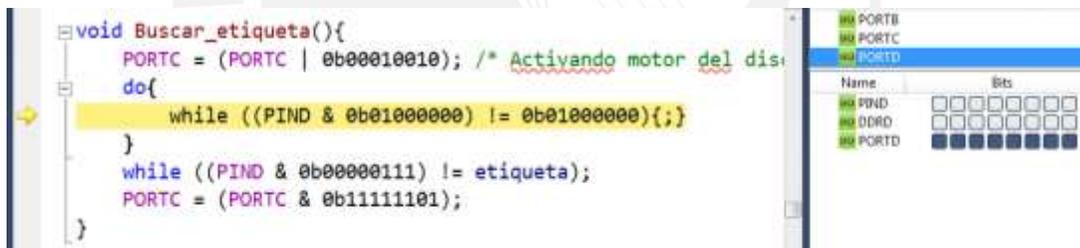
Posteriormente, se comprobó que al entrar a la subrutina de cada reactivo, lo primero que se realiza es identificar que sea el reactivo correcto. Para ello, se simuló la subrutina buscar_etiqueta. En la figura 4.3.4 se observa que primero se activa el motor de la rueda dentada (PC1). Luego, en la figura 4.3.5 se observa que mientras el sensor de presencia (PD6) no indique que detectó una pera de decantación el programa está en espera. Asimismo, en la figura 4.3.6 se muestra que al recibir esta señal el programa continúa con la verificación del reactivo. Finalmente, en la figura 4.3.7 se demuestra que al detectar el reactivo correcto se desactiva el motor de la rueda dentada (PC1).



```
void Buscar_etiqueta(){
    PORTC = (PORTC | 0b00010010); /* Activando motor del dis
do{
    while ((PIND & 0b01000000) != 0b01000000){;}
}
while ((PIND & 0b00000111) != etiqueta);
PORTC = (PORTC & 0b11111101);
}
```

Name	Bits
PORTB	
PORTC	
PORTD	
PINC	
DDRC	
PORTC	

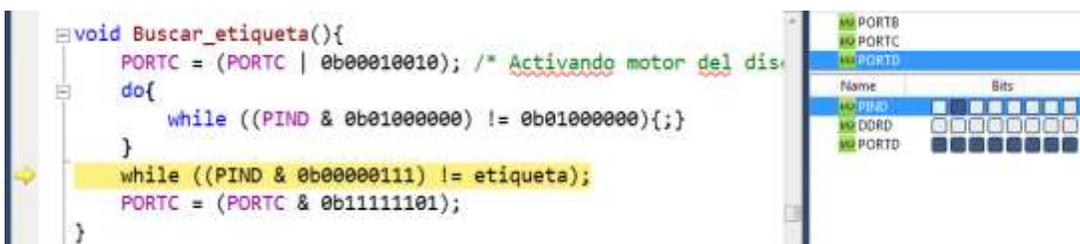
Figura 4.3.4: Habilitador de motor de rueda dentada (PINC 1) activo.



```
void Buscar_etiqueta(){
    PORTC = (PORTC | 0b00010010); /* Activando motor del dis
do{
    while ((PIND & 0b01000000) != 0b01000000){;}
}
while ((PIND & 0b00000111) != etiqueta);
PORTC = (PORTC & 0b11111101);
}
```

Name	Bits
PORTB	
PORTC	
PORTD	
PIND	
DDRD	
PORTD	

Figura 4.3.5: Esperando detección de sensor de presencia (PIND 6).



```
void Buscar_etiqueta(){
    PORTC = (PORTC | 0b00010010); /* Activando motor del dis
do{
    while ((PIND & 0b01000000) != 0b01000000){;}
}
while ((PIND & 0b00000111) != etiqueta);
PORTC = (PORTC & 0b11111101);
}
```

Name	Bits
PORTB	
PORTC	
PORTD	
PIND	
DDRD	
PORTD	

Figura 4.3.6: Sensor de presencia (PIND 6) detectó pera de decantación.



