

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

REVISIÓN DE UN PROTOTIPO DE AGITADOR
ELECTROMECAÁNICO CON MOVIMIENTO ORBITAL Y DISEÑO
DE SUS MEJORAS

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

Diego Panizo Ríos

ASESORES: Willy Eduardo Carrera Soria
Sayda Estela Mujica Bueno

Lima, marzo del 2011

RESUMEN

La presente tesis parte de la revisión de un prototipo de agitador electromecánico (equipo ampliamente utilizado en laboratorios clínicos y hospitales) con movimiento orbital y control de temperatura, velocidad y tiempo, la cual otorgó la información necesaria para el diseño de sus mejoras. La misma abarca desde el respaldo teórico necesario que fundamenta la investigación hasta el completo desarrollo del tema planteado.

La investigación tuvo como objetivo principal dar una completa revisión a un prototipo de agitador ubicado en el laboratorio de electrónica de la PUCP, el cual fue construido dentro de las actividades del Grupo de Desarrollo de Equipos para Laboratorios Biológicos (EquiLaB) varios años atrás (del cual no se poseía información alguna). La revisión buscó otorgar las bases necesarias para proceder a realizar observaciones, recomendaciones y diseños necesarios para que, al ser implementados, mejoren el funcionamiento del prototipo con miras a convertirse en un producto terminado que pueda competir en funcionamiento y costo contra los equipos agitadores comerciales.

Tras la realización del marco teórico y problemático que acompañan la investigación se procede a realizar la revisión del prototipo. Esta fue dividida en las diferentes partes a revisar que contenía el equipo, siendo estas, la electrónica, el motor DC, la mecánica, el control de temperatura y la programación. Cada una de las secciones revisadas va acompañada de las correspondientes observaciones, recomendaciones y/o diseños necesarios según la sección que se revisa. En el caso de los diseños propuestos para la sección del control de temperatura, estos fueron simulados a fin de observar su correcto funcionamiento. Asimismo, cada recomendación y/o observación realizada se basa en el estudio y en los ensayos realizados como parte de la revisión del prototipo y se respaldan en estos.

Una vez finalizada la revisión e investigación de las posibles mejoras los resultados se compararon con los objetivos iniciales propuestos, llegando a la conclusión que de implementar los diseños realizados y de seguir las recomendaciones propuestas, será posible, tras las pruebas y estudios correspondientes, obtener un producto que posea funcionalidades comparables a las de un agitador comercial con un posible menor costo, como se muestra en el presupuesto presentado en el presente documento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1: EQUIPOS AGITADORES

1.1.	Agitadores	4
1.2.	Sobre la agitación	4
1.3.	Sobre la temperatura	5
1.4.	Funcionalidades relevantes	6
1.5.	Usuales problemas en la revisión	7
1.6.	Declaración del marco problemático	8

CAPITULO 2: AGITADOR PUCP

2.1.	Estado del arte	9
2.1.1.	Presentación del asunto de estudio	9
2.1.2.	Estado de la investigación	10
2.1.3.	Electrónica a aplicar	14
2.2.	Conceptualizaciones generales	16
2.3.	Definiciones operativas para la selección de parámetros del agitador PUCP	17
2.3.1.	Indicadores cuantitativos	17
2.4.	Hipótesis	19
2.5.	Objetivos	19
2.5.1.	Objetivo general	19
2.5.2.	Objetivos específicos	19

CAPITULO 3: REVISIÓN, Y DISEÑO DE LAS MEJORAS

3.1.	Revisión de la electrónica del prototipo y diseño de sus mejoras	20
3.1.1.	Obtención y descripción de los circuitos esquemáticos	20
3.1.2.	Revisión del consumo de corriente de las fuentes de alimentación	25
3.1.3.	Diseño de la nueva fuente de alimentación	27
3.2.	Revisión del motor DC encargado del movimiento orbital y consideraciones a tomar	27
3.2.1.	Identificación del motor DC	27

3.2.2.	Desventajas del motor DC actual y consideraciones necesarias	29
3.3.	Revisión de la mecánica del prototipo	29
3.3.1.	Dimensionamiento del prototipo	29
3.3.2.	Flujo de aire dentro del prototipo	31
3.3.3.	Recomendaciones para la mecánica de la bandeja y sus rodamientos	32
3.3.4.	Revisión del aislamiento térmico del prototipo	33
3.4.	Revisión del control de temperatura y diseño de sus mejoras	35
3.4.1.	Selección del nuevo sensor de temperatura	37
3.4.2.	Circuito de acondicionamiento para el sensor TD5A	39
3.4.3.	Revisión de la técnica de control	42
3.5.	Revisión de la programación y modificaciones necesarias	44
3.5.1.	Revisión de la programación	44
3.5.2.	Modificaciones necesarias en la programación	46
<u>CAPITULO 4: SIMULACIONES DE LAS MEJORAS</u>		
4.1.	Simulación del circuito de acondicionamiento para el sensor TD5A	47
4.2.	Simulación del control proporcional en el prototipo de agitador	48
4.3.	Presupuesto aproximado para la realización del prototipo	51
<u>CONCLUSIONES</u>		52
<u>RECOMENDACIONES</u>		54
<u>BIBLIOGRAFIA</u>		55

INTRODUCCIÓN

La necesidad por contar con equipos de agitación o mezclado en laboratorios, hospitales y/o clínicas en nuestro país así como en diversas partes del mundo ha sido siempre de gran importancia en la investigación y análisis de distintos tipos de muestras biológicas. En el caso particular de nuestro país si bien muchos de los laboratorios particulares, que en la mayoría de los casos pertenecen a grupos de laboratorios internacionales [1], cuentan con el presupuesto suficiente para la adquisición de estos equipos, los centros de análisis médicos estatales no cuentan, en su mayoría, con los medios suficientes para la adquisición e importación de los mismos.

El presupuesto se convierte en un factor de gran relevancia en la adquisición de estos equipos, debido a que los costos de los mismos son bastante elevados por ser, en su mayoría, de fabricación extranjera, con componentes y mantenimiento también con la misma procedencia. Son frecuentes los casos, que por falta de mantenimiento o de tener que acudir a personal calificado del extranjero para su reparación; estos equipos han tenido que ser dados de baja; así también el presupuesto de los centros de análisis médicos nacionales es, en planos generales, aproximadamente de un cuarto del presupuesto promedio de la región latinoamericana [2] [3].

Dentro de las actividades del Grupo de Desarrollo de Equipos para Laboratorios Biológicos (EquiLaB) de la Sección de Electricidad y Electrónica de la PUCP [4] se ha venido trabajando en el desarrollo de un prototipo de agitador, habiéndose construido uno a partir de componentes de venta nacional pero que tiene problemas en el desempeño de sus funciones, lo cual le resta competitividad (respecto de agitadores comerciales). La revisión de este prototipo y el diseño de sus mejoras, tema de esta tesis buscan que este pueda alcanzar un desempeño similar al de los equipos comerciales, con una posible reducción de costos en comparación a los equipos que deben ser importados.

CAPÍTULO 1

EQUIPOS AGITADORES

1.1. Agitadores

La falta de equipos para agitación con control de temperatura en laboratorios modernos sería difícil de imaginar puesto que los mismos son los encargados de propiciar reacciones entre distintas sustancias o el crecimiento en cultivos biológicos que de manera natural no se producirían dado que requieren de condiciones muy particulares para su desarrollo. Por ejemplo existen microorganismos que en función de su temperatura tienen un crecimiento que puede ser mínimo, máximo u óptimo, y que sin una buena agitación no serían capaces de absorber el oxígeno necesario para su desarrollo.

1.2 Sobre la agitación

Ante todo es necesario reconocer a la agitación como el proceso de aceleración y creación de un contacto entre fases [6]. A partir de este concepto analizaremos todos los diversos beneficios que podemos conseguir mediante el uso de agitadores para los análisis de laboratorio.

La agitación incrementa la velocidad de transferencia de oxígeno desde las burbujas de aire al medio líquido necesaria en el proceso de fermentación aeróbica, tanto en la totalidad de su desarrollo o en ciertos periodos [5]. Con la agitación se logra el aumento en la transferencia de oxígeno y nutrientes, hacia los microorganismos; así también, debido a que el movimiento evita que las células creen áreas estancadas con bajos niveles de oxígeno y nutrientes, además de impedir la formación de agregados celulares [5]. También se aumenta la transferencia de productos metabólicos y la tasa o eficiencia de la transferencia de calor entre las células y el medio, y entre el medio y las superficies respectivamente.

Los microorganismos no pueden utilizar oxígeno gaseoso, sino solo el que se encuentra en disolución, lo que refuerza la necesidad de usar agitadores en análisis donde se requiere trabajar con microorganismos aeróbicos.

La agitación también sirve bajo ciertas condiciones para la fermentación microbiana que consiste de un sistema de 3 fases: reacciones líquido-sólido, gas-sólido y gas-líquido.

Se considera en algunos casos a la agitación como esencial para la fermentación puesto que produce los siguientes efectos en las tres fases:

- Homogenización de la temperatura, del pH y de la concentración de nutrientes.
- Suspensión de los microorganismos y de los nutrientes sólidos
- Dispersión de los líquidos inmiscibles [6].

