

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE TINCIÓN DE
CUATRO MUESTRAS DE ESPUTO EN SIMULTÁNEO
PARA EL DIAGNÓSTICO DE TUBERCULOSIS**

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

Brian Nicolas Medina Leandro

ASESOR: Mg. Willy Carrera Soria

Lima, diciembre del 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, a mis padres, a mis hermanos, a mis familiares, a mis amigos y profesores. Gracias a cada uno de ustedes por estar conmigo, por darme un motivo para terminar esta larga carrera, la cual no ha sido nada fácil, pero gracias a ustedes nunca me di por vencido, pude retomar ese duro camino una y otra vez, las veces que fueran necesarias, para poder llegar a la meta.

RESUMEN

La tuberculosis es una enfermedad infectocontagiosa con gran índice de morbilidad y mortalidad a nivel mundial donde más del 95% de las muertes registradas a causa de esta enfermedad ocurren en países en vías de desarrollo.

En el Perú, el diagnóstico de TBC se realiza a través de la baciloscopía de una muestra de esputo sometida a la tinción Ziehl Neelsen. Este método es realizado de manera manual por expertos técnicos de laboratorio quienes inevitablemente realizan un diagnóstico con amplia variabilidad; debido a esto, la automatización de diagnósticos médicos se presenta como una solución que permite corregir los errores presentes en la intervención humana.

La Sección de Electricidad y Electrónica de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado dos sistemas de preparación automático de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC (PAME) a fin de estandarizar el proceso de tinción ZN. El primero de estos realiza la tinción de una sola muestra por proceso; así mismo, el segundo sistema realiza la preparación de siete muestras en simultáneo, lo cual implica que este sea voluminoso y pesado para formar parte de un equipo portátil de diagnóstico de TBC requerido en los centros de salud del país.

Debido a esto, esta tesis realiza el diseño de un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo para el diagnóstico de TBC, el cual solucionará los inconvenientes presentes en los sistemas PAME's, para formar parte de un sistema completo de diagnóstico de TBC que involucra el conteo de bacilos a través de un microscopio automatizado.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE TINCIÓN DE CUATRO MUESTRAS DE ESPUTO EN SIMULTÁNEO PARA EL DIAGNÓSTICO DE TUBERCULOSIS.

Área : Circuitos y Sistemas Electrónicos # 1321

Asesor : Willy Carrera Soria

Alumno : Brian Nicolas Medina Leandro

Código : 20111694

Fecha : 11/06/16

Descripción y Objetivos

Según la OMS, su "Estrategia Fin a la TBC" tiene como objetivo poner fin a la epidemia mundial de tuberculosis reduciendo el número de muertes en un 95% y la tasa de incidencia en un 90% entre 2015 y 2035. Pide a los gobiernos, las comunidades, la sociedad civil y el sector privado que actúen "Unidos para poner fin a la tuberculosis"; la falta de capacidad de diagnóstico ha sido un obstáculo crucial para dar una respuesta eficaz a los problemas de la tuberculosis asociada al VIH y la tuberculosis farmacorresistente. Por consiguiente, la ampliación de la capacidad para diagnosticar la tuberculosis y la tuberculosis polifarmacorresistente es una prioridad mundial para el control de esta infección.

Esta tesis forma parte de un equipo de diagnóstico de la TBC, y tiene como objetivo general diseñar un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo para el diagnóstico de TBC.

Como Objetivos Específicos se tienen:

- Diseñar e implementar la mecánica del prototipo funcional.
- Diseñar el hardware electrónico del sistema.
- Diseñar el software electrónico del sistema.
- Realizar pruebas optimizando los tiempos de los procesos involucrados en la tinción ZN sin afectar la confiabilidad de este.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA


Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA


M. Sc. Ing. MIGUEL ÁNGEL CATANO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica





TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE TINCIÓN DE CUATRO MUESTRAS DE ESPUTO EN SIMULTÁNEO PARA EL DIAGNÓSTICO DE TUBERCULOSIS.

Índice

Introducción

1. Realidad sobre la tuberculosis en el Perú y el mundo
2. Problemas presentes en el sistema Preparador Automático de Muestras de Espudo para el diagnóstico de TBC (PAME)
3. Diseño del sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo
4. Simulaciones y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

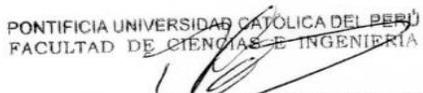
Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA


Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA


M. Sc. Ing. MIGUEL ÁNGEL CATANO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	2
Realidad sobre la tuberculosis en el Perú y el mundo.....	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Impacto de la TBC en el Perú y el mundo	2
1.3 Diagnóstico de TBC mediante la baciloscopía de muestra de esputo	4
1.4 Sistemas automáticos de diagnóstico de TBC.....	5
CAPÍTULO 2	8
Problemas presentes en el sistema Preparación Automático de Muestras de Esputo para el diagnóstico de TBC (PAME)	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Problemas presentes en el sistema PAME.....	8
2.3 Declaración del marco problemático.....	11
2.4 Objetivos	12
CAPÍTULO 3	13
Diseño de un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo	13
3.1 Introducción.....	13
3.2 Alcance	13
3.3 Diagrama de bloques	13
3.4 Definición del sistema mecánico	15
3.5 Diseño del Hardware electrónico	17
3.5.1 Sensores y acondicionadores de señal	17
3.5.1.1 Introducción.....	17
3.5.1.2 Sensor de temperatura	17
3.5.1.3 Sensor de posición	19
3.5.2 Actuadores y excitadores.....	21
3.5.2.1 Introducción.....	21
3.5.2.2 Calefactor para el calentamiento de las muestras	22
3.5.2.3 Motor para el desplazamiento de muestras.....	27
3.5.2.4 Actuador de flujo	31

3.5.3	Panel de control y Controlador	33
3.5.3.1	Introducción	33
3.5.3.2	Panel de control	34
3.5.3.3	Controlador	35
3.5.4	Fuente de alimentación	39
3.5.5	Diagrama esquemático	40
3.5.6	Diagrama de tarjeta impresa	41
3.5.6.1	Máscara de componentes.....	41
3.5.6.2	Máscara de pistas	42
3.6	Diseño del Software electrónico	43
3.6.1	Introducción	43
3.6.2	Algoritmos de control	43
3.6.3	Programa principal.....	46
3.6.4	Subrutinas	47
3.7	Costo del prototipo	53
CAPÍTULO 4	54
Simulaciones y resultados	54
4.1	Introducción	54
4.2	Ensayos del hardware y software del proceso de calentamiento	54
4.2.1	Ensayo del circuito de medición de temperatura.....	54
4.2.2	Ensayo del circuito detector de cruce por cero	55
4.2.3	Ensayo del circuito de control de ángulo de disparo.....	56
4.2.4	Ensayo del circuito de control de temperatura	57
4.3	Ensayos del hardware y software del proceso de desplazamiento	58
4.3.1	Ensayo del circuito de control de motor a pasos.....	58
4.4	Ensayos del hardware y software del proceso de dispensado de reactivos.....	59
4.4.1	Ensayo del circuito de control de flujo	59
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	(Ver CD adjunto)	

INTRODUCCIÓN

La tuberculosis (TBC) es una enfermedad infecciosa con gran índice de morbilidad y mortalidad a nivel mundial. En 2014, 9.6 millones de personas contrajeron la enfermedad y se registraron 1.5 millones de muertes; además, más del 95% de las muertes a causa de esta enfermedad ocurrieron en países en vías de desarrollo como el Perú [1]. Esta problemática surge a partir de diagnósticos no estandarizados que presentan amplia variabilidad debido a que son realizados de manera manual por técnicos de laboratorio quienes pueden llegar a ejecutar hasta 70 diagnósticos por día y se encuentran expuestos a un posible riesgo de contagio al estar en contacto permanente con las muestras.

En el Perú, el diagnóstico de TBC se realiza a través de la baciloscopía de muestra de esputo, el cual es recomendado por la Organización Mundial de Salud (OMS) y el Instituto Nacional de Salud (INS). Este método es realizado por técnicos de laboratorio debidamente capacitados quienes examinan a través de un microscopio una muestra de esputo sometida a la tinción Ziehl Neelsen (ZN) para ver si esta contiene bacilos de Koch [2]. La TBC es curable siempre y cuando se detecte el virus en su etapa inicial; además, se puede prevenir el riesgo de contagio al realizar un diagnóstico estandarizado, rápido y confiable. La automatización de diagnósticos médicos se presenta como una solución que permite estandarizar y disminuir la variabilidad de estos procesos ya que este corrige las imperfecciones realizadas de manera inevitable debido a la intervención humana.

En esta tesis se desarrollará el diseño de un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo a través del método de tinción ZN a fin de agilizar, estandarizar e incrementar la confiabilidad del proceso de preparación de muestras de esputo y evitar el posible contagio por parte de los técnicos de laboratorio.

CAPÍTULO 1

Realidad sobre la tuberculosis en el Perú y el mundo

1.1 Introducción

En este primer capítulo se presenta el impacto de la tuberculosis en el Perú y el mundo. Además, se da a conocer el proceso de preparación de muestras de esputo a través del método de tinción ZN, el cual se lleva a cabo en los centros de salud del país. Finalmente, se mencionan los principales sistemas automáticos de diagnóstico de TBC desarrollados por diversos centros de investigación científica a nivel nacional e internacional.

1.2 Impacto de la TBC en el Perú y el mundo

La tuberculosis es una enfermedad infectocontagiosa causada por la bacteria *Mycobacterium Tuberculosis*, la cual se puede contraer al estar expuesto a un ambiente infectado con esta bacteria. Esta enfermedad es la segunda causa de mortalidad a nivel mundial, después del VIH [1]. A continuación, la figura 1.2.1 muestra la tasa de incidencia (donde la curva roja indica solo TBC y la curva verde TBC + VIH), prevalencia y mortalidad por cada 100,000 habitantes registradas en el año 2015 a nivel mundial [3].

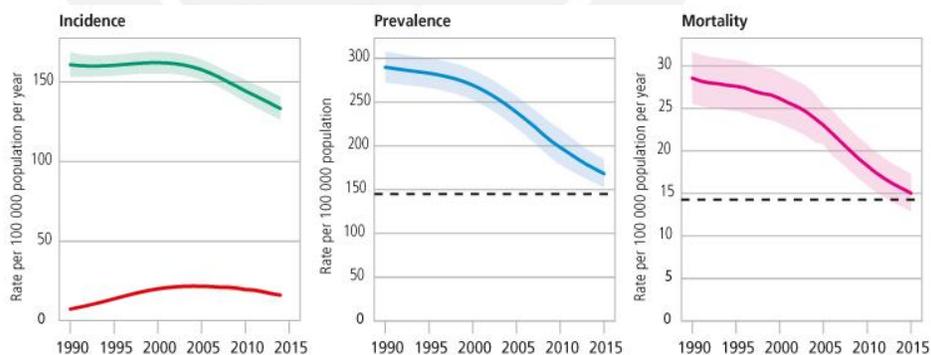


Fig. 1.2.1: Tasa de incidencia, prevalencia y mortalidad en el 2015 a nivel mundial [3].

En 2013, en nuestro país se registró una tasa de mortalidad de 3.8 y una tasa de morbilidad de 101.9 por cada 100 mil habitantes. A continuación, la figura 1.2.2 muestra las tasas de mortalidad y morbilidad registradas desde el año 1990 al 2013 [4].

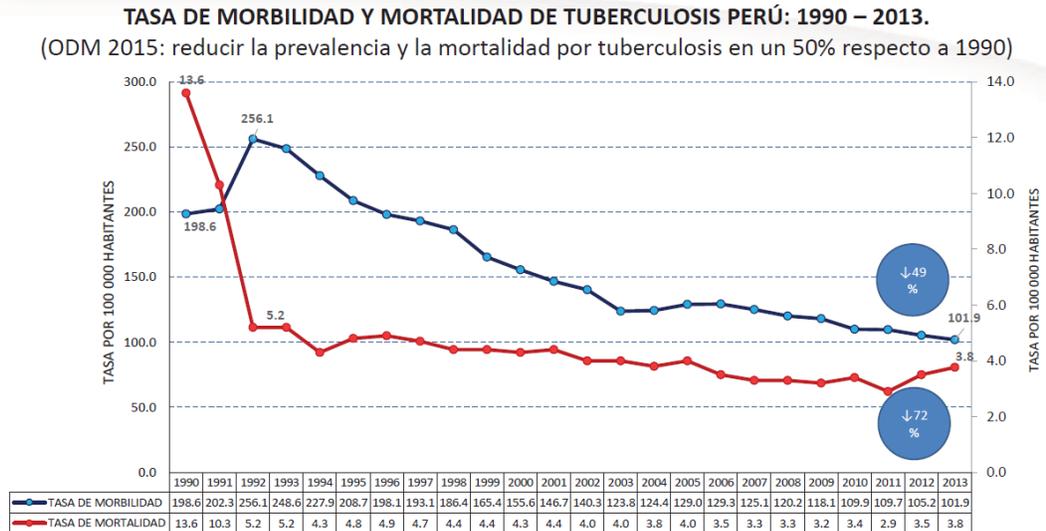


Fig. 1.2.2: Tasa de morbilidad y mortalidad de TBC en el Perú (1990 - 2013) [4].

Así mismo, se registró que el 57% de las 31,052 personas infectadas con TBC se dieron a cabo en las regiones de Lima y Callao. La figura 1.2.3 muestra la proporción de casos de TBC por regiones del Perú (2013) [4].

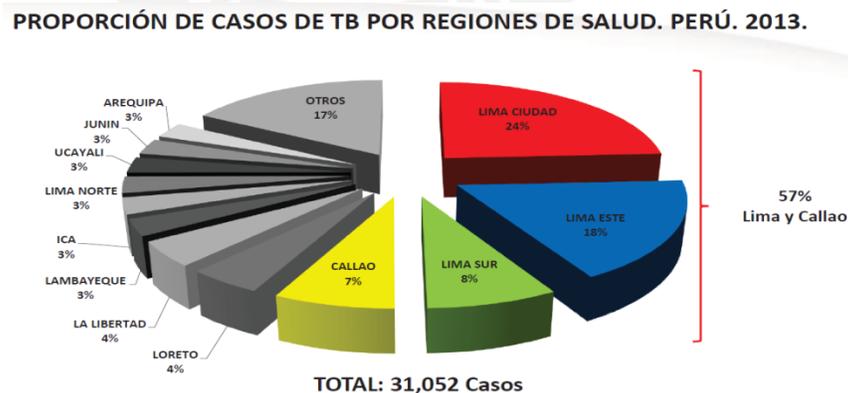


Fig. 1.2.3: Proporción de casos de TBC por regiones del Perú (2013) [4].