Figura 4.3.7: Desactivación del habilitador del motor de rueda dentada (PINC 1).

Luego se comprobó con cada reactivo, que solo continúe con la subrutina si es que el código es correcto. Para ello, se determinó un código de 3 bits para cada reactivo y se demostró que si los sensores MOC70t3 conectados en PD2, PD1 y PD0 no representan el código del reactivo, el programa no realiza la siguiente tarea. En la tabla 4.3.1 se muestra el código asignado y las figuras que comprueban el correcto funcionamiento para cada reactivo.

Tabla 4.3.1: Código asignado a cada reactivo.

Etapa	Código			Figuras	
	PD2	PD1	PD0	Código erróneo	Código correcto
Fucsina	0	0	0	3.4.8	3.4.9
Agua	0	0	1	3.4.10	3.4.11
Alcohol ácido	0	1	0	3.4.12	3.4.13
Azul de Metileno	0	1	1	3.4.14	3.4.15
Campana	1	0	0	3.4.16	3.4.17

Fuente: Elaboración propia.

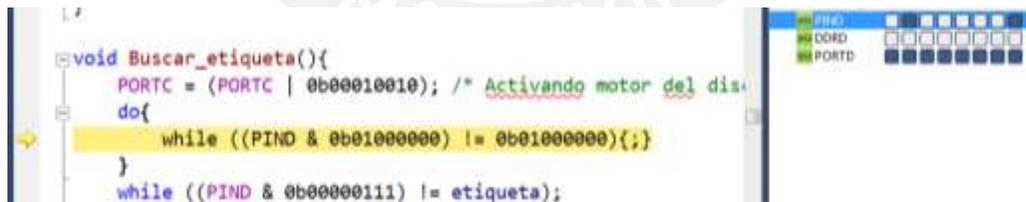


Figura 4.3.8: Código erróneo para Fucsina.

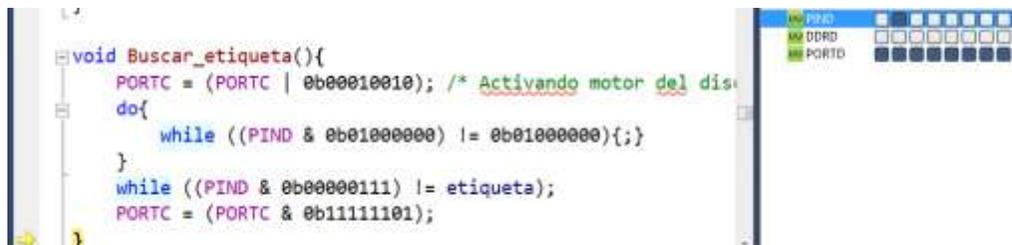


Figura 4.3.9: Código correcto para Fucsina.



Figura 4.3.16: Código erróneo para canalizador de vapores.



Figura 4.3.17: Código correcto para canalizador de vapores.

Por otro lado, también se comprobó que al finalizar todas las etapas de la tinción, el programa desactive los motores (PC1 y PC3) el pulsador de inicio (PC4) para volver a esperar que este se presione (figura 4.3.18).



Figura 4.3.18: Desactivación de motores y pulsador de inicio para volver iniciar el método.

Finalmente, se comprobó la exactitud en la temporización, tanto de cada etapa como del dispensado. Para ello, se apuntaron los valores del stop watch al inicio y al final de cada temporización. Los resultados se muestran en la tabla 4.3.2. Cabe señalar que el tiempo de paso del timer se fijó en 0.1s, por lo cual el tiempo a temporizar en segundos debe multiplicarse por 10. Esto se determina con la fórmula que se muestra a continuación, donde N es el valor colocado en el preescalador.

$$f_{paso} = \frac{f_{clk}}{N(1 + OCR0A)} = \frac{1 \text{ MHz}}{1024 \times (1 + 97)} = 9.96 \text{ Hz}$$

$$t_{paso} = \frac{1}{f_{paso}} = \frac{1}{9.96 \text{ Hz}} = 0.1 \text{ s}$$

Tabla 4.3.2: Resultados de temporización.