Tras reconocer las principales razones para una adecuada agitación podemos concluir que:

- A una mayor agitación se genera un mayor crecimiento celular.
- Si se excede en la velocidad de agitación se generan efectos negativos, como el rompimiento de células grandes y el incremento de la temperatura lo cual ocasiona un descenso en la viabilidad celular.
- Se debe buscar alcanzar un balance entre la velocidad de agitación y el evitar el daño celular.

1.3. Sobre la temperatura

La temperatura es una de los factores más importantes a considerar en el estudio y control de reacciones catalizadas por encima [8]. Además en el caso del estudio de microorganismos encontramos que cada uno de estos posee una temperatura de crecimiento adecuada. Si consideramos la variación de la velocidad de crecimiento en función a la temperatura, encontramos una **temperatura mínima** por debajo de la cual no hay crecimiento; a medida que se incrementa la temperatura se produce un incremento lineal en la velocidad de crecimiento hasta alcanzar una **temperatura óptima**. Por encima de esta temperatura la velocidad de crecimiento decae rápidamente y se produce la muerte celular [9].

El aumento de la velocidad de crecimiento con respecto a la temperatura se debe al incremento generalizado de la velocidad de reacciones enzimáticas con la temperatura, esto por el aumento de la energía cinética en las moléculas reactantes que incrementa el número de colisiones productivas por unidad de tiempo. Se denomina **coeficiente de temperatura** a la relación entre el incremento de la velocidad de reacción y el de temperatura. La velocidad de las reacciones bioquímicas suele aumentar entre 1.5 y 2.5 veces al aumentar 10°C la temperatura en la que tienen lugar. Muchas reacciones bioquímicas son específicas para determinadas temperaturas [9].

La falta de crecimiento a temperaturas bajas se debe a la reducción de la velocidad de las reacciones químicas y al cambio de estado de los lípidos de la membrana celular de líquidos a cristalinos. A su vez el metabolismo celular se vuelve lento y las células paran de crecer, aunque usualmente mueren [9].

A diferencia con las bajas temperaturas, cuando la temperatura es muy superior a la óptima, por ejemplo las células humanas reaccionan óptimamente a 37 °C y a más de 60 °C , pueden empezar daños irreversibles y llega a producirse la muerte celular y las mismas no pueden recupera su capacidad de división si la temperatura baja nuevamente. Por esto es posible esterilizar por calor más no por frío [9].

Tras reconocer las principales razones para un adecuado control de temperatura podemos concluir que:

- El incremento de la temperatura conlleva a un mayor crecimiento celular.
- Un exceso en la temperatura puede genera la muerte celular.

1.4 Funcionalidades relevantes

La utilización de agitadores electromecánicos con control de temperatura ha sido de gran utilidad en los análisis de laboratorio a lo largo de los años. Gracias al desarrollo de la tecnología tanto en el diseño de controladores y componentes electrónicos, actualmente es posible encontrar agitadores con gran cantidad de funcionalidades y un excelente desempeño en cuanto a control de temperatura y a variación de velocidad de agitación se refiere.

Por otro lado, a pesar de todos los avances en la electrónica que compone a estos equipos, los mismos han ido elevando cada vez más sus costos a medida que adquieren una mayor cantidad de funcionalidades. En algunos casos bastaría con equipos que cumplan con funcionalidades básicas pero suficientes para la mayoría de análisis, más estos son escasos en el mercado o continúan siendo costosos debido a que son importados.

Reconocemos que muchos laboratorios locales tanto los que se encuentran en hospitales en la capital como en provincias, podrían realizar análisis contando con equipos de fabricación local y costos, objetivos de la presente tesis.

1.5. Usuales problemas en la revisión y diseño de equipos agitadores

Variables internas

Tabla 1.1. Variables internas

HECHOS	PROBLEMAS Y CAUSAS
1) Tecnología a reversa sobre circuitos de los cuales no se tiene información	La falta de información acerca de circuitos electrónicos previamente implementados, introduce el problema que conlleva el revisarlos, y a partir solo de esta revisión y de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera determinar su funcionamiento, para dar inicio a la etapa de rediseño de los circuitos necesarios.
2) Estabilidad de la temperatura al interior de la cámara del agitador.	La temperatura al interior del agitador se vera afectada por una serie de variables como son: el intercambio de calor natural entre el interior del agitador a una mayor temperatura con el exterior a una temperatura menor, por lo que el acondicionamiento del mismo deberá ser adecuado para reducir esta pérdida; la circulación del aire inducido al interior del agitador a través de ventiladores; y el sensado de la temperatura que de no ser el adecuado producirá una mala lectura de la temperatura en el interior del agitador.
3) Estabilidad de la velocidad de rotación.	La velocidad de rotación controlada por el motor DC al interior del agitador se verá afectada por la precisión de la señal PWM enviada para el control del mismo. Además, el peso propio de la bandeja y de los matraces o vasijas afectará la velocidad de rotación del motor la cual deberá ser sensada para ser

	compensada.
4) Estabilidad en el movimiento de rotación.	La posición de la bandeja del agitador así como su ubicación y soporte dentro del mismo son de gran importancia si se quiere conseguir un movimiento uniforme, evitando inclinaciones o golpes. Para esto la bandeja deberá tener las medidas, y los soportes la forma adecuada para lograr un movimiento uniforme.
5) Relación precio/calidad	En el mercado de equipos de laboratorio, como son los agitadores, existen gran variedad de precios según la calidad de los equipos. Los agitadores incluso sin control de temperatura ya tienen precios elevados, y si ha esto le agregamos funcionalidades extras como el control de temperatura estos precios se elevan de sobremanera.

1.6. Declaración del marco problemático

La revisión del mejoramiento del prototipo de agitador PUCP conllevará a dificultades propias de una revisión sobre un equipo del cual no se tiene información, en cuanto a su diseño electrónico se refiere.

Solo una vez concluida la etapa de revisión será posible iniciar el diseño de las mejoras necesarias para lograr un correcto funcionamiento en el prototipo de agitador. Las mejoras ha diseñar deberán buscar solucionar los problemas propios de los principales parámetros de control del prototipo, como son la temperatura, la velocidad de agitación, el tiempo y el tipo de movimiento correcto.

Una vez finalizado el diseño y las pruebas respectivas con las secciones que componen al prototipo de manera individual y conjunta, podremos determinar si se conseguirá un prototipo con funcionalidades comparables a la de los equipos agitadores comerciales, con una reducción en los costos haciendo uso de la tecnología moderna al alcance.

CAPÍTULO 2

AGITADOR PUCP

2.1 Estado del Arte

2.1.1. Presentación del asunto de estudio

La agitación y el control de temperatura en el análisis de muestras biológicas siempre han sido de gran importancia para aumentar la calidad de los resultados de los análisis en los que estas variables están implicadas. Entendemos por agitación a la acción de mover con una determinada frecuencia, en este caso a las muestras biológicas y por control de la temperatura al sostenimiento de la temperatura en un valor o nivel deseado.

La falta de equipos para la agitación con control de temperatura en laboratorios modernos sería difícil de imaginar puesto que los mismos son los encargados de propiciar reacciones entre distintas sustancias o el crecimiento en cultivos biológicos que de manera natural no se producirían dado que requieren de condiciones muy particulares para su desarrollo. Por ejemplo existen microorganismos que en función de su temperatura tienen un crecimiento que puede ser mínimo, máximo u óptimo, y que sin una buena agitación no serían capaces de absorber el oxígeno necesario para su desarrollo [7].

En la presente investigación se presentaran los principales tipos de movimiento de agitación así como una serie de equipos agitadores comerciales que darán los parámetros a ser utilizados como meta a alcanzar al finalizar la misma. Para lograr alcanzar estos parámetros, el prototipo de agitador PUCP será revisado y se diseñaran las mejoras convenientes, aplicando los conocimientos de electrónica adquiridos a lo largo de la carrera.

Asimismo, se hará mención de las principales tecnologías a utilizar en el diseño de las mejoras necesarias para el prototipo de agitador.

2.1.2 Estado de la investigación

Tipos de movimiento en agitadores electromecánicos

Los Agitadores se categorizan principalmente por el tipo de movimiento de agitación que poseen dependiendo del uso que se les va a dar, lo tipos de movimiento más conocidos son: Alternativo, balanceo, rodante, orbital, de rotación y de muñeca [10].

Movimiento alternativo

En el movimiento alternativo la plataforma del Agitador se mueve de manera alternante hacia delante y atrás. Ver figura 2.1.



Figura 2.1. EF4909K - FINEPCR® [18]

Movimiento de balanceo

Los Agitadores de tipo balanceo son capaces de realizar un movimiento de balanceo o de subibaja. Son especialmente aptos para pruebas de aglutinación en placas o policubetas y en general para toda práctica de laboratorio en que se precise una mezcla suave y lenta, por balanceo [11]. Ver figura 2.2.