1.3 Diagnóstico de TBC mediante la baciloscopía de muestra de esputo

En el Perú, el diagnóstico de TBC se realiza mediante la baciloscopía de una muestra de esputo, el cual es una técnica recomendada por la Organización Mundial de Salud (OMS) y el Instituto Nacional de Salud (INS) [7]. Esta técnica considera la característica fundamental de la bacteria *Mycobacterium Tuberculosis* la cual se encuentra rodeada de una membrana resistente al alcohol ácido; además, esta bacteria presenta una forma peculiar de bastoncillo; la figura 1.3.1 muestra la muestra de esputo teñida donde se observan las bacterias tuberculosas de color fucsia y un fondo azul para mejorar el contraste [6].

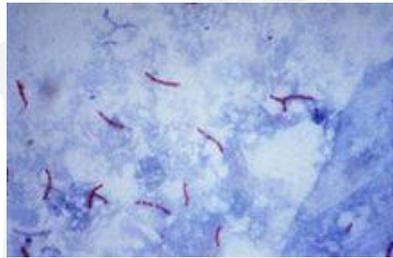


Fig. 1.3.1: Muestra de esputo sometida a tinción ZN [6].

La baciloscopía está conformada por tres procesos principales; en primer lugar, se extiende la muestra sobre un porta-objetos. Seguidamente, se realiza la tinción de bacilos ácido-alcohol resistentes (BAAR), el cual puede ser por fluorescencia (Auramina-Rodamina) o el ZN (fucsina fenicada, azul metileno, alcohol ácido y agua). Finalmente, se examina la muestra teñida a través de un microscopio, donde se realiza el conteo de bacilos presentes en la muestra. La tinción por fluorescencia ha demostrado mejores resultados de sensibilidad y especificidad con respecto al método de tinción ZN; sin embargo, los países en vías de desarrollo continúan optando por la tinción ZN debido al elevado costo que implica adquirir un microscopio de fluorescencia con respecto al microscopio de campo claro convencional requerido en la tinción ZN [6].

A continuación, se muestra el proceso de tinción de muestras de esputo a través del método de tinción ZN realizado por los técnicos de laboratorio en los centros de salud del país.

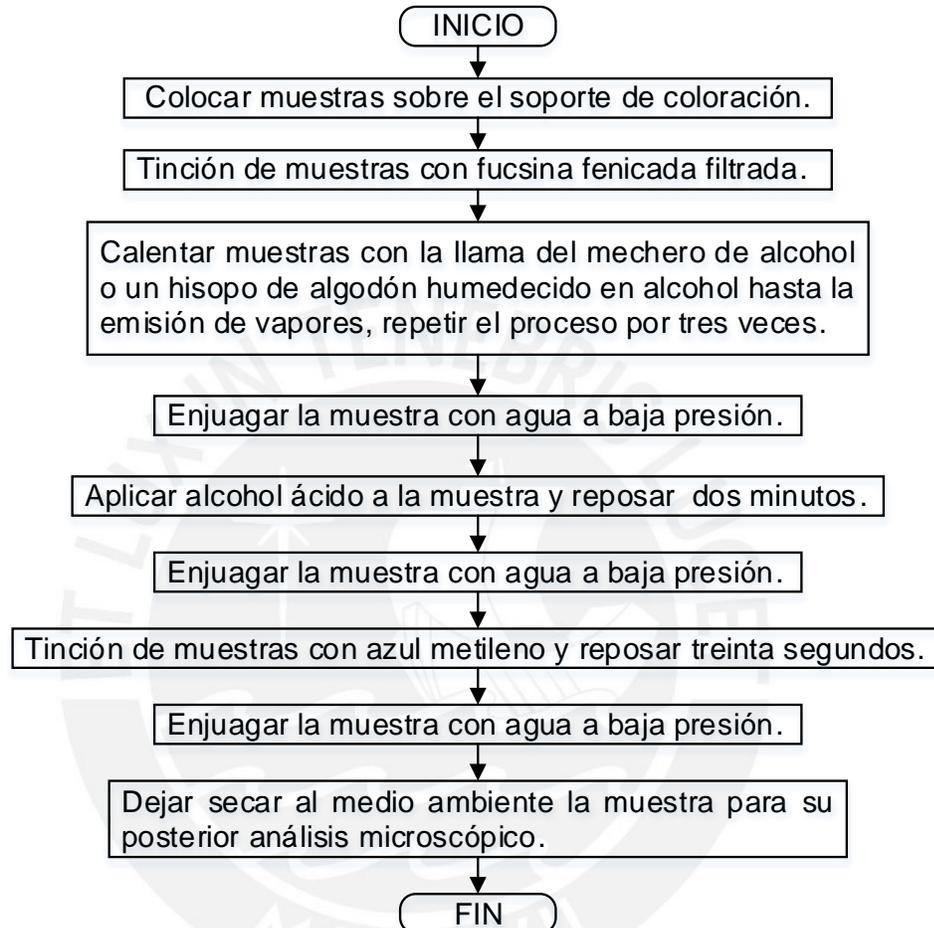


Fig. 1.3.2: Diagrama de flujo del proceso de tinción ZN de muestras de esputo.

1.4 Sistemas automáticos de diagnóstico de TBC

En la actualidad, diversos centros de investigación científica han desarrollado equipos tecnológicos que permitan automatizar el diagnóstico de TBC. Estos equipos médicos desarrollados corrigen las imperfecciones realizadas por los laboratoristas de manera inevitable.

En primer lugar, el dispositivo Xpert MTB/RIF (Ver Fig. 1.4.1) automatiza el diagnóstico de TBC mediante la técnica de amplificación del ácido nucleico, lo cual es apropiado para los países donde esta enfermedad es endémica.

Este método purifica, concentra, amplifica (mediante una prueba de reacción en cadena de polimerasa) e identifica secuencias de ácido nucleico específicas del genoma de tuberculosis; los resultados se obtienen a partir de muestras de esputo sin procesar en menos de 2 horas, con empleo de tiempo mínimo por parte de personal técnico. A diferencia del tradicional examen microscópico de frotis de esputo, esta prueba se puede realizar fuera de los laboratorios convencionales y no requiere de capacitación especial [8].



Fig. 1.4.1: Xpert MTB/RIF [8].

En el Perú, la Sección de Electricidad y Electrónica de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado dos sistemas de preparación automáticos de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC (PAMEs). Estos sistemas realizan una tinción ZN estandarizada y evita el posible contagio del laboratorista; sin embargo, estos sistemas presentan ciertas características que no permiten que pueda llegar a reemplazar el método convencional de preparación de muestras. El primero de estos (Ver Fig. 1.4.2) solo realiza la tinción de una sola muestra por proceso [5]; así mismo, el segundo sistema (Ver Fig. 1.4.3) presenta un gran volumen y peso lo cual no permite que este forme parte de un sistema portátil de diagnóstico de TBC [12].



Fig. 1.4.2: Preparador automático de muestras de esputo (PAME) [5].



Fig. 1.4.3: Preparador automático de siete muestras de esputo (PAME) [12].

CAPÍTULO 2

Problemas presentes en el sistema Preparación Automático de Muestras de Esputo para el diagnóstico de TBC (PAME)

2.1 Introducción

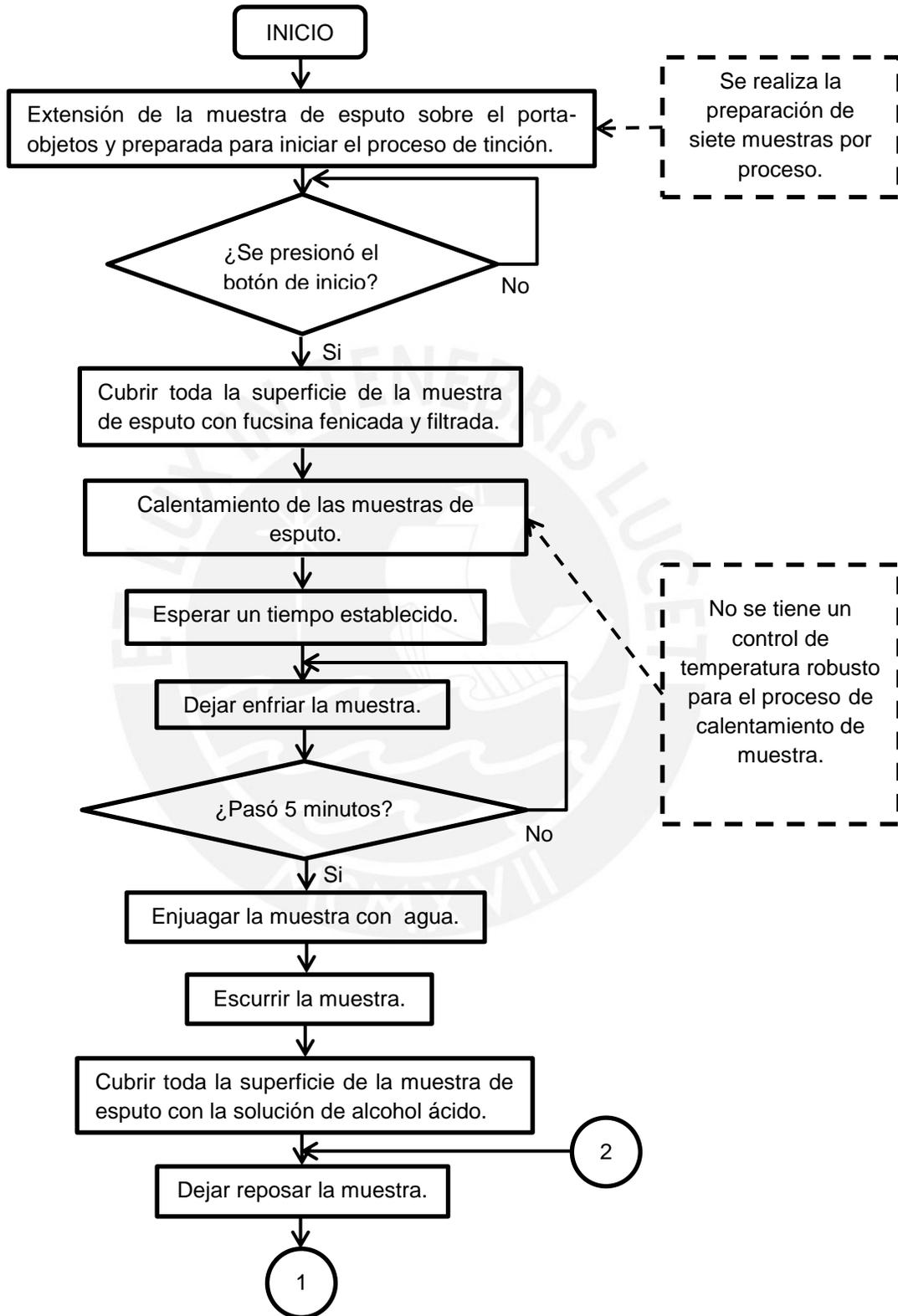
En este segundo capítulo se dan a conocer los problemas presentes en los sistemas de preparación automático de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC (PAME) desarrollados por la PUCP. Seguidamente, se declara el marco problemático del tema de estudio y; por último, se establecen los objetivos de esta Tesis.

2.2 Problemas presentes en el sistema PAME

La Sección de Electricidad y Electrónica de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado dos sistemas de preparación automáticos de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC (PAME) con la finalidad de estandarizar el proceso de tinción ZN y disminuir el riesgo de contagio de los laboratoristas. El primer sistema PAME de una sola muestra ha permitido verificar que sí es posible automatizar el proceso de tinción ZN; sin embargo, solo realiza la tinción de una sola muestra por proceso, lo cual implica demasiado tiempo para cumplir con la tinción de las setenta muestras por día que se requieren. Debido a esto, se desarrolló el sistema PAME de siete muestras de esputo en simultáneo, el cual incrementa la cantidad de muestra teñidas por proceso; sin embargo, este sistema presentan ciertos problemas que no permiten que pueda formar parte de un sistema portátil de diagnóstico de TBC.

A continuación, la figura 2.2 muestra el diagrama de flujo del proceso de preparación de muestras; además, los recuadros punteados ubicados en la parte derecha del esquema indican los inconvenientes que presenta el sistema.

Proceso de tinción de muestras de esputo.



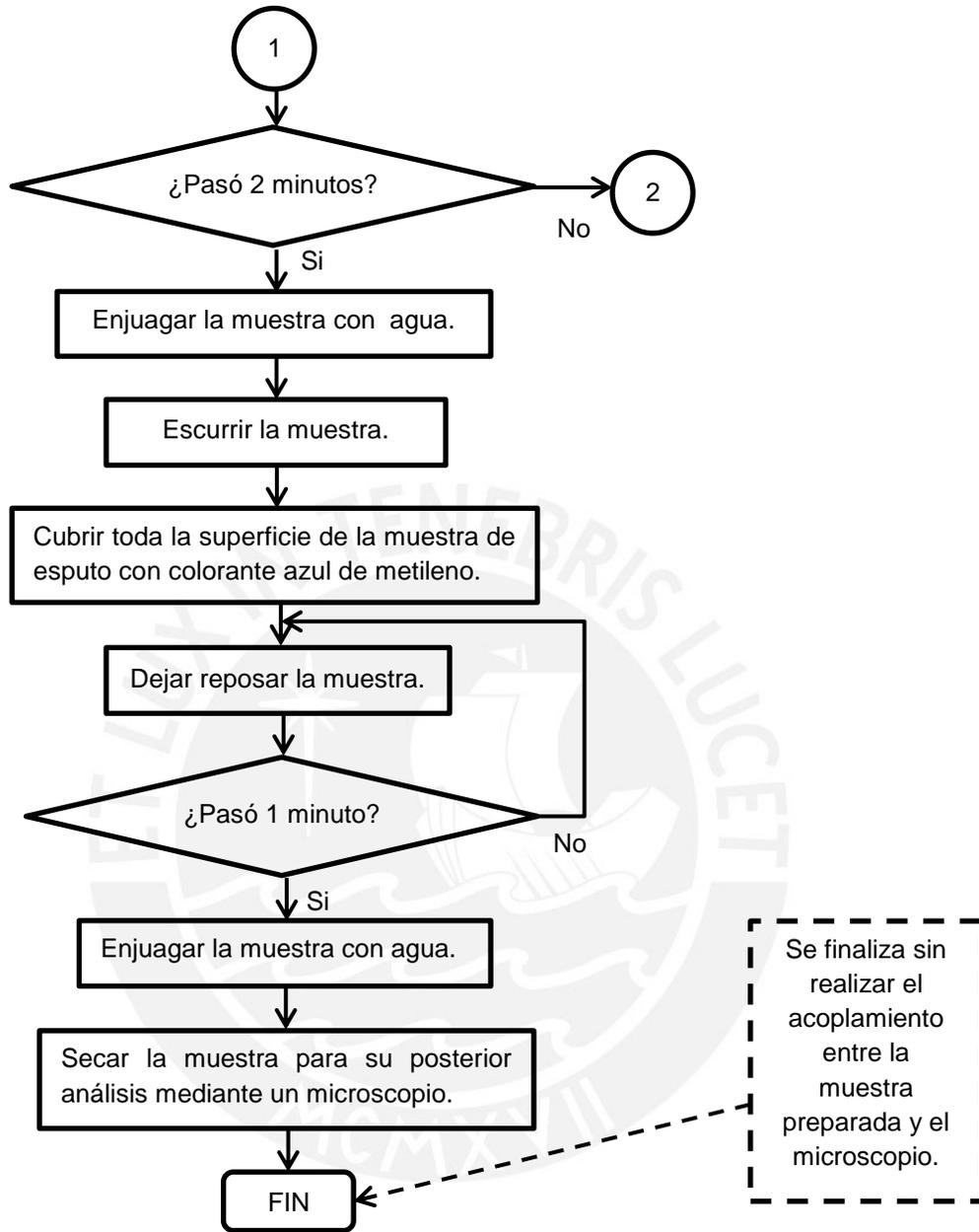


Fig. 2.2: Proceso de tinción de muestras del sistema PAME y sus inconvenientes [5].