Tiempo a temporizar (S)	Stop Watch Inicial (uS)	Stop Watch Final (uS)	Tiempo medido (S)	% Error
0.500	579.000	502259.000	0.502	0.336%
0.500	502278.000	1004022.000	0.502	0.349%
0.500	2968582.000	3469810.000	0.501	0.246%
45.000	11625987.000	56784365.000	45.158	0.352%
45.000	2007553.000	47165931.000	45.158	0.352%
120.000	4975110.000	125397487.000	120.422	0.352%
120.000	491.000	120422898.000	120.422	0.352%

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar, el error de temporización en todos los casos es menor a 0.4%, lo que nos demuestra que el microcontrolador temporiza con gran exactitud.

CONCLUSIONES

1. Se logró temporizar las diferentes etapas del método de tinción de Ziehl Neelsen con un error común de 0.352%. Esto se consiguió gracias al uso de un microcontrolador que trabaja en el orden de los MHz.
2. De igual manera que el objetivo anterior, gracias al microcontrolador se logró temporizar la apertura y cierre de los dispensadores, fijada en 0.5s, con un error máxima de 0.35%, mucho menor al 2% planteado en los objetivos.
3. Se consiguió que la detención de los motores sea en la posición exacta y con un error de 0.4312mm, menor a los 5mm planteados. Esto se logró mediante sensores de presencia (MOC70t3) de respuesta rápida y mediante la selección de motores adecuados.
4. El uso de tres sensores MOC70t3, con el cual se puede obtener a la salida '0' o '1', permitió identificar cada reactivo con un código de 3 bits. Asimismo, como se observó en las simulaciones, la etapa correspondiente a cada reactivo solo se realiza si se identifica el código correcto.
5. Al fijar la velocidad mínima del motor en 5348rpm, y seleccionar un motor que supera ampliamente esa velocidad (10300rpm), se consigue que el mechero se retire en un tiempo menor a los 2s. Con ello se evita que la fucsina se evapore.
6. Se logró diseñar el primer prototipo de un equipo que realice el método de tinción de muestras de esputo de Ziehl Neelsen de manera automática y bajo los estándares recomendados por la OMS y la INS. Con ello se estandariza el método de tinción.

RECOMENDACIONES

1. El prototipo diseñado sólo permite la tinción de una muestra a la vez, lo cual representa una desventaja frente a la tinción realizada por el laboratorista. Por tal motivo, se sugiere realizar las modificaciones necesarias que permitan la tinción de varias muestras en simultáneo.
2. Para completar la automatización de todo el método de tinción de Ziehl Neelsen hace falta el encendido y apagado automático del mechero. En ese sentido, se sugiere evaluar la factibilidad de realizar ello o, en todo caso, evaluar otras alternativas para el calentamiento de la muestra (ejemplo: resistencia calefactora).
3. Si bien las peras de decantación representan la mejor opción dentro de los dispensadores mostrados, éstos son de un material frágil (vidrio o pyrex). Es por ello que se sugiere considerar otras alternativas de dispensadores que no sean de un material frágil.
4. En caso de que el tiempo de respuesta del sensor de humedad escogido sea crítico y no permita una detección de los vapores a tiempo, se plantea evaluar la posibilidad de temporizar la etapa del calentamiento, con lo cual se evitaría también la dependencia y necesidad de adaptación a la humedad relativa. Para ello habría que realizar ciertos estudios que permitan estimar el tiempo adecuado.
5. Para temporizar el dispensado de los reactivos se sugiere estimar la cantidad necesaria del mismo para cubrir una lámina portaobjetos, y en base a ello, cuánto tiempo tiene que permanecer abierta la llave de la pera de decantación. Con ello se reduciría o evitaría el desperdicio de los reactivos.
6. Evaluar el uso de fuentes conmutadas por ser más eficientes y más ligeras que las fuentes lineales utilizadas.

BIBLIOGRAFÍA

ATMEL CORPORATION

2013 "Atmel AVR042: AVR Hardware design considerations".
Application note. EE.UU.