Figura 2.2. 2138B - DAIGGER® [18]

Movimiento rodante

Los Agitadores de tipo rodante se deslizan de lado a lado con una ligera inclinación o declive en cada movimiento. Este tipo de agitador es comúnmente usado durante el proceso de extracción de sangre en la agitación de las bolsas. Ver figura 2.3.



Figura 2.3. EF8934A – Techne [18]

Movimiento orbital

Los Agitadores de tipo orbital son la variedad más comúnmente usada en pruebas de laboratorio. Estos crean un movimiento de tipo orbital suficiente para la agitación de muestras en frascos y propiciar en crecimiento o cultivo celular [10]. Es el más flexible en las condiciones de operación y provee una eficiente transferencia de gases a las células [6]. La mayoría de Agitadores del mercado son de este tipo. Ver figura 2.4.



Figura 2.4. EF22403B – Thermo Scientific MAXQ [18]

Movimiento de rotación

Los Agitadores con movimiento de rotación giran sobre un eje y funcionan de forma parecida a una centrífuga aunque no logran alcanzar la misma velocidad. Son usados usualmente para el mezclado de muestras de sangre con anticoagulante, inmediatamente después de las extracciones y en el lugar mismo donde se llevan a cabo. También son usados para efectuar y mantener, en general, todo proceso de solución o suspensión homogénea que se requiera en análisis de laboratorio [12]. Ver figura 2.5.



Figura 2.5. EF4898D - FINEPCR® [18]

Movimiento tipo muñeca

Los Agitadores con movimiento de tipo muñeca o de movimiento manual, replican el movimiento de agitación manual. Estos cuentan con extensiones unidad al módulo las cuales se encargan de girar y balancear las muestras cuando se encuentra encendido e imitar el movimiento manual. Ver figura 2.6.

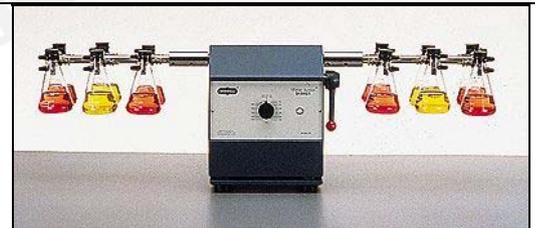


Figura 2.6. EW-51100-35 – Wrist-Action® [18]

Equipos de agitación comerciales

Actualmente existen gran cantidad de distintas compañías dedicadas a la fabricación de equipos de laboratorio, entre los cuales se encuentran los agitadores electromecánicos con movimiento orbital, tanto con y sin control de temperatura.

Como veremos, estos equipos tienen especificaciones similares y costos bastante elevados según la compañía y las funcionalidades de los equipos.

FINEPCR® Thermo Rotisserie/Orbital Shaker

El control digital del microprocesador proporciona la máxima precisión. Una puerta sellada mantiene la temperatura programada mientras que la construcción de doble aislamiento ayuda a recuperar la temperatura seleccionada rápidamente después de abrir la puerta. Los equipos de seguridad incluyen luz de alarma intermitente para advertir de la condición de exceso de temperatura, exceso de temperatura de corte, termostato de seguridad de exceso temperatura e interruptor electrónico de seguridad en la puerta. Algunas características de funcionamiento: [13]

- Rango de velocidad: Rotación 0-400 rpm
Agitador 0-300 rpm
- Tamaño Orbital: 18mm
- Temperatura: +5 ambiente -80°C
- Tiempo: 0-180minutos o continuo
- Precio promedio: \$2,800



Figura 2.7. Digital Thermo Rotisserie Shaker 4894LZ mostrado con una plataforma de agitación 4895QQZ y frascos de 6 x 250 mL [13]

LabGenius™ WiseMix® Digital Orbital Shakers

Estos agitadores orbitales digitales son ideales para el cultivo de células para la hibridación; para teñir y decolorar geles, y la química combinatoria. De alta precisión, la rotación de velocidad digital y temporizador, se establece mediante una perilla "gire y presione". Un LCD indica las rpm, el tiempo y una gráfica de la potencia. Se utiliza el interruptor de traslados para alternar entre los valores de rpm y el tiempo. Un modo de bloqueo desactiva el interruptor de la entrada.

Inicio suave, incluso cuando se cambia la velocidad de agitación durante la operación. Almacenamiento para el programa de la función, el número de rpm, y el temporizador. El modo de bloqueo desactiva el interruptor de traslados. La alarma suena cuando el temporizador ha finalizado o se ha producido un error. Algunas características de funcionamiento: [14]

- Rango de velocidad: 10-300 rpm
- Temporizador: 99horas-59minutos
- Precio promedio: \$1,100



Figura 2.8. Agitador orbital 7868B mostrado con plataforma universal 7868G
[14]

Thermo Scientific MaxQ Incubated/Refrigerated Orbital Shakers

Incubadoras sobremesa / Agitadores refrigerados

Se utiliza estos agitadores incubados para el cultivo de una amplia gama de organismos en placas de micropocillos y frascos de hasta 2 litros. Hibridación, preparaciones de plásmidos, ADN fingerprints se pueden realizar con el modelo de alta temperatura. La temperatura de la cámara puede ser controlada con precisión y control en toda la gama con el microprocesador PID. El bloqueo de seguridad detiene el movimiento de la plataforma cuando la tapa está abierta. La tapa de policarbonato da visión sin obstrucciones de las muestras. . Algunas características de funcionamiento son: [15]

- Rango de velocidad: Modelos analógicos 40-400rpm
Modelos digitales 15-500 rpm
- Tamaño orbital: 2cm
- Carga máxima: 50libras a 400rpm
- Uniformidad de temperatura: ± 0.5 a 37°C
- Exactitud de temperatura: ± 0.1 a 37°C
- Temporizador: Modelos analógicos 1 a 60 minutos
Modelos digitales 0.1 a 999 horas
- Precio promedio: \$8,000



Figura 2.9. Agitador para mesa de trabajo incubado/refrigerado 22403A [15]

2.1.3 Electrónica a aplicar

Control de motores DC con PWM

Existen dos métodos principalmente utilizados para el control de motores DC: el control lineal y el comúnmente usado control por modulación de ancho de pulso o PWM [20]. El método probablemente utilizado en el prototipo es el de control por PWM, esto debido a que es el método más comúnmente utilizado. Esto se comprobará al realizar la revisión del mismo.

El control por PWM es controlado por una única fuente DC, con un amplificador interno cambiando el poder de prendido ha apagado a una determinada frecuencia y ha un determinado ángulo de disparo, dando como resultado una potencia media (en términos de voltaje y corriente) controlada. La frecuencia del control PWM es usualmente dada a partir de un circuito externo RC, aunque para el caso particular de la investigación esta frecuencia debió ser dada por un hardware previamente programado [20].

El control de la potencia gracias a este tipo de control da finalmente como resultado la variación de la velocidad del motor DC utilizado para el movimiento orbital de la bandeja del agitador.

Control de temperatura ON/OFF

El control de la temperatura al interior de la cámara del agitador es a través de un control de tipo On/Off. Muchos lazos de control de temperatura funcionan de una forma bastante satisfactoria a través del uso de un control de este tipo [19].

Para la mayoría de aplicaciones, un relé de dos posiciones puede actuar como controlador, aplicando el máximo de calor cuando la temperatura es baja y nada o poco calor cuando la temperatura es alta [19].

Los principales beneficios de este tipo de control de temperatura son:

- (i) El controlador no es más que un switch manejado por el error. Como tal es menos costoso que un controlador con una salida continua variable.
- (ii) Aun más significativo que (i), los actuadores on-off, como por ejemplo un solenoide son casi siempre considerablemente menos costosos que sus contrapartes continuas.
- (iii) El control de temperatura a través de reles on-off es adecuado para muchas aplicaciones [19].

El principal inconveniente de este tipo de control radica en la oscilación que tiene el sistema controlado alrededor de la temperatura programada, la cual depende de la velocidad del sistema y del tiempo de respuesta de los sensores de temperatura.

Tras el análisis de los principales beneficios e inconvenientes que posee este tipo de control de temperatura, se tiene que este se tendrá como técnica de control inicial para analizar el comportamiento del sistema y luego se decidirá si es o no la técnica apropiada para el prototipo.

Análisis de programas

Los tres parámetros a ser controlados en el prototipo de agitador, como son: la velocidad, el tiempo y la temperatura, deben estar programados en base a ciertos algoritmos de control.

Estos algoritmos de control serán revisados en el código del programa implementado para el agitador, los cuales deberán cumplir con el proceso propio de controlar la temperatura en una cámara cerrada, controlar la velocidad de un motor DC sujeto a fuerzas debido al peso de la bandeja del agitador y de las muestras, y controlar el tiempo necesario para cumplir con el parámetro introducido por el operador del prototipo.

Una vez que estos algoritmos sean revisados se indicaran las modificaciones necesarias que deban ser realizadas en el programa (software) para que

posteriormente puedan controlar las mejoras diseñadas (hardware) que estarán en contacto directo con los parámetros a controlar.

Diseño electrónico

Para que el desarrollo de las mejoras en el prototipo de agitador sean posibles y para que los parámetros del mismo puedan encontrarse dentro de los niveles buscados en la presente investigación, será necesario diseñar circuitos electrónicos que complementen a la teoría aplicada en la revisión y el mejoramiento, así como a las modificaciones en la programación.