A continuación, la tabla 2.2 identifica los principales problemas de los sistemas PAME; además, se detallan las causas y características de cada uno de estas.

Tabla 2.2: Problemas - causas y características del sistema PAME.

Problemas	Causas y características
Se realiza la preparación de siete muestras por proceso	El sistema es demasiado pesado y voluminoso para formar parte de un sistema portátil de diagnóstico de TBC.
Se requiere de un control robusto de temperatura.	El control de temperatura se realiza a través de un control ON/OFF lo cual no permite tener una gran precisión para seguir la temperatura deseada.
Se realiza la extracción manual de muestra para el análisis microscópico.	El sistema prepara la muestra mediante el método de tinción ZN; sin embargo, esta debe ser examinada a través de un microscopio para brindar el diagnóstico.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Declaración del marco problemático

El proceso de preparación de muestras de esputo se realiza manualmente por técnicos de laboratorio con gran experiencia quienes ejecutan un trabajo agotador e inevitablemente se obtiene una tinción no estandarizada que puede generar tanto falsos positivos como falsos negativos; además, se genera un posible riesgo de contagio por parte del técnico de laboratorio al manipular la muestra. Razón por la cual, se desarrolló un sistema de preparación automático de siete muestras de esputo en simultáneo; sin embargo, si bien es cierto que realiza la tinción de siete muestras por proceso, esto implica que el sistema sea demasiado pesado y voluminoso para formar parte de un sistema portátil de diagnóstico de TBC; así mismo, este sistema no cuenta con un control robusto de temperatura lo cual podría afectar la confiabilidad de la tinción al no llegar a simular correctamente el

calentamiento de muestras a través de un mechero; por último, este sistema aún no permite el acoplamiento de las muestras con el microscopio, este inconveniente no se contemplará en esta tesis ya que la solución requiere de un diseño mecánico de mayor complejidad.

2.4 Objetivos

Objetivo General:

Diseñar un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo para el diagnóstico de TBC.

Objetivos Específicos:

- Definir los requerimientos del sistema mecánico del prototipo funcional.
- Diseñar el hardware electrónico del sistema.
- Diseñar el software electrónico del sistema.
- Realizar pruebas optimizando los tiempos de los procesos involucrados en la tinción ZN sin afectar la confiabilidad de este.

CAPÍTULO 3

Diseño de un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo

3.1 Introducción

En este capítulo se dará a conocer el alcance de la Tesis, el diagrama de bloques del sistema. Así mismo, se realizará el diseño mecánico y electrónico del sistema, donde se establecen los requerimientos, alternativas, selección y el diseño propuesto para cada uno de estos.

3.2 Alcance

Definir los requerimientos del sistema mecánico, diseñar el sistema electrónico y definir el número de muestras del prototipo funcional portátil que permitirá automatizar el proceso de tinción ZN. Este sistema corregirá los inconvenientes presentes en los sistemas PAME's tales como disminuir el consumo de potencia eléctrica, incrementar la tinción a cuatro muestras por proceso, mejorar su portabilidad y optimizar los tiempos involucrados en el proceso sin afectar su confiabilidad. Así mismo, cabe mencionar que este proyecto forma parte de un sistema cuyo objetivo es automatizar completamente el diagnóstico de TBC.

3.3 Diagrama de bloques

Para lograr automatizar la tinción ZN de muestras de esputo se debe conocer detalladamente este proceso y los requerimientos que este involucra, los cuales se han establecido en los capítulos anteriores. Por lo tanto, se procede a realizar el diseño del sistema mecánico y electrónico de este proceso.

En primer lugar, el sistema mecánico requiere de las siguientes tres áreas específicas: inserción y análisis de muestras, tinción de muestras y calentamiento de muestras. Las muestras de esputo deben ubicarse en cada una de estas áreas siguiendo la secuencia de pasos del proceso de tinción ZN. El área de inserción y análisis de muestras debe contar con un espacio libre que permita facilitar la inserción y el análisis microscópico de

muestras. Así mismo, el área de tinción de muestra debe tomar en cuenta la estructura requerida para el dispensado de los cuatro reactivos a emplear en la tinción ZN (fucsina, alcohol ácido, azul metileno y agua). Por último, el área de calentamiento de muestras debe considerar el actuador que permita el calentamiento de estas y el sensor necesario que permitirá el control de temperatura en lazo cerrado.

Considerando estos parámetros mencionados anteriormente, se definen las 4 estructuras principales siguientes: el soporte principal del sistema (que soporta los actuadores requeridos y reactivos), una estructura para el desplazamiento de muestras, una estructura para la sujeción de las muestras y los dispensadores de reactivos. Luego de esto, se define el sistema electrónico necesario tales como los sensores, acondicionadores de señal, actuadores, excitadores, interfaz, fuente de alimentación y controlador. En la figura 3.3, se muestra el diagrama de bloque del sistema automático donde se resume cada uno de los bloques mencionados anteriormente.

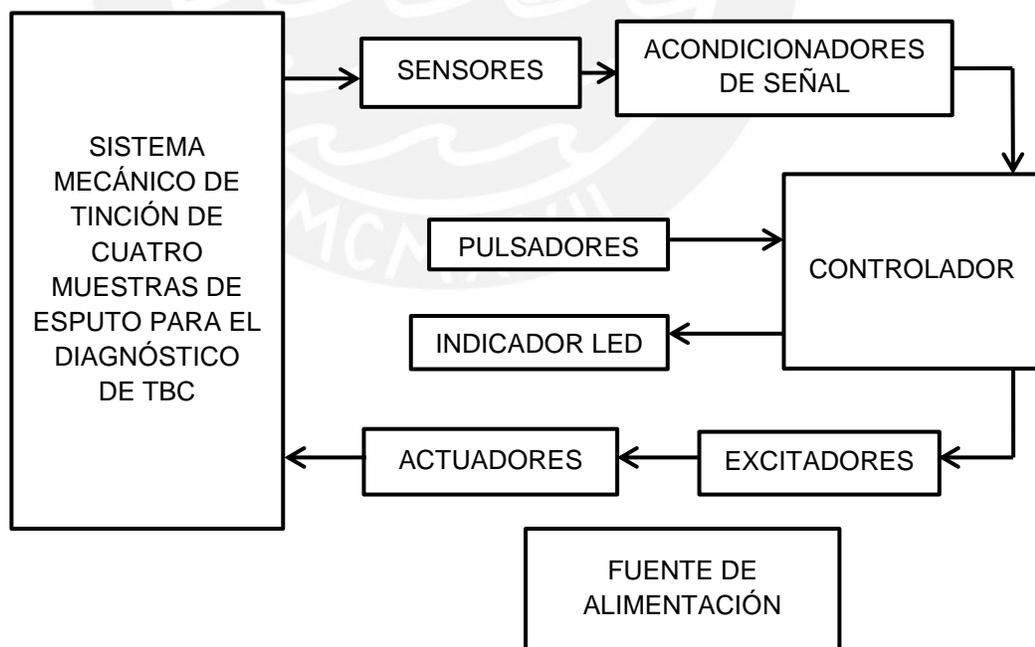


Fig. 3.3: Diagrama de bloques del sistema automático de preparación de cuatro muestras de esputo en simultáneo para el diagnóstico de TBC.

3.4 Definición del sistema mecánico

Se establece que el sistema mecánico estará conformado por las siguientes 4 estructuras principales siguientes: el soporte principal del sistema, una estructura para el desplazamiento de muestras, una estructura para la sujeción de las muestras y los dispensadores de reactivos. El soporte principal es una estructura de acero inoxidable con dimensiones de 20cmx20cmx40cm (ancho, alto y largo). El sistema presenta 3 áreas específicas: inserción de muestras y análisis de muestras, tinción de muestras y calentamiento de muestras.

En nuestro país se estima que el 60% de diagnósticos de TBC se realizan en Lima y Callao, y menos del 2% en cada una de las otras regiones. Por lo tanto, se requiere de un sistema portátil que permita cubrir la demanda de diagnósticos tanto en el interior como el exterior de la capital. Debido a esto, se requiere diseñar un sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo que pueda formar parte de un sistema automático portátil completo de diagnóstico de TBC (tinción y análisis microscópico).

A continuación, la figura 3.4 muestra el diseño del sistema mecánico del prototipo.

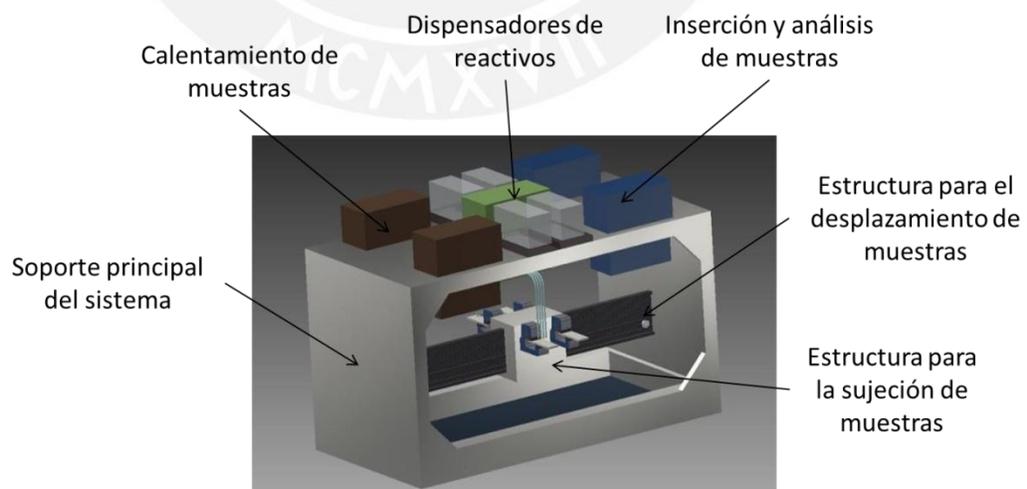


Fig. 3.4: Diseño del sistema mecánico del prototipo.

Para realizar los ensayos del sistema electrónico, se requiere la implementación de este prototipo. Este trabajo fue realizado en conjunto con diseñadores industriales que formaban parte de un grupo de desarrollo de un sistema de portátil completo de diagnóstico de TBC, tanto la implementación del sistema de tinción; así como también, el sistema de visión que permita el análisis automático de la muestra a través de un microscopio.



3.5 Diseño del Hardware electrónico

3.5.1 Sensores y acondicionadores de señal

3.5.1.1 Introducción

El sistema automático de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo requiere los siguientes sensores:

- Un sensor de temperatura: permite medir la temperatura del proceso de calentamiento de la muestra.
- Un sensor de posición: permite obtener la posición en la que se encuentran las muestras.

A continuación, se dan a conocer los requerimientos, las alternativas, la selección y el diseño electrónico de cada uno de estos sensores.

3.5.1.2 Sensor de temperatura

La tinción ZN requiere de un proceso de calentamiento de muestra cuando esta se encuentre cubierta de fucsina a fin de teñir los bacilos con este reactivo. Se realizaron ensayos de calentamiento de muestras, donde se verificó que a una temperatura dentro del rango de 75°C a 85°C, se llega a simular el calentamiento de muestras a través de un mechero que se realiza en los centros de salud del país. Se deben someter las muestras durante un tiempo menor a 1 minuto a fin de optimizar los tiempos del proceso; así mismo, se define una temperatura máxima permitida de 85 °C ya que al supera este límite se puede llegar a quemar los bacilos lo cual afectaría la confiabilidad del sistema. Debido a esto, se requiere de un sensor de temperatura que permita realizar un control en lazo cerrado del proceso de calentamiento de muestras. Los requerimientos para elegir el sensor son los siguientes:

- Rango de operación de 0°C a 100°C.
- Precisión menor o igual a 5°C.
- Bajo tiempo de respuesta.
- Bajo consumo de corriente.

Considerando estos requerimientos, se presentan los dos siguientes sensores de posición: interruptor final de carrera (Fig. 3.5.1.3.1) y el sensor de ultrasonido HCSR04 (Fig. 3.5.1.3.2).



Fig. 3.5.1.3.1: Interruptor final de carrera.



Fig. 3.5.1.3.2: Sensor de ultrasonido HCSR04

A continuación, la tabla 3.5.1.3.1 muestra los requerimientos y las características de cada uno de estos elementos de control a fin de elegir el sensor más eficiente.

Tabla 3.5.1.3.1: Comparación de sensores de posición.

Requerimientos	Final de carrera		DS18B20	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Precisión menor o igual a 0.1 cm.	[+/- 0.05 cm]	Sí	[+/- 0.3 cm]	Sí
Bajo tiempo de respuesta.	[125 μ s]	Sí	[50 μ s]	Sí
Bajo consumo de corriente.	Depende de la resistencia de pull-up	Sí	[15 mA]	No

Fuente: Elaboración propia.

Dada la anterior comparación, se determina que el sensor de posición que cumple todos los requerimientos es el interruptor final de carrera; por lo tanto, se opta por escoger este sensor. Este presenta dos estados on-off, se mantiene abierto cuando no está presionado y se cierra cuando se encuentre presionado. A continuación, la figura 3.5.1.3.3 muestra el diagrama esquemático del circuito de medición de posición.

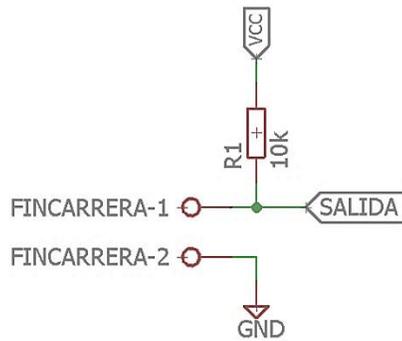


Fig. 3.5.1.3.3: Diagrama esquemático del circuito de medición de posición.