CHAPMAN J., Stephen

2000 "Máquinas Eléctricas". Editorial McGrawHill. 3ra edición. México.

CLÍNICA DE TUBERCULOSIS - HOSPITAL GENERAL DE MÉXICO OD.

2010 Tuberculosis: Nuevos métodos de diagnóstico [en línea]. [Consultado
2013/05/2]
<[http://www.hospitalgeneral.salud.gob.mx/descargas/pdf/area_medica/n
eumo/confe_04.pdf](http://www.hospitalgeneral.salud.gob.mx/descargas/pdf/area_medica/n
eumo/confe_04.pdf)>

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD

1995 Manual de normas y procedimientos en bacteriología de Tuberculosis
[en línea]. Serie de normas técnica. Lima. Mayo 1995. [Consultado
2013/04/8]
<http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/salud_publica/nor_tec/10.pdf>

MARTÍN M., Manuel

1999 Apéndice B de Tesis: "Datos de Materiales" [en línea]. [Consultado
2013/11/28].
< <http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/ambiente/antesol/TESIS/B-Mater.pdf>>

MENDOZA-TICONA, Alberto

2012 Tuberculosis como enfermedad ocupacional [en línea]. Revista peruana
de medicina experimental y salud pública. Lima. 2012. [consultado
2013/04/28]. 232-236
<<http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v29n2/a11v29n2.pdf> >

MINISTERIO DE SALUD (MINSA)

2008 Control de infección tuberculosa en trabajadores de salud [en línea].
[consultado 2013/04/28].

<<ftp://ftp2.minsa.gob.pe/descargas/dgsp/ESN-tuberculosis/Informes/InfEjCtrlInfTBEESS.pdf>>

MURRAY, Patrick; ROSENTHAL, Ken y PFAÜER Michael.

2007 Microbiología médica [en línea]. Editorial Elsevier. Madrid, España.
2007. [Consultado 2013/05/2]

<<http://el.trc.gov.om:4000/htmlroot/MEDICAL/tcolon/microbiology/GeneraI/E-Books/Microbiologia%20Medica.pdf>>

ON SEMICONDUCTOR

2002 “Linear & Switching Voltage Regulator Handbook”. [en línea]. Colorado,
USA, 2002. [Consultado 2013/11/28]

<http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/HB206-D.PDF>

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

2008 Manual para el diagnóstico bacteriológico de la Tuberculosis: Parte I:
Baciloscopía [en línea]. Normas y guía técnica. 2008. [Consultado
2013/04/8]

<<http://files.sld.cu/tuberculosis/files/2009/12/tb-labs-baciloscopía1.pdf>>

PECHO SILVA, Manuel

2012 Situación de la tuberculosis en Lima y Callao: retos actuales.
[Presentación de Power Point]. I Foro Metropolitano: Tuberculosis: retos
y desafíos desde la ciudadanía. Lima. 2012.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA.

2013 Diccionario de la lengua española [en línea]. [Consultado 2013/05/9].

<<http://www.rae.es/rae.html>>

SERWAY, Raymond

2008 "Física para ciencias e ingeniería". Editorial Cengage Learning. Séptima edición. México.

SHADE, O. H.

1943 "Analysis of Rectifier Operation". Proceedings of the IRE. Vol.31, no.7, pp. 341 – 361. IEEEXplore. Digital Library [en línea]. [Consultado 2013/11/28].

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1694774&isnumber=35697&tag=1>>

VELASCO, Judith y OTROS.

2008 Manual Práctico de bacteriología clínica [en línea]. [Consultado 2013/05/2]. Colección de textos universitarios. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 2008.

<<http://www.serbi.ula.ve/serbiula/librose/pva/Libros%20de%20PVA%20para%20libro%20digital/Manual%20de%20Bacteriologia.pdf>>

WALTERS, Kent y WERNER, Bob

1997 MicroNotes: "Introduction to Schottky Rectifiers". Microsemi Corporate Applications. Series 401.