El diseño de estos circuitos electrónicos se basa en la teoría general sobre circuitos así como en circuitos electrónicos convencionales utilizados en este tipo de aplicaciones, a fin de cumplir con los parámetros de tiempo, velocidad y temperatura del prototipo.

2.2 Conceptualizaciones generales

Agitador

Un agitador es un dispositivo o aparato utilizado para agitar o revolver líquido [16].

Electromecánico

Un dispositivo o aparato electromecánico es aquel compuesto por componentes mecánicos accionados por medio de corrientes eléctricas [16].

Movimiento orbital

El movimiento orbital es aquel que se realiza alrededor de un eje fijo central. Ver figura 2.10.

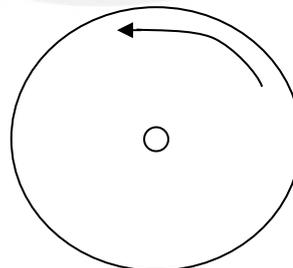


Figura 2.10. Movimiento orbital [Elaboración propia]

Control

El control se define como la regulación manual o automática sobre un sistema. [16]
El objetivo principal de la teoría de control es determinar las señales de control que causaran que un proceso satisfaga las limitaciones físicas y al mismo tiempo minimice (o maximice) algún criterio de rendimiento [17].

2.3 Definiciones operativas para la selección de parámetros del agitador PUCP

2.3.1 Indicadores cuantitativos

Los indicadores cuantitativos, al tratarse de un prototipo que busca contar con un desempeño similar al de los equipos comerciales, deberán ser comparables a los de estos.

Tiempo de agitación

Lo definimos como el tiempo en que el prototipo se encontrara realizando el movimiento de agitación bajo los parámetros ingresados para el proceso. Este tiempo varía en la mayoría de los equipos comerciales pero se buscará alcanzar un tiempo de agitación que este dentro del promedio de los agitadores con movimiento orbital. Algunos tiempos en equipos de agitación se muestran en la Tabla 2.1.

Velocidad de rotación

Lo definimos como la velocidad medida en revoluciones por minuto (RPM) que tendrá el motor del agitador, encargado del movimiento de rotación de la bandeja del mismo. Al igual que con el tiempo de agitación, la velocidad de rotación varía en la mayoría de equipos comerciales por lo que también nos basaremos en la velocidad de rotación de estos para fijarnos una velocidad para el agitador. Algunas de estas velocidades de agitación se muestran en la Tabla 2.1.

Rango de temperatura

Definimos como el rango de temperatura al intervalo dentro del cual el prototipo será capaz de controlar la temperatura interna del mismo. Este parámetro es de gran importancia puesto que, en la mayoría de los casos, como ya se ha estudiado, las muestras biológicas son altamente susceptibles a los cambios de temperatura. Para este parámetro también nos basaremos en los equipos comerciales siendo que estos al ser diseñados específicamente para análisis de laboratorio han seleccionado rangos de temperatura consecuentes con estos. Rangos de temperatura de agitadores con control de temperatura se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros relevantes para distintos modelos de agitadores

Modelo	Tiempo programable	Velocidad de rotación	Rango de temperatura
Prototipo de Agitador PUCP	No funcional	20-255RPM	20-60°C
Unimax Agitador Orbital	0-999min	30-500 RPM	
Thermo Scientific MaxQ 6000 Incubado digital y refrigerado/incubado apilable agitador orbital	0.1 to 999 min; 0.1 to 999 hrs o continuo	15-300 RPM	Ambiente +10 a 80°C
Thermo Scientific MaxQ 4450 agitador con mini repisa incubado y refrigerado/incubado	Modelo análogo: 1-60min Modelo digital: 0.1-999hrs	Modelo análogo: 40-400 RPM Modelo digital: 15-500 RPM	Ambiente +5 a 80°C
Thermo Scientific MaxQ 2508 Doble acción alternativo y orbital	1 a 60 min o continuo	40-400 RPM	
LabGenius™ WiseMix® Agitador orbital digital	99hrs 59min	30-300 RPM	
IKA® Models 130 and 260 Agitador orbital	0 a 9hrs,55min o continuo	0-500 RPM	
FINEPCR® Termo asador/ agitador orbital	0 a 180min o continuo	0-300 RPM	Ambiente +5 a 80°C
Lab Companion™ Agitador orbital incubado de piso con plataforma universal			Ambiente +5 a 60°C
Daigger® Agitador orbital calentador			Ambiente a 70°C

Elaboración: Propia basada en la información del catálogo Daigger® [18]

A partir de los datos recolectados se determino que el tiempo de agitación sería de **0-4hrs 15min** debido a que está dentro del rango de los equipos comerciales y facilita la programación; que la velocidad de rotación sería de **40-400RPM** debido a que se encuentra dentro del rango de los equipos comerciales; y que el rango de temperatura sería de **Tambiente o 20°C a 80°C**, al igual que con los otros parámetros debido a que sería comparable con los equipos comerciales.

2.4 Hipótesis

Dado que el laboratorio de electrónica de la PUCP cuenta actualmente con un prototipo de Agitador construido a partir de componentes de venta nacional, pero que tiene problemas en el desempeño de sus funciones, lo cual le resta competitividad (respecto de agitadores comerciales), **entonces** se revisará y diseñaran las mejoras del prototipo de Agitador digital electromecánico con movimiento orbital y control de temperatura, velocidad y tiempo, buscando así lograr un desempeño similar al de los equipos comerciales, con una posible reducción de costos en comparación a estos.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo general

Revisar un prototipo de Agitador digital electromecánico con movimiento orbital y control de temperatura, velocidad y tiempo, y realizar el diseño de las mejoras correspondientes.

2.5.2 Objetivos específicos

- 1) Revisar y diseñar las mejoras del control de temperatura del prototipo buscando cumpla con calentar el ambiente del Agitador a una temperatura cercana a la programada ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) y en un rango de 20 a 80°C.
- 2) Revisar y diseñar las mejoras del control de velocidad del prototipo para alcanzar velocidades de agitación cercanas a las de los Agitadores comerciales de entre 40 y 400RPM.
- 3) Revisar y presentar recomendaciones para mejorar el movimiento orbital del prototipo, evitando así balanceos y disminución en la velocidad de movimiento.
- 4) Revisar y presentar soluciones para el control de tiempo del prototipo para que cumpla con el valor de tiempo programado para la duración de la agitación en el mismo.
- 5) Revisar y diseñar las mejoras del aislamiento térmico y la circulación de aire dentro del prototipo para uniformizar la temperatura y mantenerla estable en caso sea necesario.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN, Y DISEÑO DE LAS MEJORAS

3.1. Revisión de la electrónica del prototipo y diseño de sus mejoras

3.1.1. Obtención y descripción de los circuitos esquemáticos

El primer paso de la revisión del prototipo de agitador se basó en la obtención, análisis e interrelación de sus circuitos esquemáticos ya que no se contaba con ninguna información de los mismos, esto para determinar su correcto diseño y obtener experiencia adicional acerca de los elementos requeridos para la construcción de un prototipo de agitador electromecánico.

A continuación, se presenta un diagrama de bloques general, seguido por los esquemáticos obtenidos de los circuitos del prototipo con su respectiva descripción.

Diagrama de bloques general

El siguiente diagrama de bloques (figura 3.1.) presenta de manera general la conexión entre las tarjetas que se mostrarán a continuación, salvo las fuentes de alimentación.

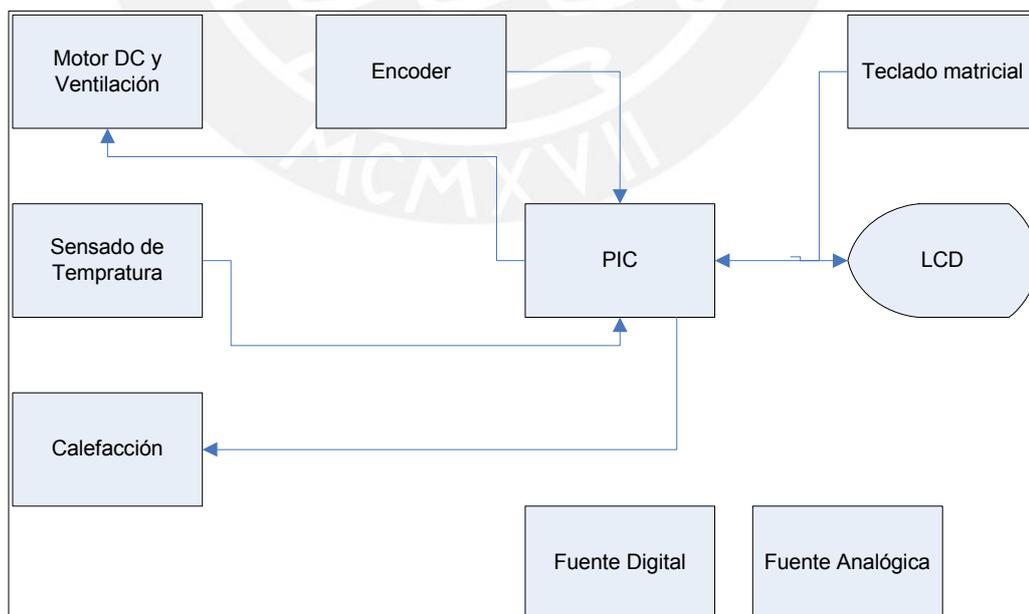


Figura 3.1. Diagrama de bloques general de la interconexión de los circuitos

Tarjeta de control de las resistencias calefactoras

La tarjeta de control de las resistencias calefactoras (dos resistencias de 500W), consiste en un triac (BTA10) activado mediante un optotriac (MOC3041) el cual es controlado por un nivel alto en el PIC (16F877) pasando por un transistor como interruptor (2N3904), como se observa en la figura 3.2.