Este circuito cuenta con una resistencia pull-up externa que brinda una salida de 0 V el switch está abierto; caso contrario, la salida será de 5V cuando el switch está en corte. Por último, el valor de la resistencia R1 debe ser alto de manera que se obtenga una corriente de consumo baja; por ello se opta por escoger un valor de 10 KΩ. Los parámetros que definen este circuito son los siguientes:

$$V_{cc} = 5 \text{ V}$$

$$R1 = 10 \text{ K}\Omega$$

3.5.2 Actuadores y excitadores

3.5.2.1 Introducción

El sistema automático de preparación de cuatro muestras de esputo en simultáneo para el diagnóstico de TBC, requiere los siguientes actuadores:

- Un calefactor para el calentamiento de muestras: este permitirá calentar las muestras de esputo cubiertas con fucsina fenicada y filtrada.
- Un motor para el desplazamiento de muestras: este permitirá realizar el desplazamiento lineal de las muestras a través de las 3 áreas específicas del sistema.

- Cuatro actuadores de flujo: estos permitirán controlar el flujo de dispensado de los 4 reactivos.

A continuación, se seleccionan los actuadores adecuados y se realiza el diseño del circuito electrónico que permita controlar cada uno de estos.

3.5.2.2 Calefactor para el calentamiento de las muestras

Este actuador permitirá calentar la muestra a una temperatura de 75 °C con una tolerancia de +/- 5°C de manera que se evite llevar la muestra a una temperatura por encima de los 85 °C ya que esto podría llegar a quemar los bacilos y generar un diagnóstico erróneo. Así mismo, este calefactor debe presentar un bajo tiempo de establecimiento con la finalidad de llegar a la temperatura deseada en un menor tiempo y reducir el tiempo del proceso de calentamiento. Además, este debe disipar gran cantidad de calor consumiendo una baja cantidad de potencia eléctrica. Por último, este debe ser lo más compacto posible de manera que no afecte la portabilidad de la máquina. Los requerimientos para elegir este actuador son los siguientes:

- Debe llegar a los 75 °C.
- Bajo tiempo de establecimiento.
- Bajo consumo de potencia.
- Debe ser compacto.

Considerando estos requerimientos, se presentan los dos siguientes actuadores para el calentamiento de muestras: Lámparas halógena tipo ampolla (Fig. 3.5.2.2.1) y lámpara halógena tipo bi pin (Fig. 3.5.2.2.2).



Fig. 3.5.2.2.1: Lámparas halógenas tipo ampolla.



Fig. 3.5.2.2.2: Lámpara halógena tipo bi pin.

Se escogieron dos lámparas halógenas tipo ampolla y tipo bi pin ya que para realizar una comparación entre estos actuadores ambos deben encontrarse en igual condición de consumo de potencia eléctrica (300 W).

A continuación, la tabla 3.5.2.2.1 muestra los requerimientos y las características de cada uno de estos elementos de control a fin de elegir el actuador de temperatura más eficiente.

Tabla 3.5.2.2.1: Comparación de calefactores.

Requerimientos	2 lámpara halógena tipo ampolla		Lámpara halógena tipo bi pin	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Debe llegar a los 75 °C.	Supera los 75 °C	Sí	Supera los 75 °C	Sí
Bajo tiempo de establecimiento.	45 segundos (75 °C)	Sí	25 segundos (75 °C)	Sí
Bajo consumo de potencia.	300 W	Sí	300 W	Sí
Debe ser compacto.	7.4 cm largo 2 cm ancho	No	2 cm largo 2 cm ancho	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Dada la anterior comparación, se determina que el actuador que cumple todos los requerimientos es la lámpara halógena tipo bi pin, la cual es una carga monofásica que se energiza con 220 V_{RMS} y consume una potencia eléctrica de 300 W; por lo tanto, se opta por escoger este elemento de control.

El control de cargas monofásicas se realiza mediante un triac, el cual es un dispositivo electrónico que permite manipular la tensión alterna entregada a la carga y de esta manera se varía la corriente de energización. Por lo tanto, se empleará el triac para manipular el actuador de temperatura. Este dispositivo recibirá un pulso de activación por el terminal GATE con un determinado ángulo de disparo, el cual toma como referencia el instante de cruce por cero. Debido a esto, se diseñará un circuito que detecte el instante en que la señal de la red eléctrica de 220 V_{RMS} y frecuencia de 60Hz cruza por cero.

A continuación, la figura 3.5.2.2.3 muestra el diagrama esquemático del circuito detector de cruce por cero propuesto.

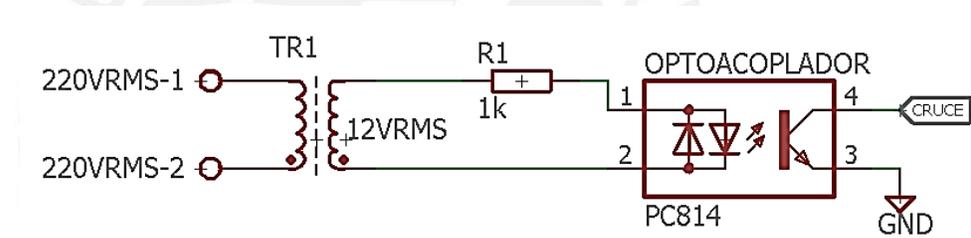


Fig. 3.5.2.2.3: Diagrama esquemático detector de cruce por cero.

En primer lugar, se emplea un transformador 220V/12V 0.5 A para reducir la tensión de la red de 220 V_{RMS} a 12 V_{RMS} ya que los circuitos integrados (CI) operan a bajos niveles de tensión; además, la corriente máxima que entrega este transformador es de 0.5 A ya se requiere de una baja corriente para encender el diodo LED del optoacoplador. Por último, la señal de salida del pin 4 será conectado a una resistencia pull-up del microcontrolador; debido a esto, este se mantendrá en nivel '1' lógico cuando el transistor se encuentre en corte y en nivel '0' lógico cuando se sature.

Se define un valor de R1 establecido (R1est) de manera que se obtenga una corriente de diodo LED establecida (Ifest) de 16 mA, la cual se obtiene a un voltaje de diodo LED establecido (Vest) de 1.2 V. Así mismo, el valor de R1est está definido por la siguiente ecuación:

$$R1_{est} = \frac{V1_{m\acute{a}x} - V_{fest}}{I_{fest}} = \frac{17\text{ V} - 1.2\text{ V}}{16\text{ mA}} = 987.5\ \Omega$$

Por lo tanto, se define un valor R1 de 1 K Ω ya que este es el valor comercial más cercano al valor deseado.

$$R1 = 1\text{ K}\Omega$$

Esta señal de cruce por cero será recibida por el microcontrolador; por lo tanto, ese instante se define como el punto de referencia para el ángulo de disparo.

A continuación, la figura 3.5.2.2.6 muestra el diagrama esquemático del circuito de control de ángulo de disparo propuesto.

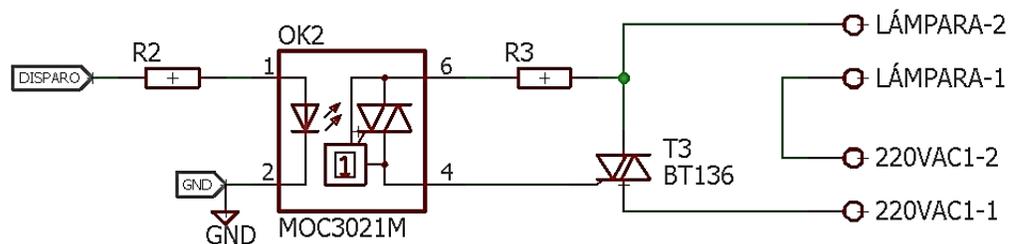


Fig. 3.5.2.2.6: Diagrama esquemático del circuito de control de ángulo de disparo.

La señal de entrada (Ventrada) es un pulso entregado por el microcontrolador, el cual presenta una amplitud de 4.2 V; además, esta señal presenta un ancho de pulso definido por el tiempo de disparo de compuerta (Tgt) del triac a escoger.

Para hallar el valor de la resistencia R2 se debe definir el valor de Vdisparo:

$$V_{\text{disparo}} = 4.2 \text{ V}$$

Seguidamente, se debe definir el optotriac a utilizar; por lo tanto, se opta por escoger el MOC3021M, el cual es un dispositivo sencillo de encontrar en el mercado nacional. Este presenta una tensión típica de diodo LED (V_f) y una corriente típica del diodo LED (I_f) de 1.15 V @ 10 mA. Considerando estos parámetros, se puede calcular el valor de la resistencia R2 que se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$R2 = \frac{V_{\text{disparo}} - V_f}{I_f} = \frac{4.2 \text{ V} - 1.15 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 305 \ \Omega$$

Por consiguiente, se define un valor R2 de 330 Ω ya que es el valor comercial más cercano al valor deseado.

$$R2 = 330 \ \Omega$$

Por otro lado, se recomienda un valor de la resistencia R3 requerido para activar el triac, según la hoja de datos del optoacoplador 4N25M, el cual es un dispositivo de aislamiento entre el circuito de control y el circuito de potencia ya que este no puede soportar gran cantidad de corriente como sí lo permite el triac.

$$R3 = 180 \ \Omega$$

Finalmente, se debe definir el dispositivo triac a emplear; por lo que se debe calcular la corriente nominal de la lámpara halógena tipo bi pin (I_{carga}). La carga presenta una potencia nominal (P_{carga}) de 300 W y una tensión nominal de carga (V_{carga}) de 220 V_{RMS} . Considerando estos parámetros, se puede hallar el valor de la I_{carga} a través de la siguiente ecuación:

$$I_{\text{carga}} = \frac{P_{\text{carga}}}{V_{\text{carga}}} = \frac{300 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 1.36 \text{ A}$$

Por lo tanto, se requiere de un TRIAC que soporte una corriente de 1.36 A como mínimo; así mismo, este dispositivo debe presentar un bajo tiempo de disparo de compuerta (T_{gt}) con respecto al semiperiodo de la señal de la red eléctrica de $220 V_{RMS} / 60 \text{ Hz}$ con la finalidad de obtener un control de ángulo de disparo óptimo. Además, se debe analizar si es necesario utilizar un disipador para evitar sobrecalentamiento de este dispositivo. Considerando estos parámetros, se opta por escoger el TRIAC BT136 que soporta una corriente ($I_{TRMSm\acute{a}x}$) de hasta 4 A; además, presenta un tiempo de disparo de compuerta (T_{gt}) de $2 \mu\text{s}$ lo cual es despreciable comparado con los $8333 \mu\text{s}$ del semiperiodo de la señal de la red eléctrica.

3.5.2.3 Motor para el desplazamiento de muestras

Este motor permitirá realizar el desplazamiento lineal de las muestras a través del área de inserción de muestras, dispensación de reactivos, calentamiento de muestras y análisis microscópico. Por lo tanto, se debe calcular los requerimientos de este motor a partir de las características de la carga a desplazar, el piñón acoplado al motor, el codificador y la cinta codificadora. En primer lugar, la velocidad mínima se establece a partir del tiempo en que las muestras se desplacen a lo largo del riel de 40 cm de longitud, donde se define un tiempo máximo de 20 segundos. Por lo tanto, los parámetros requeridos para calcular esta velocidad son los siguientes:

- Radio del piñón acoplado al motor: 0.25 cm.
- Longitud lineal del riel: 0.4 m.
- Tiempo máximo: 20 s.

Así mismo, la velocidad mínima se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad m\u00edn (m/s)} = \frac{\text{longitud lineal}}{\text{tiempo}} = \frac{0.4 \text{ m}}{20 \text{ s}} = 0.02 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad m\u00edn (rad/s)} = \frac{\text{Velocidad m\u00edn(m/s)}}{\text{radio}} = \frac{0.02 \text{ m/s}}{0.0025 \text{ m}}$$

$$\text{Velocidad m\u00edn (rad/s)} = 8 \text{ rad/s}$$

$$\text{Velocidad m\u00edn (rpm)} = \text{Velocidad m\u00edn (rad/s)} * 30/\pi$$

$$\text{Velocidad m\u00edn (rpm)} = 8 \text{ rad/s} * 30/\pi = 76.4 \text{ rpm}$$

Seguidamente, se debe determinar el torque necesario para poder desplazar la estructura de sujeci\u00f3n de muestras; por lo tanto, se define un peso m\u00e1ximo de la estructura de sujeci\u00f3n de muestras de 1 Kg. Por ende, se calcula este torque a partir del siguiente par\u00e1metro:

- Peso m\u00e1ximo de la estructura: 1 Kg

$$\text{Fuerza} = \text{Peso} * \text{Gravedad} = 1 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.81 \text{ N}$$

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} * \text{Radio} = 9.81 \text{ N} * 0.0025 \text{ m} = 24.53 \text{ mN.m}$$

Luego de definir el torque y la velocidad del motor, se puede calcular el valor de la potencia mec\u00e1nica del motor mediante la siguiente ecuaci\u00f3n:

$$P_{\text{mec\u00e1nica}} = \text{Torque} * \text{Velocidad nominal (rpm)} * \pi/30$$

$$P_{\text{mec\u00e1nica}} = 24.53 \text{ mN.m} * \pi/30 = 2.57 \text{ W}$$

Considerando estos requerimientos, se presentan los dos siguientes actuadores para el desplazamiento de muestra: XY42STH34-0354A (Fig. 3.5.2.3.1) y RS445PA14233R (Fig. 3.5.2.3.2).

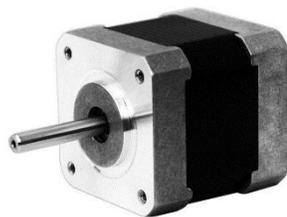


Fig. 3.5.2.3.1: Motor a pasos XY42STH34-0354A



Fig. 3.5.2.3.2: Motor DC RS445PA14233R.

A continuación, la tabla 3.5.2.3.1 muestra los requerimientos y las características de cada uno de estos elementos de control a fin de elegir el motor más eficiente.

Tabla 3.5.2.3.1: Comparación de motores

Requerimientos	XY42STH34-0354A		RS445PA14233R	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Torque (mayor a 24.53 mN.m)	[300 mN.m]	Sí	[81.8 mN.m]	Sí
Velocidad mínima (76.4 rpm)	[60 r.p.m.]	Sí	[650 r.p.m.]	No
Potencia mecánica (mayor a 2.57 W)	[3 W]	Sí	[7.78 W]	Sí
Bajo consumo de corriente.	[250 mA]	Sí	[60 mA]	Sí
Tensión de alimentación (12 V)	[12 V]	Sí	[12 – 42 V]	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Dada la anterior comparación, se determina que el actuador que cumple todos los requerimientos es el motor a pasos XY42STH34-0354A; por lo tanto, se opta por escoger este elemento de control. Por consiguiente, se realiza el diseño del circuito de control de este motor. A continuación, la figura 3.5.2.3.3 muestra el diagrama esquemático del circuito de control de motor a pasos propuesto.

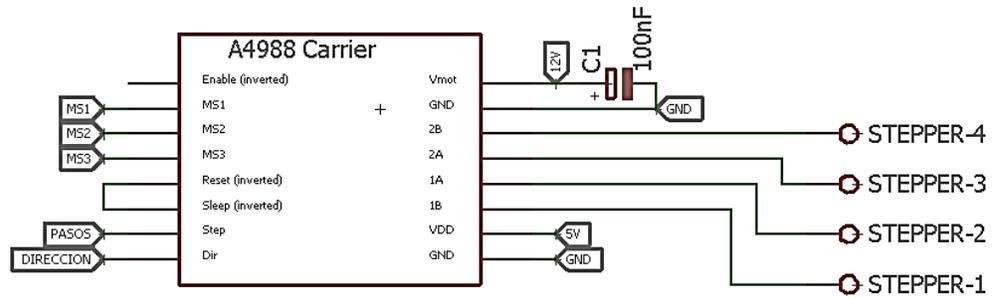


Figura 3.5.2.3.3: Diagrama esquemático del circuito de control del motor a pasos.

Considerando la tensión de alimentación del motor de 12 V y una corriente nominal de 250mA, se opta por el integrado A4988 ya que según su hoja de datos este CI soporta una tensión de alimentación del motor (V_s) en el rango de 8V a 35V y soporta una corriente de salida de hasta 2A. En este circuito, se define una tensión de alimentación de compuertas lógicas (V_{dd}) de 5 V y una tensión para energizar el motor DC (V_{mot}) de 12 V. Por otro lado, se observa que los pines MS1, MS2, MS3, STEP y DIR permitirán controlar el sentido de giro y velocidad del motor a pasos según la lógica mostrada en la tabla 3.5.2.3.2.

Tabla 3.5.2.3.2: Control de giro y parada del motor DC.

MS1	MS2	MS3	Pasos	STEP	DIR	GIRO
0	0	0	Paso completo	Pulso	0	Horario
1	0	0	1/2 paso	Pulso	1	Antihorario
0	1	0	1/4 de paso	-	x	Parado
1	1	0	1/8 de paso			
1	1	1	1/16 de paso			

Fuente: Elaboración propia.

El fabricante recomienda utilizar condensadores de desacoplo de 100 nF entre los terminales V_{mot} respecto a tierra (GND) con la finalidad de disminuir el efecto de las inductancias parásitas. Por lo tanto, el

circuito de control de motor DC queda establecido por los siguientes parámetros:

$$V_{\text{mot}} = 5 \text{ V}$$

$$V_{\text{dd}} = 12 \text{ V}$$

$$C1 = 100 \text{ nF}$$

3.5.2.4 Actuador de flujo

Este actuador debe ser de un material anticorrosivo ya que estará en contacto directo con los reactivos, también debe ser capaz de controlar el flujo a fin de disminuir el desperdicio de reactivos; además, debe ser lo más compacto posible a fin de no afectar la portabilidad del sistema. Por otro lado, debe presentar un bajo consumo de corriente y una tensión de alimentación de 12 V. Los requerimientos para elegir este actuador son los siguientes:

- Anticorrosivo.
- Permite controlar el flujo.
- Dimensión mínima posible.
- Bajo consumo de corriente.
- Tensión de alimentación de 12V.

Considerando estos requerimientos, se presentan los dos siguientes actuadores de flujo: Minibomba KIMHOME 93508 (Fig. 3.5.2.4.1) y Válvula solenoide (Fig. 3.5.2.4.2).



Fig. 3.5.2.4.1: Minibomba KIMHOME 93508.



Fig. 3.5.2.4.2: Válvula solenoide.

A continuación, la tabla 3.5.2.4.1 muestra los requerimientos y las características de cada uno de estos elementos de control a fin de elegir el actuador de flujo más eficiente.

Tabla 3.5.2.4.1: Comparación entre los actuadores de flujo.

Requerimientos	Minibomba 93508		Válvula solenoide	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
Anticorrosiva	Polietileno de alta densidad anticorrosivo	Sí	Polietileno de alta densidad anticorrosivo	Sí
Capacidad de controlar el flujo	Controla el flujo a través de PWM	Sí	ON/OFF	No
Dimensión mínima posible	55 mm x 35 mm x 45 mm	Sí	85 mm x 60 mm x 42 mm	No
Bajo consumo de corriente.	[0.3 A]	Sí	[0.32 A]	Sí
Tensión de alimentación	[12 V]	Sí	[12 V]	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Dada la anterior comparación, se determina que el actuador de flujo que cumple todos los requerimientos es la minibomba KIMHOME 93508; razón por la cual, se opta por escoger este actuador. Por consiguiente, se realiza el diseño del circuito control de flujo. A continuación, la figura 3.5.2.4.3 se muestra el diagrama esquemático del circuito de control de flujo.

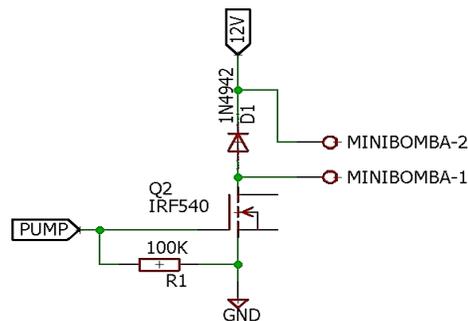


Figura 3.5.2.4.3: Diagrama esquemático de control de flujo.

Considerando la tensión de alimentación del motor de 12V y una corriente nominal de 300mA, se establece que el Mosfet debe soportar una corriente de arranque mayor a 750mA (2.5 veces la corriente nominal); razón por la cual, se opta por escoger el Mosfet IRF540 que soporta una tensión Vds de 100V y una corriente de hasta 28A. Así mismo, el fabricante recomienda utilizar el diodo externo de carrera libre 1N4942 como protección del transistor y una resistencia R1 de 100 K Ω entre los terminales G-S del Mosfet para evitar el ruido eléctrico.

Por otro lado, el flujo de la minibomba se controlará a través de la modulación por ancho de pulso (PWM) de la señal PUMP la cual será brindada por el microcontrolador. Por lo tanto, el circuito de control de flujo se encuentra establecido por el siguiente parámetro:

$$V_s = 12V$$

$$R_1 = 100 \text{ K}\Omega$$

3.5.3 Panel de control y Controlador

3.5.3.1 Introducción

Los circuitos diseñados anteriormente cumplen la finalidad de medir la señal brindada por los sensores y acondicionarla para ser interpretada por el controlador; además, estos circuitos también permiten la interacción con los actuadores del sistema (lámpara halógena, motor a pasos y minibomba). Por lo tanto, se procederá a escoger un micro-controlador que permita automatizar el proceso de tinción ZN. Así mismo, se requiere de un panel de control que permita la interacción entre el usuario y el sistema (interfaz) para controlar el encendido/apagado del equipo a través de pulsadores y el monitoreo del estado en el que se encuentra el equipo a través de un diodo LED.

3.5.3.2 Panel de control

En primer lugar, se requieren de un diodo LED que se mantendrá encendido cuando se encienda el sistema y parpadeará cuando se detecte alguna falla en este. A continuación, la figura 3.5.3.2.1 muestra el diodo LED y el diagrama esquemático que permitirán monitorear el estado del sistema.



Figura 3.5.3.2.1: Diodo LED y diagrama esquemático de monitoreo del sistema.

Considerando la tensión de alimentación del diodo LED de 12V y una corriente nominal de 80mA, se opta por escoger el Mosfet IRF540 utilizado anteriormente.

El estado del diodo LED se controlará a través de la señal LED la cual será brindada por el microcontrolador; así mismo, se recomienda utilizar una resistencia R1 de 100 K Ω entre los terminales G-S del Mosfet para evitar el ruido eléctrico. Por lo tanto, el circuito de control de flujo se encuentra establecido por el siguiente parámetro:

$$V_s = 12V$$

$$R_1 = 100 \text{ K}\Omega$$

Finalmente, también se requiere de un pulsador de arranque y un pulsador de parada de emergencia. A continuación, la figura 3.5.3.2.6

muestra estos pulsadores y el diagrama esquemático que permitirá encender el sistema y apagarlo en caso de una emergencia.

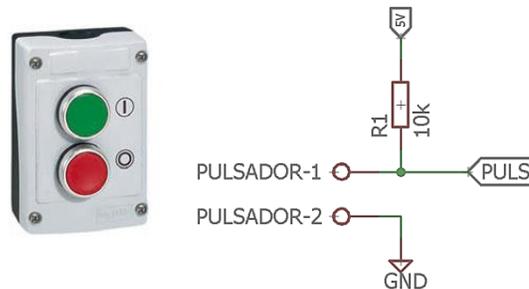


Figura 3.5.3.2.6: Diagrama esquemático de pulsadores de arranque y parada.

Este circuito requiere de una resistencia de pull-up R1 de 10 K Ω entre Vcc y la señal PULS. Por lo tanto, el circuito de control de flujo se encuentra establecido por el siguiente parámetro:

$$V_{cc} = 5V$$

$$R1 = 10 K\Omega$$

3.5.3.3 Controlador

Los requerimientos que debe cumplir el controlador son los siguientes:

- 3 entrada digitales (pulsadores y final de carrera).
- 10 salidas digitales (minibombas, motor a pasos y lámpara halógena)
- 1 temporizador.
- 1 interrupción externa para detectar el cruce por cero.
- 1 entrada ADC para el sensor de temperatura.

Considerando estos requerimientos, se presentan los dos siguientes micro-controladores: ATMEGA328P (Fig. 3.5.3.3.3) y ATmega1280 (Fig. 3.5.3.3.4).

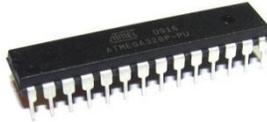


Figura 3.5.3.3.1:
ATmega328P



Figura 3.5.3.3.4:
ATmega1280

A continuación, la tabla 3.5.3.3.1 muestra los requerimientos y las características de cada uno de estos elementos de control a fin de elegir el micro-controlador más eficiente.

Tabla 3.5.3.3.1: Comparación entre los micro-controladores.

Requerimientos	ATmega128P		ATmega1280	
	Característica	¿Cumple?	Característica	¿Cumple?
13 pines E/S	14 pines E/S	Sí	54 pines E/S	Sí
1 interrupción externa	2 interrupciones externas (forman parte de E/S digitales)	Sí	6 interrupciones externas (forman parte de E/S digitales)	Sí
1 temporizador	3 timers	Sí	6 timers	Sí
1 entradas ADC	4 entradas ADC	Sí	16 entradas ADC	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Dada la anterior comparación, se determina que el micro-controlador ATmega328P cumple los requerimientos de manera eficiente con respecto al ATmega1280 el cual se encuentra sobredimensionado según los requerimientos; razón por la cual, se opta por escoger este micro-controlador. A continuación, se realiza la distribución de terminales (Tabla 3.5.2.3.2) donde se establece la conexión entre sensores, actuadores, pulsadores y pantalla con el micro-controlador ATmega328P.

Tabla 3.5.3.3.2: Distribución de terminales del micro-controlador.

Terminales	Función
PB0	Salida minibomba de agua
PB1	Salida minibomba de azul metileno
PB2	Salida minibomba de alcohol ácido
PB4	Entrada pulsador de arranque
PB6	Terminal para la señal de reloj
PB7	Terminal para la señal de reloj
PC0	Entrada ADC sensor de temperatura
PC1	Salida MS1 del motor a pasos
PC2	Salida MS2 del motor a pasos
PC3	Salida MS2 del motor a pasos
PC4	Salida diodo LED
PC6	Reset
PD2	Entrada cruce por cero
PD3	Salida control ángulo de disparo
PD4	Salida PASOS del motor a pasos
PD5	Salida DIRECCION del motor a pasos
PD6	Entrada final de carrera
PD7	Salida minibomba de fuscina

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la figura 3.5.3.3.4 muestra el diagrama esquemático del circuito de control.

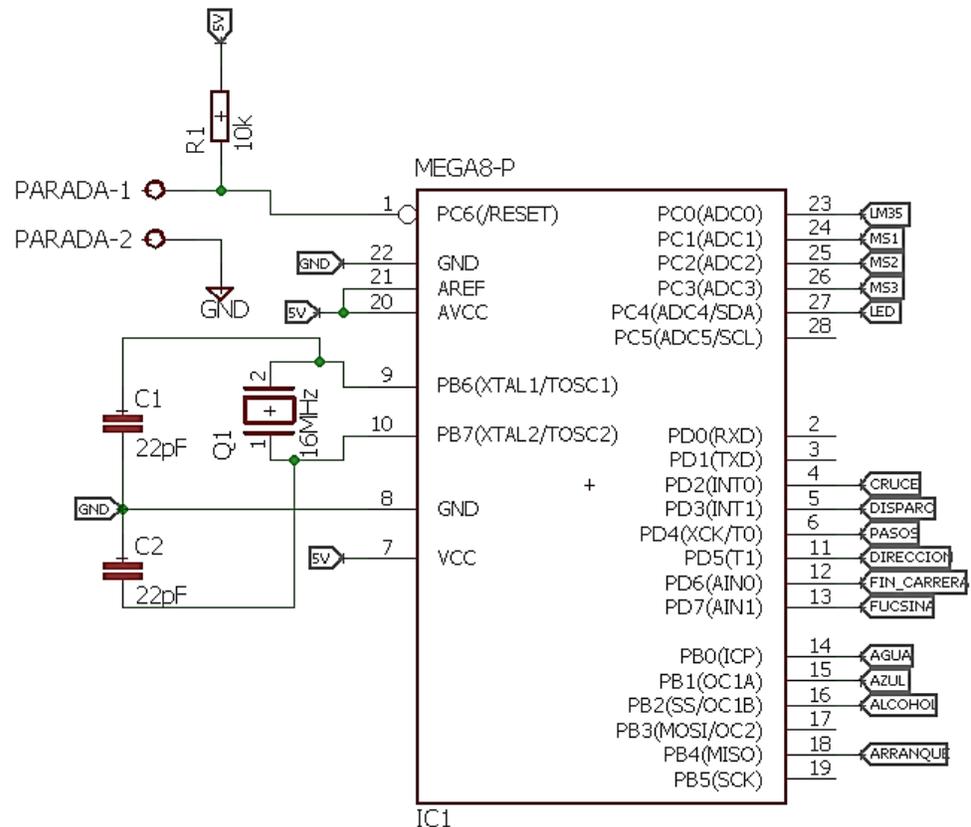


Figura 3.5.3.3.4: Diagrama esquemático del circuito de control del sistema.

Por último, según la hoja de datos de este micro-controlador, se recomienda emplear una tensión de alimentación (VCC) de 5 V, un reloj de cristal de frecuencia (Fclk) de 16 MHz entre los PB6 y PB7 con sus respectivos capacitores C1 y C2 de 22 pF. Así mismo, se establece una resistencia pull-up de 10 KΩ que permita el reseteo del micro-controlador. Por lo tanto, los parámetros que definen este circuito son los siguientes:

$$VCC = 5 V$$

$$Fclk = 16 MHz$$

$$C1 = C2 = 22 pF$$

$$R1 = 10 K\Omega$$

3.5.4 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación requerida para automatizar el sistema brindar una tensión de 5 V y 12 V. La tabla 3.5.4.1 muestra la corriente requerida por cada dispositivo relevante según la tensión que requiere.