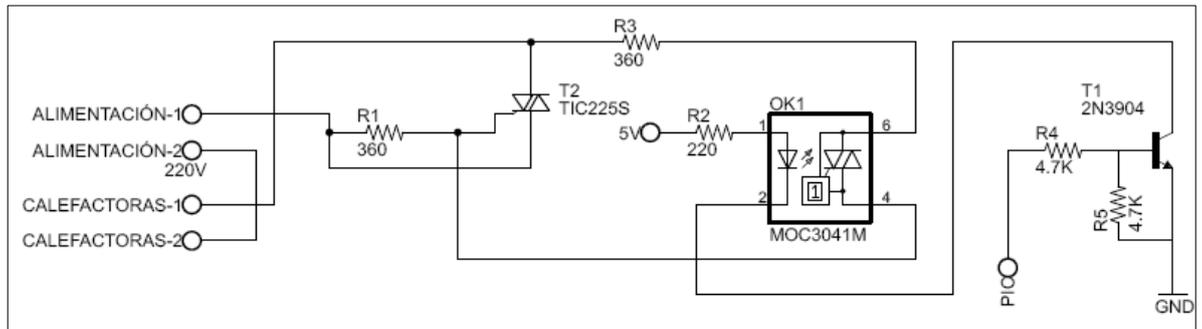


Figura 3.2. Tarjeta de control de las resistencias calefactoras

Determinación de la potencia eléctrica de las resistencias calefactoras

Para determinar la potencia eléctrica de las resistencias calefactoras fue necesario determinar la resistencia óhmica de las mismas, ya que al ser estas alimentadas por 220V AC bastaría aplicar la ley de Ohm para determinar su potencia. Para esta medición se utilizó un multímetro FLUKE 23 que dio el valor para las resistencias de 97Ω y aplicando la ley de Ohm se obtuvo:

$$P = \frac{220V^2}{97\Omega} = 500W$$

Esta potencia es la misma para las dos resistencias ubicadas en la parte inferior del prototipo y que sirven como fuente de calor para el mismo, las cuales pueden elevar la temperatura hasta el objetivo deseado ($80^{\circ}C$).

Tarjeta de control del motor DC y ventiladores

La tarjeta encargada del control del motor DC que proporciona el movimiento orbital y de los ventiladores que generan el flujo de aire dentro del prototipo consiste de dos circuitos independientes. Ver figura 3.3.

El primero es el encargado del control del motor DC. El driver para el mismo consiste en un puente H (L298) habilitado y controlado mediante el PIC (16F877). Las señales enviadas por el PIC pasan a través de un buffer (SN74LS244N) y luego a través de dos opto interruptores (4N33) y un buffer adicional (TL082)

respectivamente. Tanto la habilitación como la entrada del L298 son a través de lógica inversa (nivel bajo necesario para la activación).

El segundo circuito es el encargado del control de la ventilación en el prototipo. Este consiste en un mosfet (IRF540) activado por el PIC(16F877) mediante un buffer (SN74LS244N). El control del mosfet es a través de un driver constituido por un opto interruptor (4N33) y un transistor (2N3904). La lógica de este circuito es positiva (nivel alto para la activación), esta se obtuvo del análisis del programa encontrado en el PIC y el cual se encuentra en los anexos de la presente tesis.

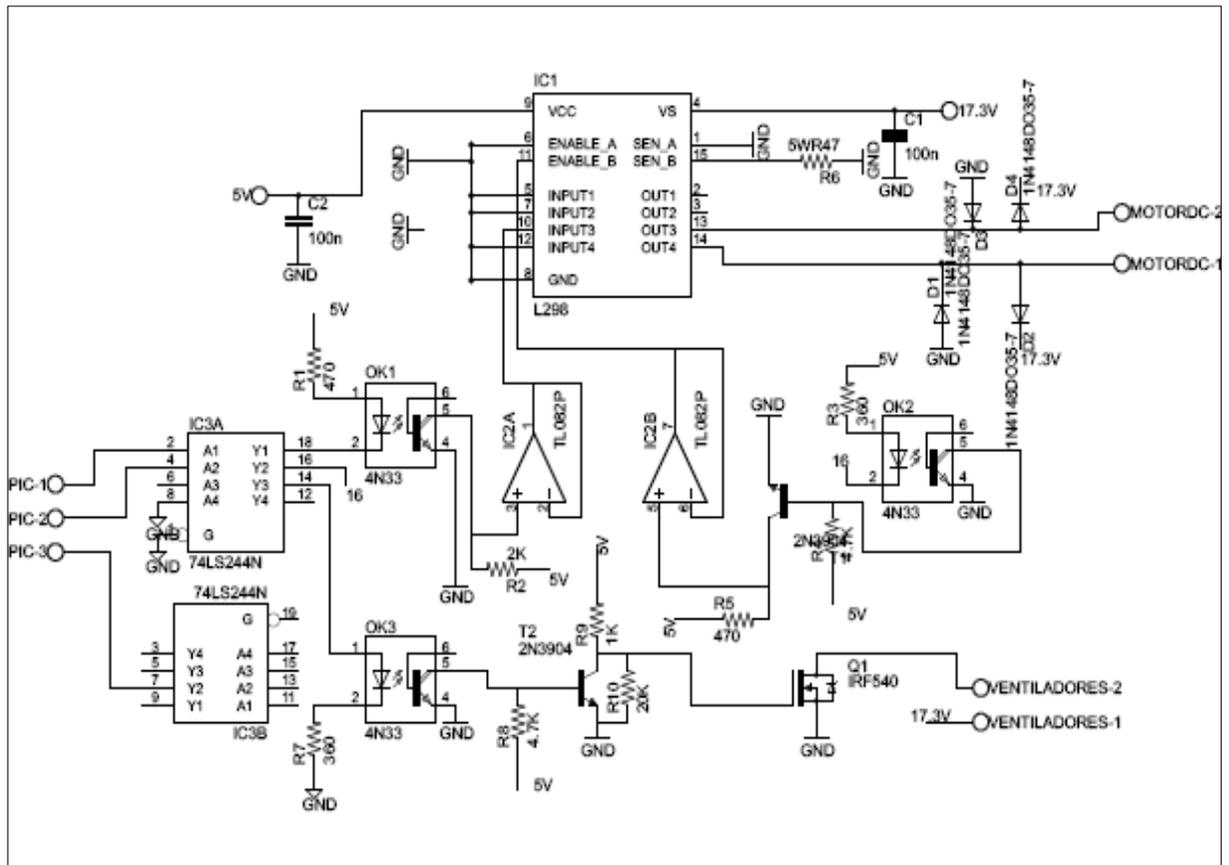


Figura 3.3. Tarjeta de control del motor DC y ventiladores

Tarjeta de encoder y acondicionamiento del encoder

La tarjeta del encoder encargado de sensar el movimiento del motor DC, consiste en una primera pequeña tarjeta, la cual está sujeta al motor, compuesta básicamente por el encoder (H21A1) y su alimentación. Existe una segunda tarjeta que es la encargada del acondicionamiento de la señal enviada por el encoder, formada por un comparador y un buffer (UA741CN) previos a que la señal sea enviada al PIC (16F877). Ambas tarjetas se muestran en la figura 3.4.