Tabla 3.5.4.1: Requerimientos de las fuentes de alimentación.

Dispositivos de 5 V	Corriente	Dispositivos de 12 V	Corriente
Micro-controlador	100 mA	Motor a pasos	250 mA
Optoacoplador	10 mA	Minibomba	300 mA
Optotriac	10 mA	Diodo LED	80 mA
Excitador A4988	15 mA		
Total	135 mA	Total	630 mA

Fuente: Elaboración propia.

Dada la tabla anterior, se observa que los dispositivos electrónicos de monitoreo y control requieren de una fuente de 5V de 135mA; por otro lado, los dispositivos de fuerza (motor DC, minibombas y LED) requieren una fuente 12V de 630mA.

Considerando estos parámetros, se escoge una fuente conmutada de 12V/5V de 2 A. A continuación, la figura 3.5.4.1 muestra la fuente conmutada que recibe una señal de 220 VAC y entrega una señal de 12V/5V-2A. Esta fuente se encuentra disponible en el mercado por un precio de S/. 20, lo cual es más eficiente que implementarlo.



Figura 3.5.4.1: Fuente conmutada 12V/5V–2 A.

3.5.6 Diagrama de tarjeta impresa

3.5.6.1 Máscara de componentes

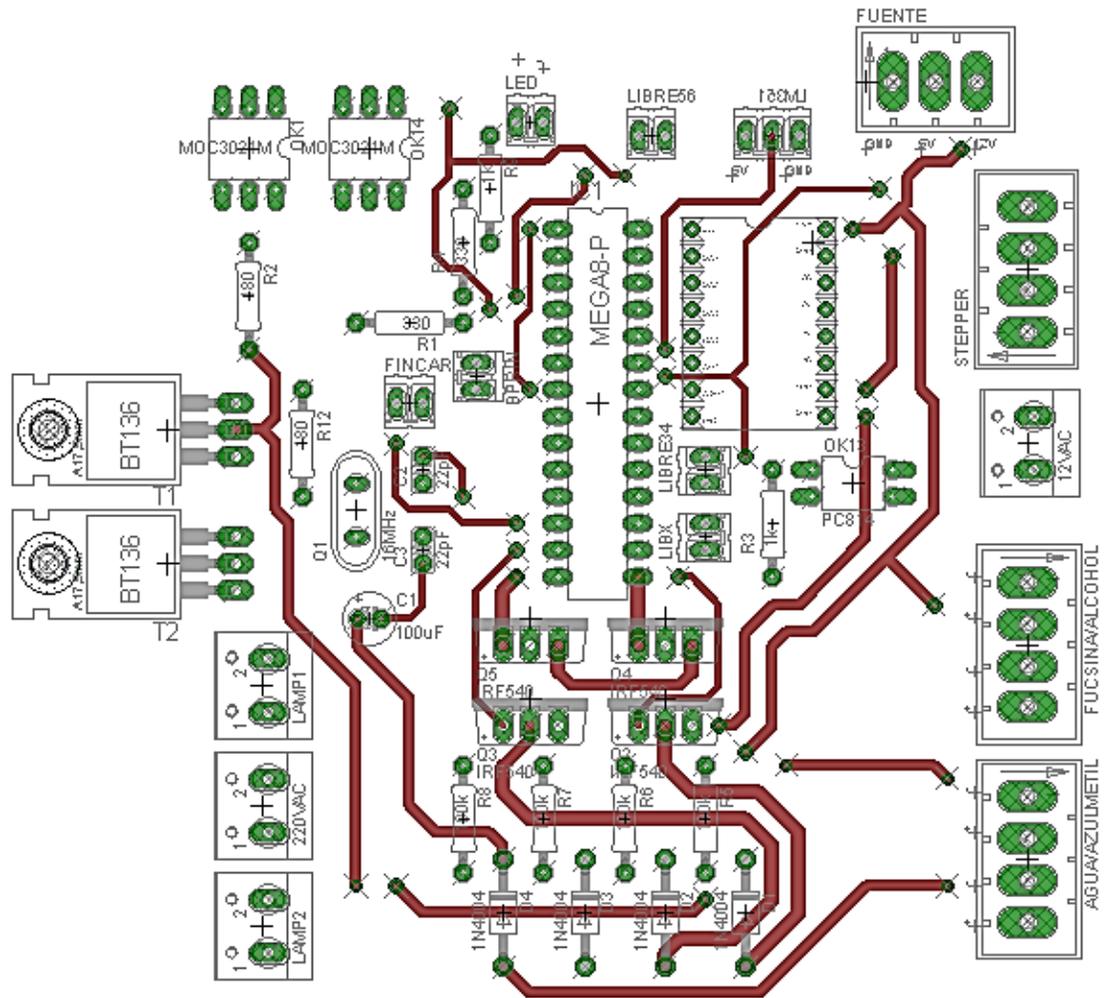


Figura 3.5.6.1: Máscara de componentes.

3.5.6.2 Máscara de pistas

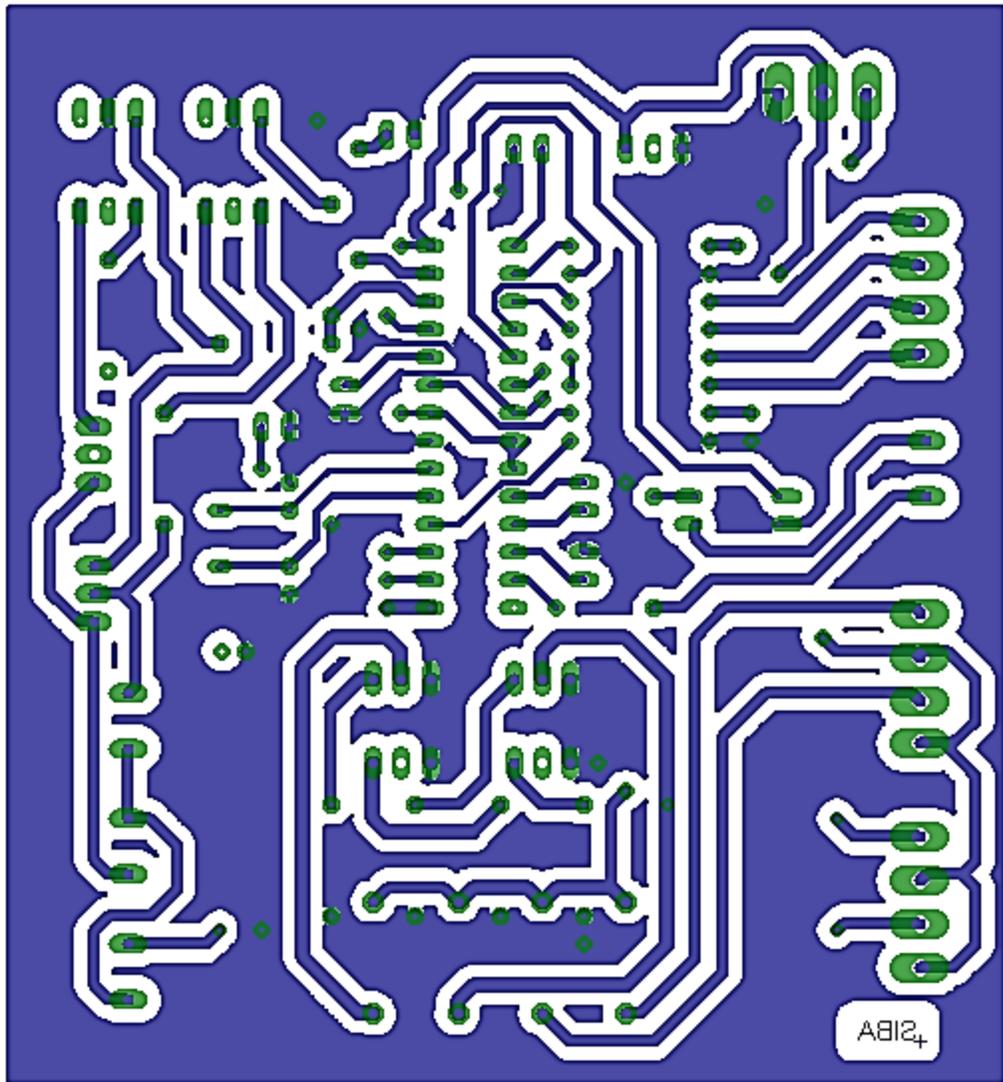


Figura 3.5.6.2: Máscara de pistas.

3.6 Diseño del Software electrónico

3.6.1 Introducción

Luego de definir el diseño mecánico y el hardware electrónico del sistema, se procede a realizar el diseño del software electrónico que permitirá controlar y monitorear los parámetros involucrados en el proceso.

3.6.2 Algoritmos de control

El sistema de tinción de cuatro muestras de esputo en simultáneo cuenta con tres procesos que se requieren controlar los cuales son los siguientes: dispensación de reactivos (control de flujo), calentamiento de muestras (control de temperatura) y desplazamiento lineal de las muestras (control de posición). Esto implica definir un algoritmo de control para cada uno de estos procesos de manera que se realice un control robusto sobre estos. Por lo tanto, se va utilizar un algoritmo de control ON/OFF para el control de flujo de reactivos, lo cual implica realizar un lazo de control abierto (no se requiere sensor de flujo); por otro lado, se utilizará un algoritmo de control proporcional para el proceso de control de temperatura lo cual implica realizar un lazo de control cerrado (se requiere un sensor de temperatura) [10]. Así mismo, se da a conocer el algoritmo de control ON/OFF y PID.

En primer lugar, el algoritmo de control ON/OFF se encuentra definido por los valores que pueda tomar la señal de control $u(t)$ respecto a la señal de error $e(t)$:

$$u(t) = \begin{cases} U1, & e(t) > 0 \\ U2, & e(t) < 0 \end{cases}$$

A continuación, la figura 3.6.2.1 muestra el diagrama de bloques de este controlador.

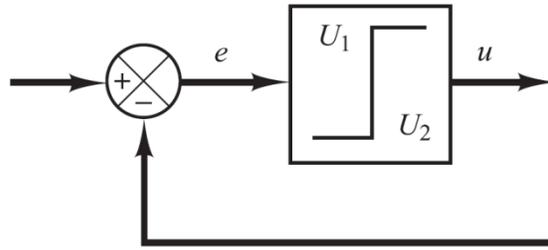


Figura 3.6.2.1: Diagrama de bloques de un controlador ON/OFF. [9]

El control de flujo se dará a través de señal de control $u(t) = U_1$ constante de 5 V por un tiempo determinado hasta que se logre recubrir totalmente las muestras para luego de ese instante desenergizar el actuador mediante un valor de $u(t) = U_2$ de 0 V.

Así mismo, se implementará un algoritmo de control proporcional donde la señal de control $u(t)$ es proporcional al error $e(t)$ ya que de esta manera se busca obtener un control más suave en comparación con el control ON/OFF.

Para evitar realizar el modelamiento matemático de la planta se recurre a realizar procedimientos experimentales para el diseño del controlador proporcional. El algoritmo de control PID se encuentra definido de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p * T_d * \frac{d e(t)}{dt}$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo.

A continuación, la figura 3.6.2.2 muestra el diagrama de bloques de este controlador PID.

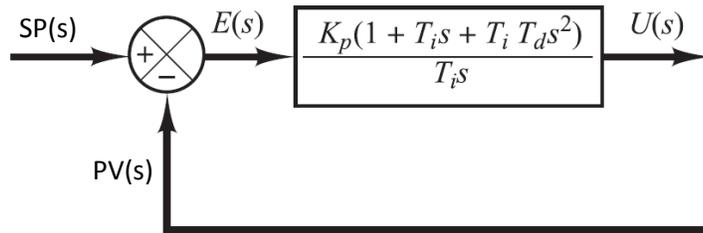


Figura 3.6.2.2: Diagrama de bloques de un controlador proporcional-integral-derivativo. [9]

En el proceso de control de temperatura se empleará un controlador proporcional ya que se busca disminuir el tiempo de establecimiento y mejorar la estabilidad de la variable del proceso (PV). Por lo tanto, el algoritmo de control proporcional se encuentra definido por los valores que toma la señal de control $u(t)$.

$$u(t) = K_p * e(t)$$

3.6.3 Programa principal

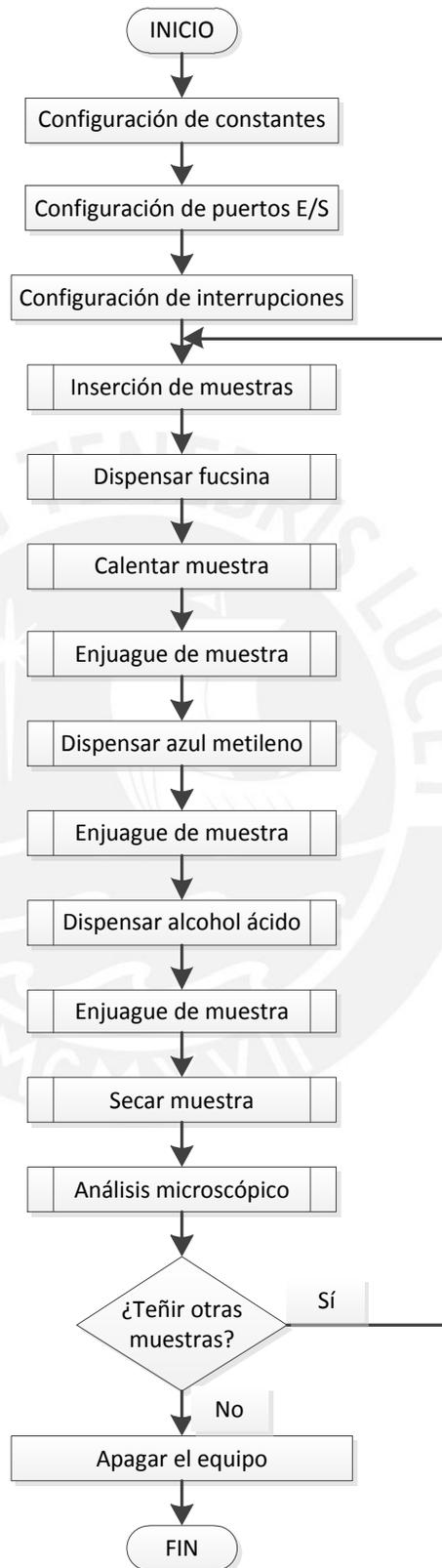


Figura 3.6.3.1: Diagrama de flujo del programa principal.

3.6.4 Subrutinas

3.6.4.1 Inserción de muestras

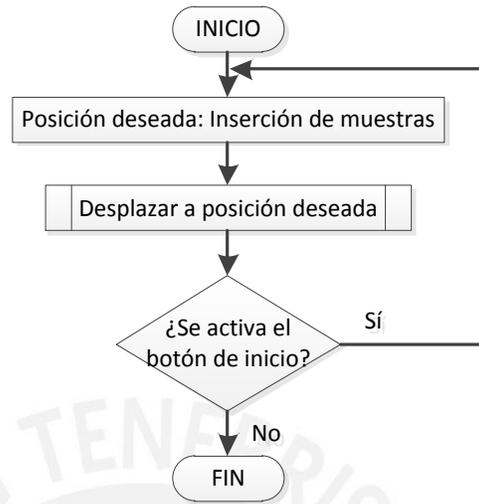


Figura 3.6.4.1: Diagrama de flujo de la subrutina Inserción de muestras.

3.6.4.2 Dispensar fucsina

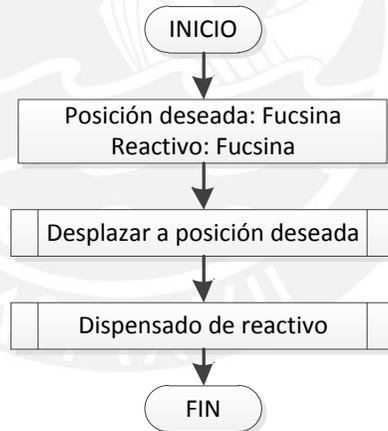


Figura 3.6.4.2: Diagrama de flujo de la subrutina Dispensar fucsina.

3.6.4.3 Calentar muestras

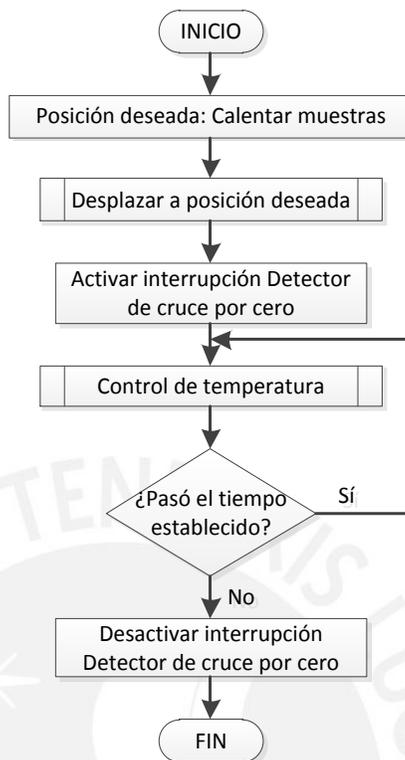


Figura 3.6.4.3: Diagrama de flujo de la subrutina Calentar muestras.

3.6.4.4 Enjuague de muestras

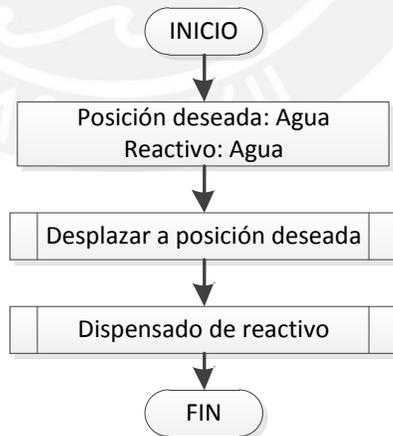


Figura 3.6.4.4: Diagrama de flujo de la subrutina Enjuague de muestras.

3.6.4.5 Dispensar azul metileno

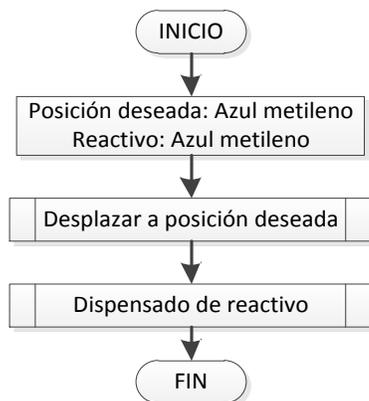


Figura 3.6.4.5: Diagrama de flujo de la subrutina Dispensar azul metileno

3.6.4.6 Dispensar alcohol ácido



Figura 3.6.4.6: Diagrama de flujo de la subrutina Dispensar alcohol ácido.

3.6.4.7 Secar muestra



Figura 3.6.4.7: Diagrama de flujo de la subrutina Secar muestra.

3.6.4.8 Análisis microscópico



Figura 3.6.4.8: Diagrama de flujo de la subrutina Análisis microscópico.

3.6.4.9 Desplazar a posición deseada



Figura 3.6.4.9: Diagrama de flujo de la subrutina Desplazar a posición deseada.

3.6.4.10 Dispensado de reactivo



Figura 3.6.4.10: Diagrama de flujo de la subrutina Dispensado de reactivo.

3.6.4.11 Control de temperatura

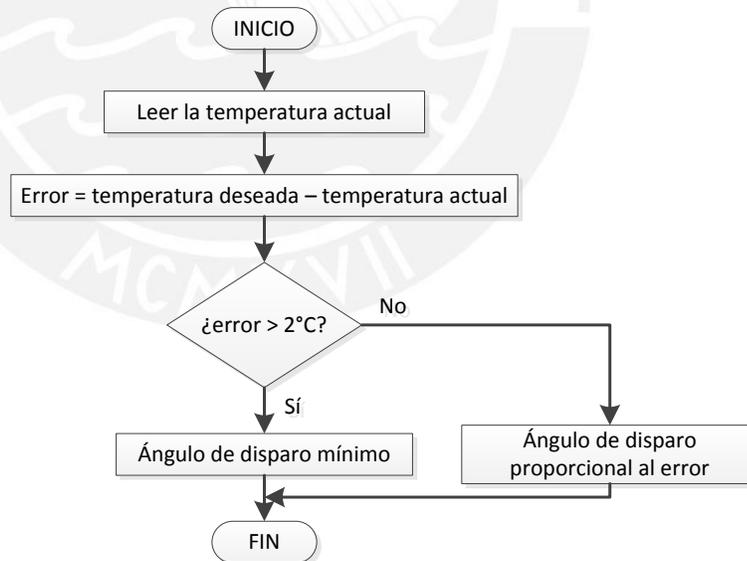


Figura 3.6.4.11: Diagrama de flujo de la subrutina Control de temperatura.

3.6.4.12 Interrupción Detector de cruce por cero

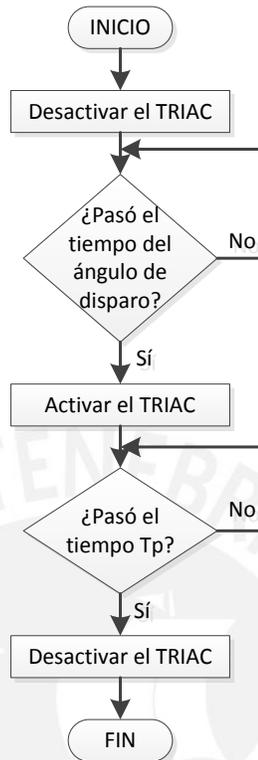


Figura 3.6.4.12: Diagrama de flujo de la interrupción Detector de cruce por cero.

3.7 Costo del prototipo

El costo del equipo diseñado es importante ya que debe ser de bajo costo para poder ser adquirido sin inconveniente por los centros de salud del país. Por lo tanto, la tabla 3.7.1, se muestra el costo de desarrollo que tendría el sistema electrónico y mecánico de este prototipo sin considerar el diseño de ingeniería.

Tabla 3.7.1: Costo del sistema electrónico del prototipo.

Concepto	Costo (S/.)
Sistema mecánico	S/. 500.00
4 minibombas	S/. 200.00
Tarjetas electrónicas	S/. 150.00
2 lámparas halógenas tipo bi pin	S/. 30.00
Fuente conmutada 12 VDC - 2 A	S/. 30.00
Motor a pasos	S/. 25.00
1 excitador A4988	S/. 15.00
Micro-controlador ATMEGA328P	S/. 15.00
Transformador 220Vrms - 12 Vrms 0.5 A	S/. 10.00
Pulsadores	S/. 10.00
Fuente regulada 3.3 y 5 VDC - 700 mA	S/. 10.00
Conectores	S/. 10.00
4 Mosfet	S/. 10.00
Sensor de temperatura LM35	S/. 5.00
Triac BT136	S/. 5.00
Resistencia de diversos valores	S/. 5.00
Capacitores de diversos valores	S/. 5.00
Fin de carrera	S/. 5.00
1 diodo LED	S/. 3.00
Optoacoplador PC814	S/. 3.00
Optotriac MOC3021M	S/. 3.00
4 Diodos 1N4942	S/. 1.00
Reloj de cristal 16 MHz	S/. 1.00
Total	S/. 1,051.00

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

Simulaciones y resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se realizará la verificación del funcionamiento del hardware y software electrónico del sistema. Este se dará a cabo mediante ensayos aislados para los procesos de calentamiento de muestra, desplazamiento de muestras y dispensado de reactivos. Por lo tanto, se realizará la medición de las señales eléctricas (tensión, corriente) de cada uno de los circuitos; así mismo, se determinarán las señales físicas (velocidad, flujo, temperatura) obtenidas al variar la señal de control (PWM, ángulo de disparo).

4.2 Ensayos del hardware y software del proceso de calentamiento

4.2.1 Ensayo del circuito de medición de temperatura

En este ensayo se comparó la temperatura del sensor de temperatura LM35 y el sensor óptico infrarrojo FLUKE 80T-IR como referencia. A continuación, la tabla 4.2.1.1 muestra las temperatura máxima y mínima del sensor LM35 con respecto a la temperatura del FLUKE, donde se observa que el comportamiento tiende a ser lineal con un error en el rango de +/- 2°C.

Tabla 4.2.1.1: Temperatura del sensor FLUKE vs. LM35.

Temperatura FLUKE [°C]	24.2	40.2	49.8	60.1	70
Temperatura LM35 mínima [°C]	24.29	39.64	50.6	60.26	70.9
Temperatura LM35 máxima [°C]	24.49	39.96	51.24	60.91	71.87

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Ensayo del circuito detector de cruce por cero

En este ensayo se miden las señales involucradas en el circuito de detección de cruce por cero. Este circuito permitirá establecer el instante de referencia para llevar a cabo el control de ángulo de disparo.

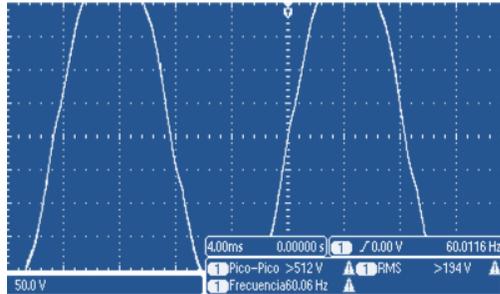


Figura 4.2.2.1: Señal de la red eléctrica 220Vrms/60Hz.

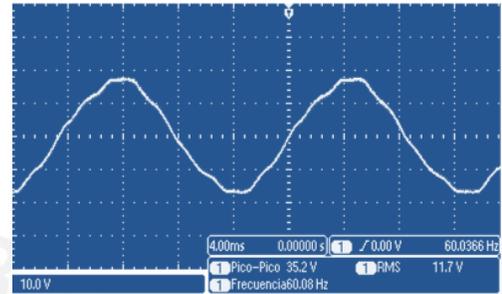


Figura 4.2.2.2: Señal de salida del transformador 12Vrms/60Hz.

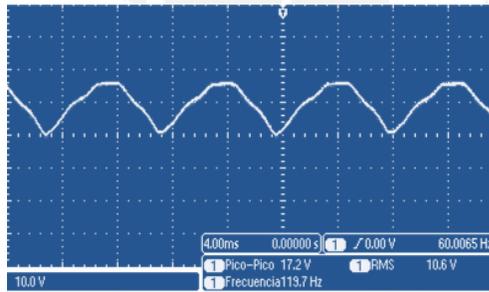


Figura 4.2.2.3: Señal rectificada 12 Vrms/120Hz.

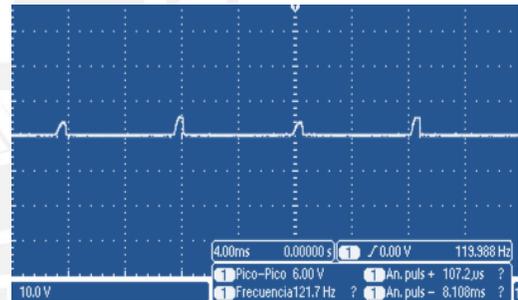


Figura 4.2.2.4: Señal de cruce por cero.

4.2.3 Ensayo del circuito de control de ángulo de disparo

En este ensayo se mide la señal tren de pulso de activación de Triac y la señal de salida que energiza la lámpara halógena para distintos ángulos de disparos a fin de verificar el correcto funcionamiento del circuito de control de ángulo de disparo.

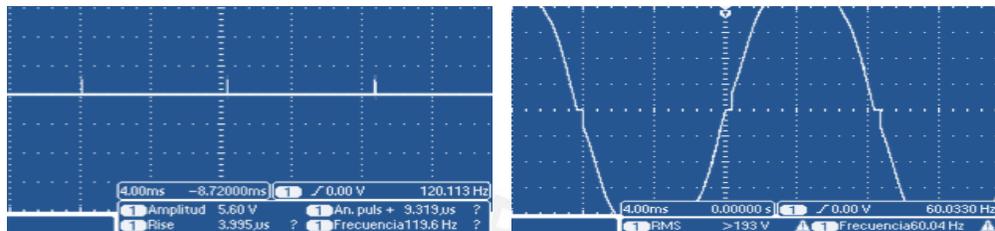


Figura 4.2.3.1: Mediciones para ángulo de disparo de 0°.

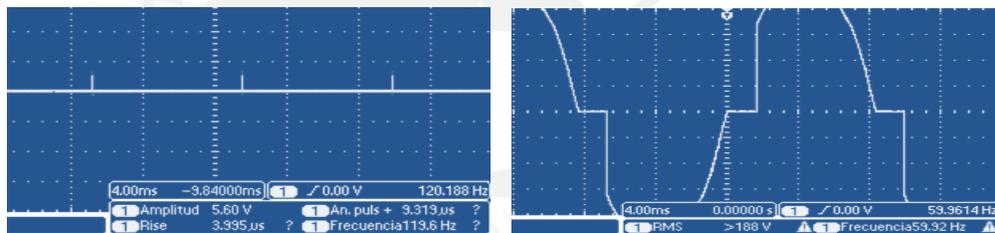


Figura 4.2.3.2: Mediciones para ángulo de disparo de 30°.