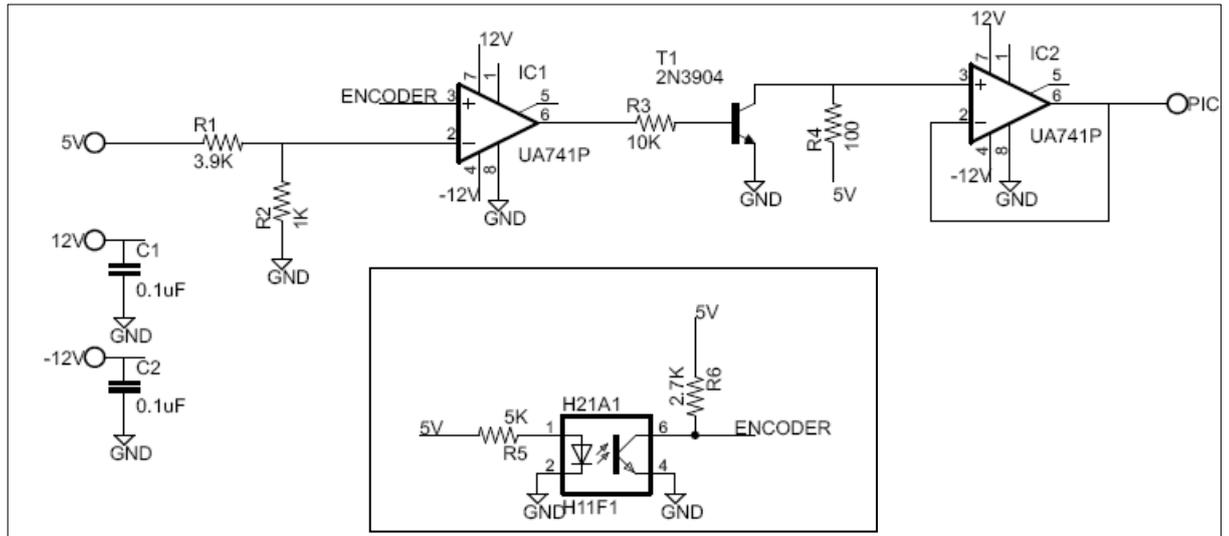


Figura 3.4. Tarjeta del encoder y acondicionamiento del encoder

Tarjetas de acondicionamiento para los sensores de temperatura

Las tarjetas de acondicionamiento para los dos sensores de temperatura (LM335) con los que cuenta el prototipo de agitador consisten en un amplificador (LM308) para la señal de referencia proveniente de un zenner de 2.5V (LM336) y un amplificador de instrumentación (TL084CN) que envía la señal directamente al PIC (16F877). Ver figura 3.5.

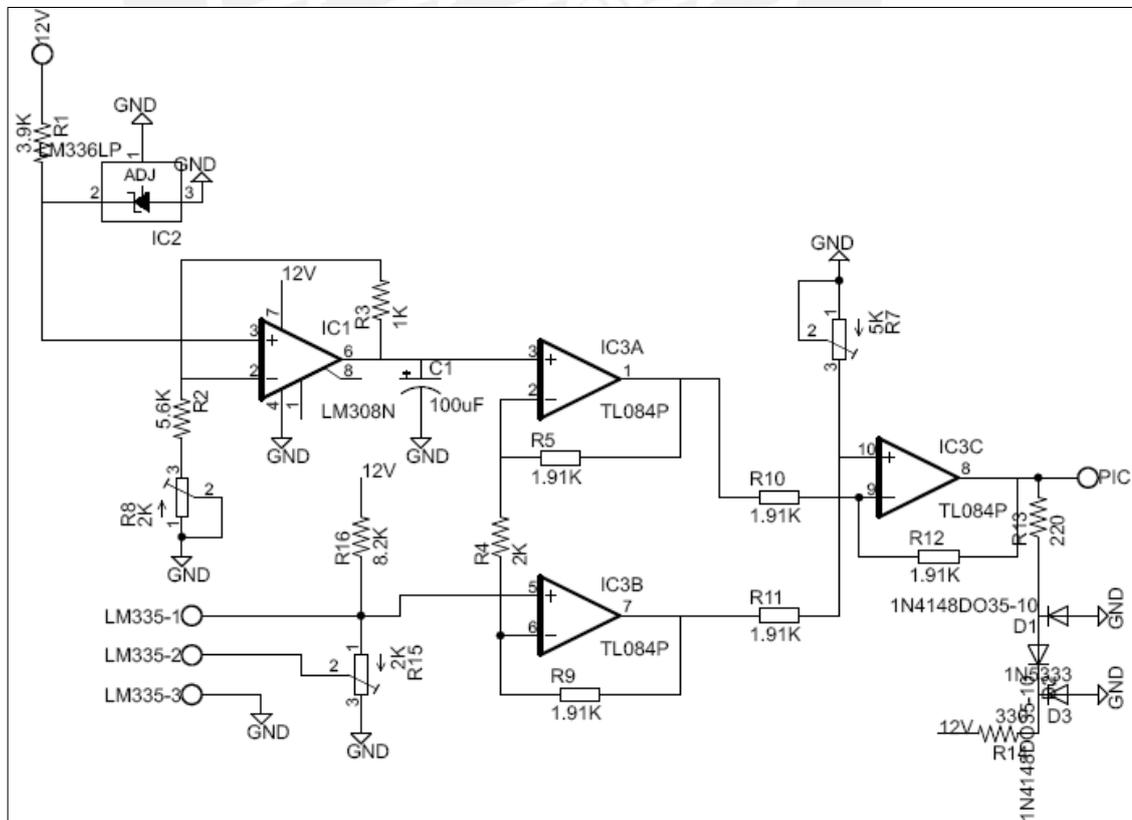


Figura 3.5. Tarjeta de acondicionamiento para los sensores de temperatura

Tarjeta del PIC 16F877

La tarjeta del PIC16877 de la compañía MICROCHIP cuenta con este dispositivo como elemento central y todas las salidas necesarias para su interconexión con todas las demás tarjetas y elementos adicionales como la pantalla LCD (PM50037N) y el teclado matricial, como se muestra en la figura 3.6.

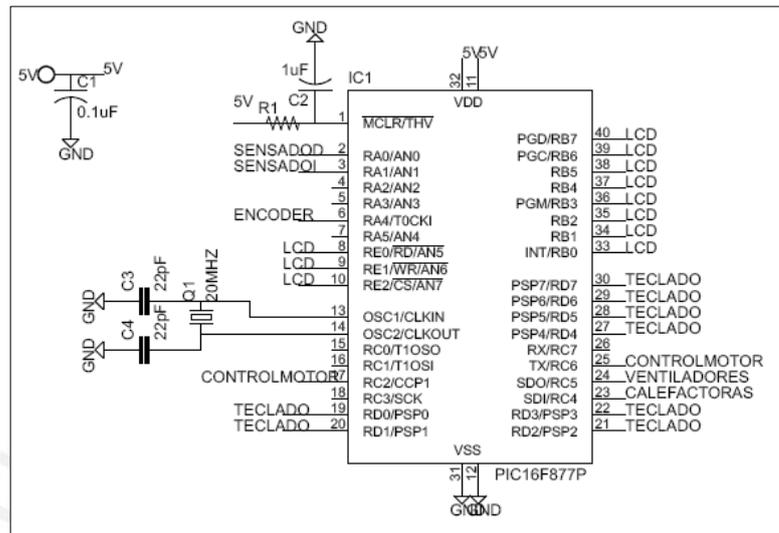


Figura 3.6. Tarjeta del PIC

Tarjeta de la fuente digital

Esta fuente es la encargada de proporcionar todos los voltajes de control digitales, esto es, alimentar todas las tarjetas salvo la tarjeta de control del motor DC y de la ventilación del prototipo la cual cuenta también con voltajes suministrados por la fuente analógica. Esta cuenta con salidas de +12V, -12V y 5V. Para los voltajes de ±12V se cuenta con un transformador de 220/15V con toma central y para el de 5V se tiene un transformador de 4 bobinados, siendo para este voltaje usado el bobinado de 220/7V. Figura 3.7.

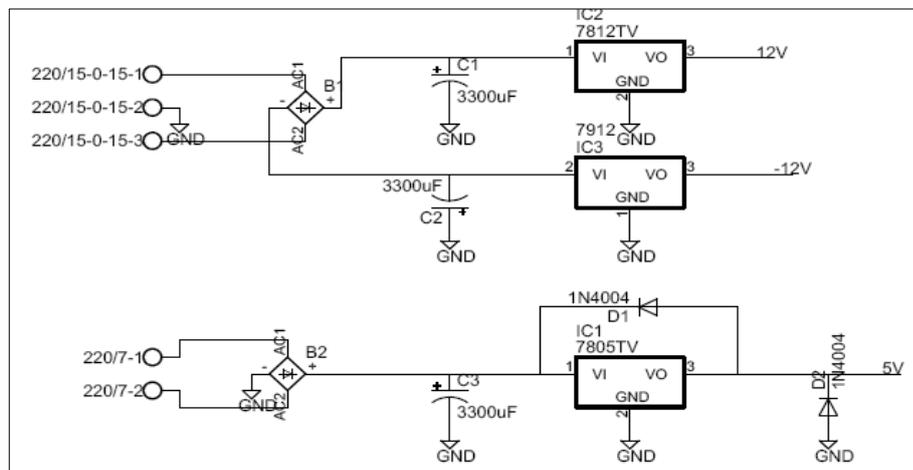


Figura 3.7. Tarjeta de la fuente digital

Tarjeta de la fuente analógica

La tarjeta de la fuente analógica es la encargada de proporcionar todos los voltajes de control y potencia para la tarjeta de control del motor DC y los ventiladores del prototipo. Cuenta con salidas de +12V,-12V,+5V y una salida regulable usada para la alimentación del motor DC y de los ventiladores fijada al momento de las mediciones en 17.6V, como se muestra en la figura 3.8.