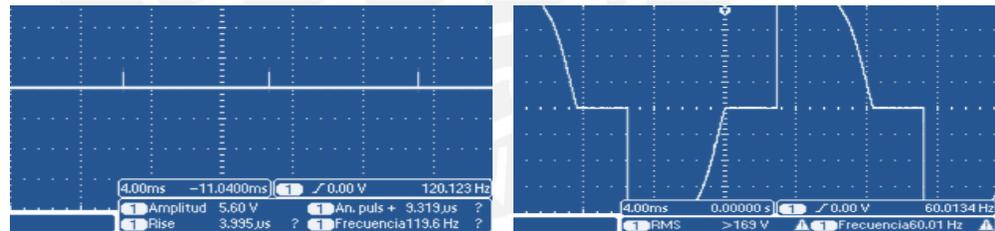


Figura 4.2.3.3: Mediciones para ángulo de disparo de 60°.

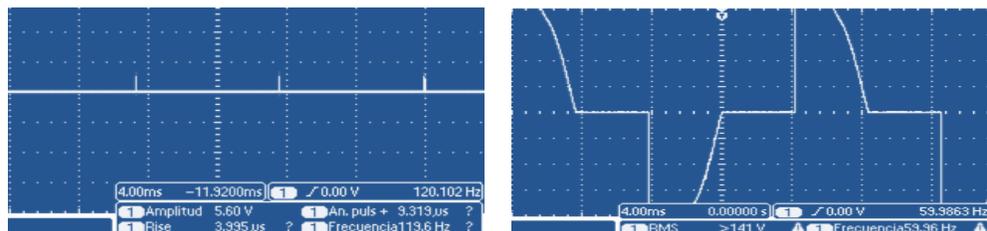


Figura 4.2.3.4: Mediciones para ángulo de disparo de 90°.

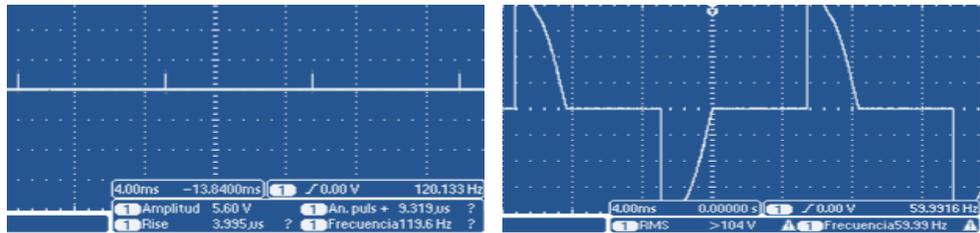


Figura 4.2.3.5: Mediciones para ángulo de disparo de 120°.

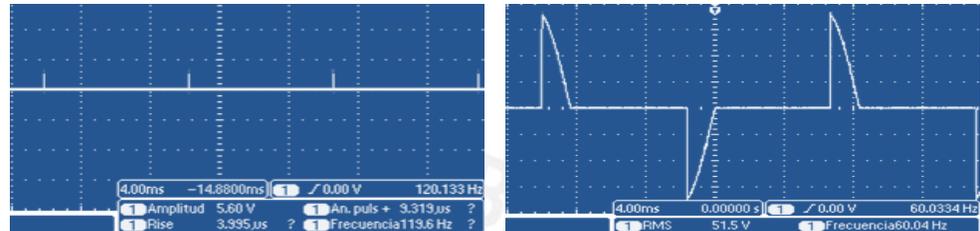


Figura 4.2.3.6: Mediciones para ángulo de disparo de 150°.

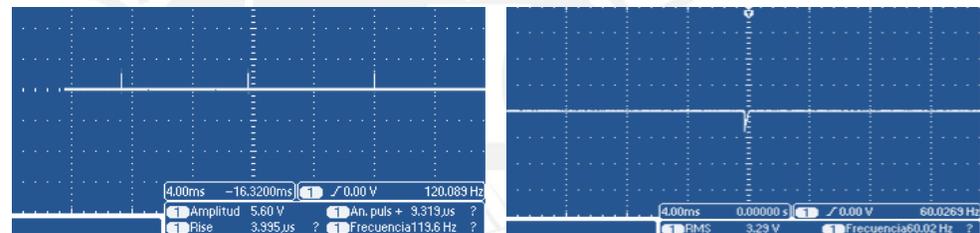


Figura 4.2.3.7: Mediciones para ángulo de disparo de 180°.

4.2.4 Ensayo del circuito de control de temperatura

En este ensayo se ve el comportamiento del circuito de control de temperatura, para lo cual se define una temperatura de referencia (SP) de 80°C, y se mide la temperatura del proceso (PV). Donde se observa que el tiempo de establecimiento es de 50s, un sobrepico de 4°C y un error en estado estacionario de 2°C. Por lo cual se determina que el lazo de control de temperatura se encuentra funcionando de manera correcta. A continuación, la figura 4.2.4 muestra el funcionamiento del circuito de control de temperatura a 80°C.

Control de temperatura

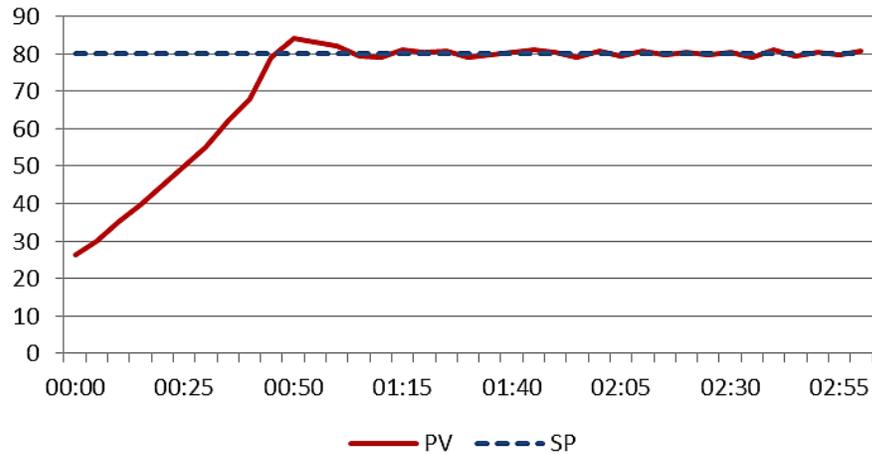


Figura 4.2.4: Funcionamiento del circuito de control de temperatura a 80°C.

4.3 Ensayos del hardware y software del proceso de desplazamiento

4.3.1 Ensayo del circuito de control de motor a pasos

En este ensayo se registra la velocidad del motor a pasos para cada paso (1, 1/2, 1/4 y 1/16), donde se logró definir una velocidad de desplazamiento de 2.4 cm/s a 1/8 de paso la cual es apropiada para mantener la tensión superficial de los reactivos. A continuación, la tabla 4.3.2.1 muestra la relación entre paso y velocidad lineal.

Tabla 4.3.2.1: Número de pasos vs. Velocidad lineal.

Pasos	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Velocidad lineal [cm/s]	4	3.8	3.2	2.4	2

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Ensayos del hardware y software del proceso de dispensado de reactivos.

4.4.1 Ensayo del circuito de control de flujo

En este ensayo se mide de la señal de control que a través del circuito excitador energiza las mini-bombas para la dosificación de reactivos, donde se definió un ciclo de trabajo de 70% (5 mL/s) para la fucsina, alcohol ácido y azul metileno; y un ciclo de 100% para el agua ya que este requiere un mayor flujo (7.2 mL/s). Así mismo, la tabla 4.4.2.1 muestra la relación entre el ciclo de trabajo y el flujo.

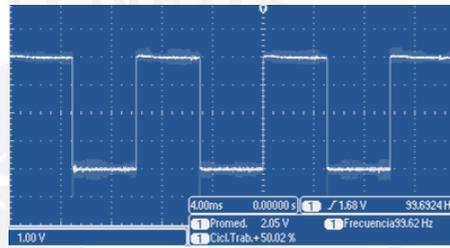


Fig. 4.4.2.1: Señal medida para un ciclo de trabajo del 50%.

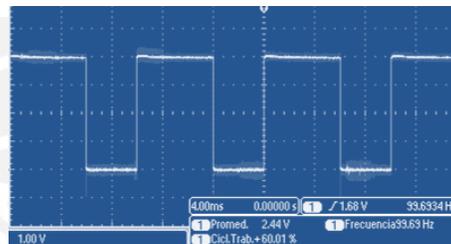


Fig. 4.4.2.2: Señal medida para un ciclo de trabajo del 60%.

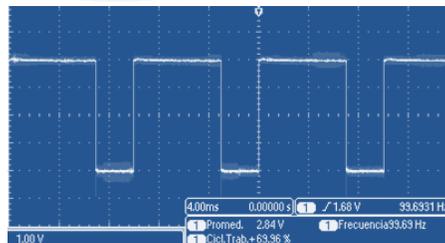


Fig. 4.4.2.3: Señal medida para un ciclo de trabajo del 70%.

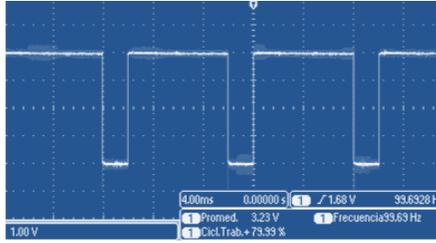


Fig. 4.4.2.4: Señal medida para un ciclo de trabajo del 80%.

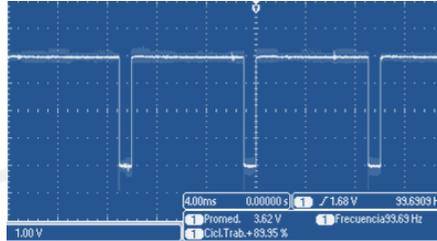


Fig. 4.4.2.5: Señal medida para un ciclo de trabajo del 90%.

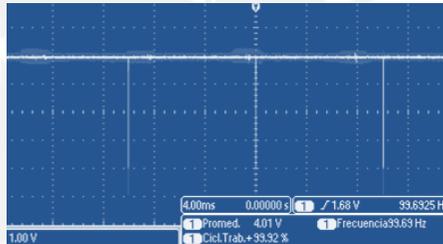


Fig. 4.4.2.6: Señal medida para un ciclo de trabajo del 100%.

Tabla 4.2.1.1: Ciclo de trabajo de la señal PWM vs. Flujo.

Ciclo de trabajo [%]	50	60	70	80	90	100
Flujo [mL/s]	4.1	4.5	5	5.5	6.25	7.2

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se establece que en nuestro país es factible desarrollar un equipo que permita automatizar el proceso de tinción ZN, ya que se cuenta con el personal capacitado, los componentes mecánicos, electrónicos y los insumos necesarios para llevarlo a cabo.
2. Al emplear lámparas halógenas como dispositivo calefactor, se mejora la eficiencia del proceso de calentamiento. Se logra reducir el tiempo de secado de muestras y se obtiene un ahorro en el consumo de energía eléctrica.
3. Se logró verificar el correcto funcionamiento del control de temperatura proporcional donde se observa que este presenta un error menor a 2°C lo cual se encuentra dentro del rango establecido de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ a fin de evitar el sobrecalentamiento de muestras; además, se logra obtener un tiempo de establecimiento de 50 segundos, lo cual agiliza el proceso.
4. Se logró verificar el correcto funcionamiento del circuito de control de posición donde se observa que este presenta un error menor a 0.05 cm lo cual se encuentra dentro del rango de $\pm 0.1\text{ cm}$; por lo tanto, se cuenta con un control de posición de gran precisión gracias al motor a pasos.
5. Se logró verificar el correcto funcionamiento del control de flujo on/off, las mini-bombas permiten lograr un flujo constante, evitando el desperdicio de reactivos.
6. Se logró diseñar el primer prototipo portátil que automatice el proceso de tinción ZN para cuatro muestras de esputo en simultáneo, a fin de que este sistema pueda llegar a reemplazar el método convencional realizado en los centros de salud del país.

RECOMENDACIONES

1. El sistema no cuenta con sensores de nivel que permitan verificar la disponibilidad de reactivos por lo que se recomienda buscar sensores no invasivos que eviten el contacto directo con los reactivos para no afectar el proceso de tinción ZN.
2. Se recomienda que el sistema no dependa en su totalidad del suministro de energía de la red eléctrica (220Vrms/60Hz); por lo que el sistema podría funcionar con una batería. Así mismo, se debe evaluar el uso de otro calefactor que requiera corriente continua; caso contrario, se debe realizar el diseño de un circuito inversor para energizarlo.
3. Para obtener un control de temperatura de mayor precisión se recomienda emplear un circuito acondicionar de señal que amplifique la señal de 0-1V a 0-5V (rango de operación 0 -100°C).
4. El circuito detector de cruce por cero actual requiere de un transformador 220V/12V. Se puede prescindir de este, el cual ocupa mucho espacio mediante un circuito divisor de tensión con resistencias de alta potencia siempre y cuando se evite el sobrecalentamiento de las resistencias.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO)
2015 Tuberculosis Nota descriptiva N°104 [en línea] [Revisado el 25/08/2015]
<<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/es/>>
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO)
2007 Tuberculosis fact sheets. [en línea] [Revisado el 01/09/2015]
<<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en/>>
- [3] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO)
2015 Global tuberculosis report 2015. [Consultado 24/03/2016]
<http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/191102/1/9789241565059_eng.pdf?ua=1>
- [4] MINISTERIO DE SALUD
2014 Situación de la Tuberculosis en el Perú y política nacional para su control. [Consultado 23/09/2015]
<<http://190.223.45.115/newtb/Archivos/RecursoInformacion>>
- [5] Chávez, Manuel
2013 Validación del preparador automático de muestras de esputo para el diagnóstico de TBC. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [6] Anuja, Holani
2014 Demonstration of Mycobacterium Tuberculosis in Sputum and Saliva Smears of Tuberculosis Patients Using Ziehl Neelsen and Flurochrome Staining-A Comparative Study. [en línea] [Revisado el 28/08/2015]
<<http://eds.a.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/eds>>

- [7] INSTITUTO NACIONAL DE SALUD
1995 Manual de normas y procedimientos en bacteriología de Tuberculosis [en línea]. Serie de normas técnica. Lima. Mayo 1995. [Consultado 23/09/2015].
<http://www.bvs.ins.gob.pe/insprint/salud_publica/nor_tec>
- [8] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO)
2013 Tuberculosis diagnostics Xpert MTB/RIF Test. [en línea] [Revisado el 30/08/2015]
<http://who.int/tb/features_archive/factsheet_xpert>
- [9] Ogata, Katsuhiko
2010 Ingeniería de control moderna. Quinta edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- [10] Ogata, Katsuhiko
1995 DISCRETE-TIME CONTROL SYSTEMS. Segunda edición. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [11] Liu, Cuihong
2011 The application of soil temperature measurement by LM35 temperature sensors [en línea] [Revisado el 17/03/2016]
<<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6023459>>
- [12] Ávila, Ricardo
2015 Diseño y desarrollo de un prototipo preparador de siete muestras biológicas basado en la tinción de Ziehl-Neelsen para baciloscopía. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.