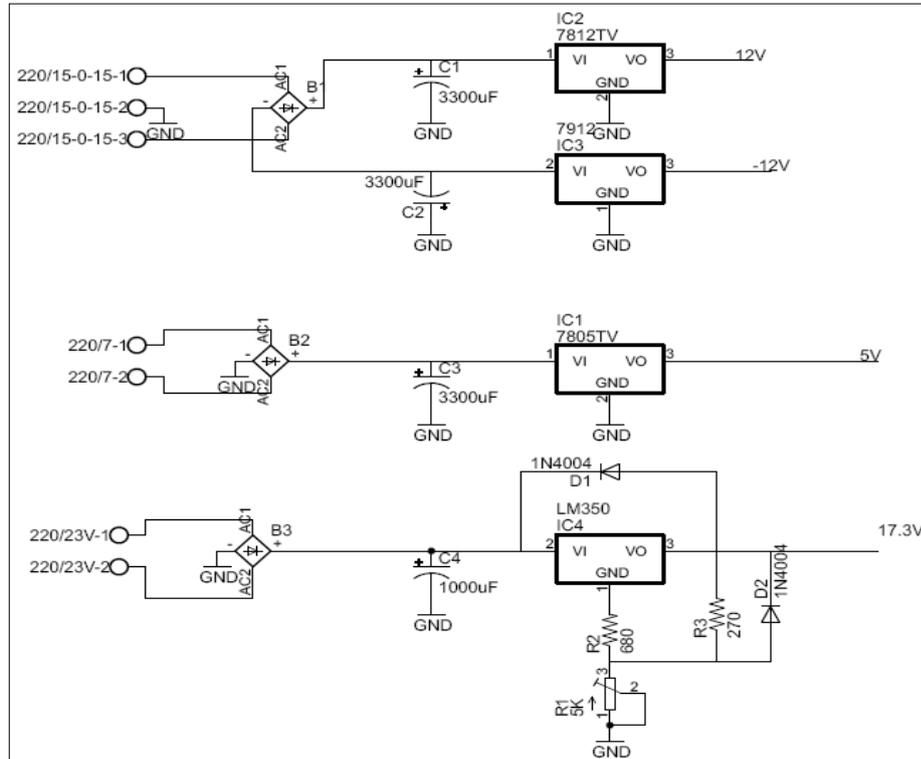


Figura 3.8. Tarjeta de la fuente analógica

Para todos los voltajes se cuenta con un transformador de cuatro bobinados siendo usados los bobinados de 220/23V, 220/7V (distinto al de la fuente digital) y el de 220/15V (este último con toma central).

3.1.2. Revisión del consumo de corriente de las fuentes de alimentación

A partir de la obtención de los circuitos esquemáticos y del estudio de los mismos, se procedió a determinar como primer paso cuanta corriente estaban entregando las fuentes de alimentación para cada voltaje y así tener parámetros que nos indiquen si no eran sobre exigidas o si estas podían mejorarse.

Las mediciones fueron realizadas con un multímetro FLUKE 175 y dieron los resultados mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Corriente suministrada para cada voltaje de alimentación

Fuente	Voltaje (V)	Tarjeta	Corriente (mA)
Digital	5	PIC	185
		Encoder	
		Calefactora	
		Control motor y ventilación	
	12	Encoder	68.83
		Sensado izquierda	
Sensado derecha			
-12	Sensado izquierda	13.72	
	Sensado derecha		
	Encoder		
Analógica	5	Control motor y ventilación	22
	12	Control motor y ventilación	3.44
	-12	Control motor y ventilación	119
	Var (17.6V)	Control motor y ventilación	1260

Elaboración: Propia

En base a los resultados obtenidos se pudo determinar lo siguiente:

- Es posible obtener el voltaje de 5V para la parte digital a partir del voltaje de 12V, manteniendo los diodos de protección para la salida de 5V lo que evita en el proceso la necesidad de un bobinado de 220/7V utilizado previamente para la generación de este, debido a que el consumo de corriente total no será mayor a 260mA, valor muy por debajo de la capacidad de los reguladores.
- Es posible obtener el voltaje de 5V para la parte analógica a partir del voltaje de 12V con un regulador en serie evitando así la necesidad de un transformador de 220/7V utilizado para la generación de este. debido a que el consumo de corriente total no será mayor a 26mA, valor muy por debajo de la capacidad de los reguladores.
- Debido al bajo consumo de corriente de los circuitos utilizados y debido a que estos se encuentran dentro de lo soportado por los reguladores de voltaje usando una disipación media (para los reguladores LM78xx y LM79xx hasta 1A), sería posible tener solo una fuente de voltaje para los voltajes de +5V,+12V y -12V sin hacer distinción entre analógicos y digitales. Sería necesario tan solo un transformador de 220/15V con toma central de 1A.
- El consumo de corriente para el voltaje regulado que alimenta al motor DC como a los ventiladores está bastante por debajo de lo soportado por el regulador utilizado (LM350 hasta 3A) lo que evita el calentamiento del

regulador y al tener una referencia (tierra) separada, evita interferir con los demás voltajes.

3.1.3. Diseño de la nueva fuente de alimentación

Con los resultados obtenidos y basados en experiencias previas diseñando fuentes de alimentación, se determinó un nuevo diseño para la misma, la cual reducirá la cantidad de componentes utilizados así como el precio en el transformador necesario (un transformador 220/15V con toma central 1A y un transformador 220/23V 3A). El diseño se muestra a continuación.

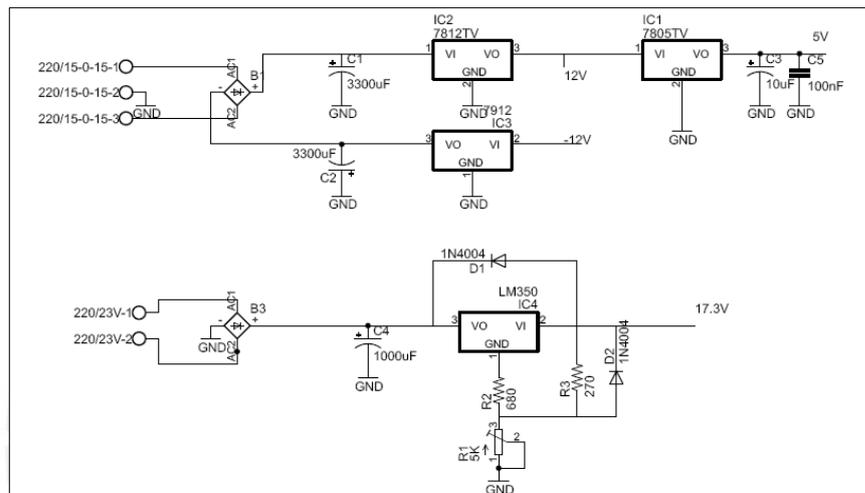


Figura 3.9. Fuente de alimentación modificada para el prototipo de agitador

Esta fuente de alimentación contempla el cambio realizado en la etapa de acondicionamiento del nuevo sensor de temperatura a utilizarse, el control de las resistencias calefactoras y un posible cambio en el motor DC responsable del movimiento orbital, los cuales se encontrarán dentro del rango de los reguladores utilizados.

3.2. Revisión del motor DC encargado del movimiento orbital y consideraciones a tomar

3.2.1 Identificación del motor DC

Inicialmente el prototipo de agitador permitía una velocidad de agitación programable de entre 25 y 250RPM, siendo el límite inferior (25RPM) configurado en la programación y el límite superior (255RPM) limitado por el uso de un solo registro de 8bits (0-255) para contener el dato ingresado de velocidad y por tener una resolución de 1RPM.

Para determinar si al variar la programación sería posible conseguir los objetivos de velocidad deseados, era necesario primero identificar si el motor DC utilizado era capaz de brindar las velocidad de entre 40 y 400RPM.

El motor DC utilizado no contaba con ningún número de serie además de la marca del mismo “Buehler”, por lo que a partir de esta se procedió a realizar la búsqueda de la información necesaria acerca del motor. Tras realizar la misma y en base a que se notó que el motor poseía una caja reductora, se encontró que dentro de la línea de productos “DC Gear Motors” de la compañía “Buehler” el modelo “1.61.046.xxx” coincidía con el utilizado en el prototipo de agitador, tanto en tamaño como en aspecto. Ver figuras 3.10. y 3.11.



Figuras 3.10. - 3.11.
Motor DC de compañía
Buehler (superior), Motor
DC encontrado en el
prototipo de agitador
(derecha).

El modelo de motor DC 1.61.046.xxx de la compañía Buehler es vendido en tres voltajes distintos de alimentación (12V,18V y 24V) y distintos tipos de cajas reductoras según la velocidad y el torque que se desee alcanzar.

Como primer paso se determinó, en base a que la alimentación del motor DC del prototipo de agitador se encuentra en 17.6V, que el motor utilizado tiene como voltaje nominal 18V. Siendo que para el de 12V este sería un sobrevoltaje alto (cerca al 50%) y para el de 24V este estaría muy por debajo del voltaje nominal.

Como segundo paso se determinó, en base a pruebas de velocidad del motor a voltaje nominal (18V), que este podía llegar a aproximadamente 500RPM sin carga, lo que finalmente llevó a la identificación plena del motor y cuyos datos se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Datos de la hoja de datos “DC GEAR MOTOR” de la compañía Buehler [21]

Voltaje	Serie	Corriente nominal	Torque nominal	Velocidad nominal	Velocidad sin carga	Torque máximo	Reducción
V (V)	xxx	In (A)	Tn(mNm)	Nn(RPM)	No(RPM)	Tmax(mNm)	9.9
18	323	0.4	70	335	500	98	

Elaboración: Buehler Motors - DC GEAR MOTOR 1.61.046.xxx

3.2.2. Desventajas del motor DC actual y consideraciones necesarias

Tras la revisión y la plena identificación del motor DC utilizado se pudo determinar que este, si bien es capaz de brindar el objetivo mínimo de velocidad de 40RPM, no es capaz de brindar el objetivo máximo de 400RPM a menos que se limite la carga de la bandeja del agitador por debajo del torque nominal del motor (70nMn o 700gr.cm). Esto último sería una desventaja para el agitador el cual solo podría soportar el peso de pequeños matraces, tubos de ensayo o bandejas de muestras, reduciendo así su plena capacidad de volumen.

Siendo entonces que la velocidad de agitación se ve limitada enteramente por la capacidad de velocidad y torque del motor DC utilizado, se tiene que, realizando el cambio del motor DC por uno capaz de soportar una velocidad de 400RPM o más en su torque nominal y cuyo consumo de corriente no sobrepase los 2A (esto pues los ventiladores tienen un consumo de 930mA y son también alimentados por el regulador de 3A LM350) se podrán obtener los objetivos de velocidad sin realizar cambios en la electrónica del equipo.

3.3. Revisión de la mecánica del prototipo

3.3.1. Dimensionamiento del prototipo

Debido a que se trata de un prototipo de agitador, el cual podría y se espera que llegue a ser un producto terminado en el futuro, es necesario contar con el dimensionamiento exacto del mismo, tanto de su estructura mecánica como de la ubicación de sus componentes. Por esto se procedió a realizar una serie de dibujos mecánicos con distintas vistas del equipo que muestran el dimensionamiento del mismo.

Los dibujos realizados se muestran a continuación.

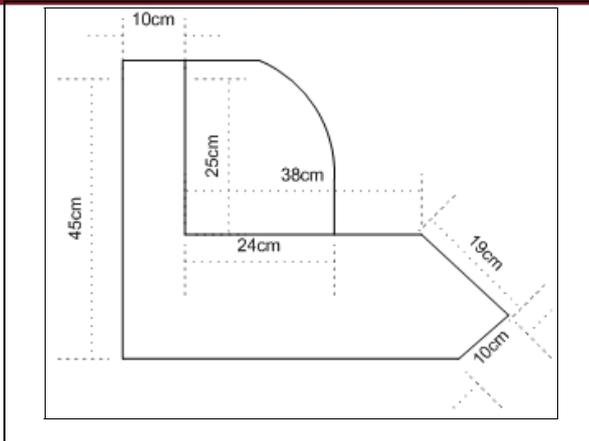


Figura 3.12. Vista lateral del prototipo



Figura 3.13. Fotografía lateral del prototipo

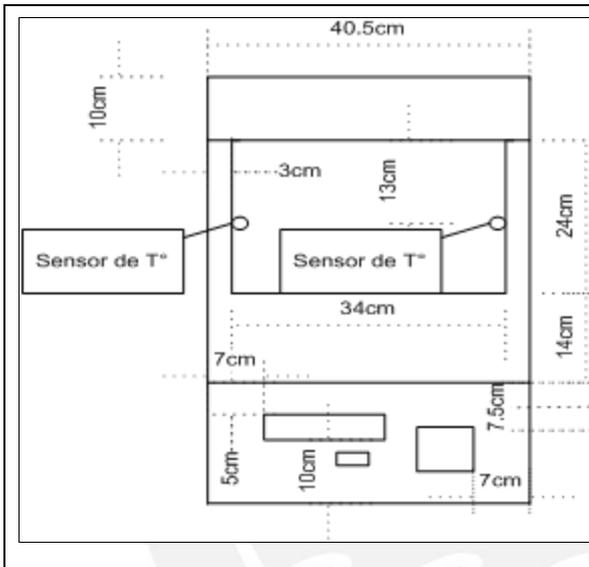


Figura 3.14. Vista superior con tapa



Figura 3.15. Fotografía completa del prototipo

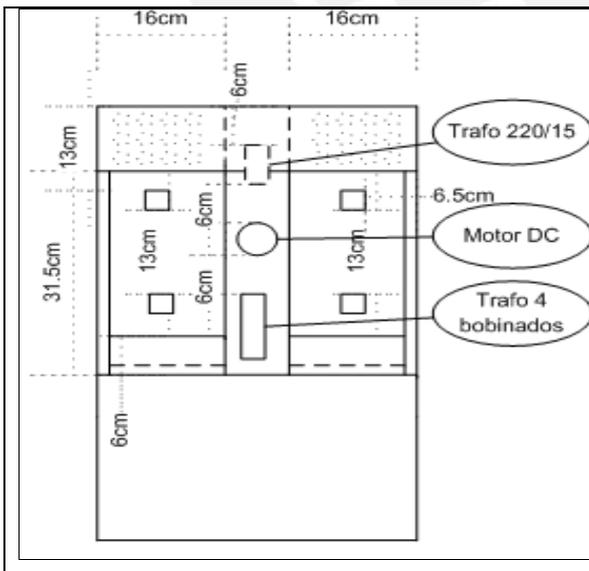


Figura 3.16. Vista superior sin tapa



Figura 3.17. Fotografía del interior de agitador

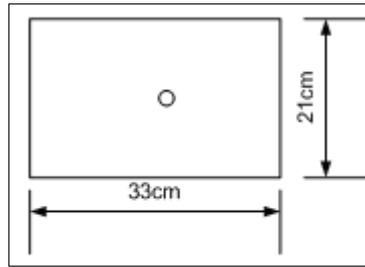


Figura 3.18. Dimensiones de la bandeja del agitador

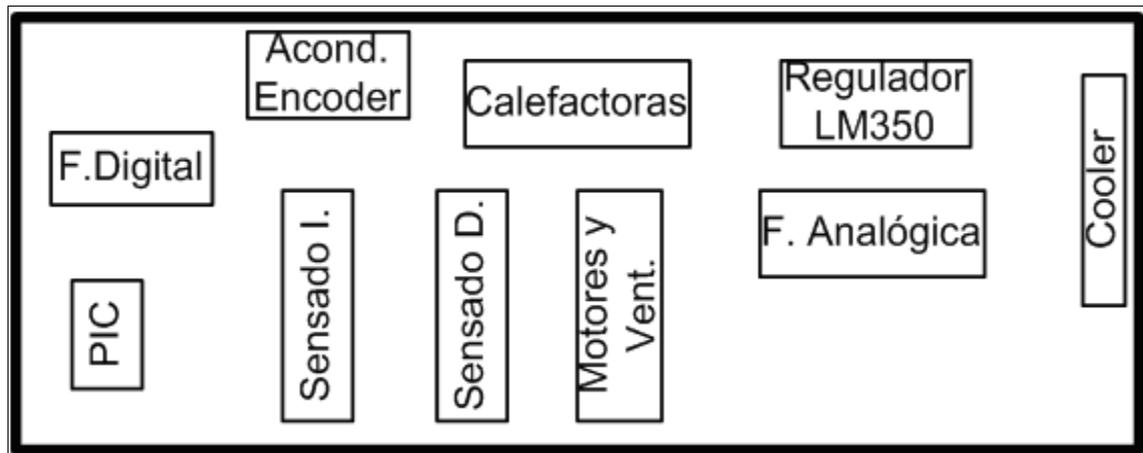


Figura 3.19. Ubicación referencial de las tarjetas dentro del prototipo

3.3.2 Flujo de aire dentro del prototipo

Cuando se realiza el control sobre una planta, en este caso el agitador, se busca que la misma sea lo más estable posible. Para el caso del prototipo, entendemos como estabilidad, a que la temperatura dentro del mismo se mantenga en un nivel deseado de manera constante en todo el interior del equipo.

Para asegurar que todo el volumen interno del agitador se encuentre a una temperatura uniforme es necesario que la circulación de aire dentro del mismo sea la apropiada, esto es, el ser capaces de mover el aire caliente desde las resistencias calefactoras hacia todo el resto de la cámara del agitador.

La circulación de aire forzado para el caso del agitador se logra mediante el uso de dos ventiladores ubicados en la parte inferior del prototipo apuntando directamente hacia las resistencias calefactoras, y gracias al uso de una tapa curvada y aditamentos curvos que siguen la misma dirección de la tapa del equipo se logra que el flujo de aire se desplace de forma constante y pareja por el interior del prototipo. De esta forma se mejora el desempeño del equipo, se logra mayor estabilidad y se evita el recalentamiento de las resistencias calefactoras.

En la figura 3.20. se muestra la vista lateral del equipo con el flujo de aire en su interior, siendo que es simétrico solo se muestra uno de los lados del mismo.

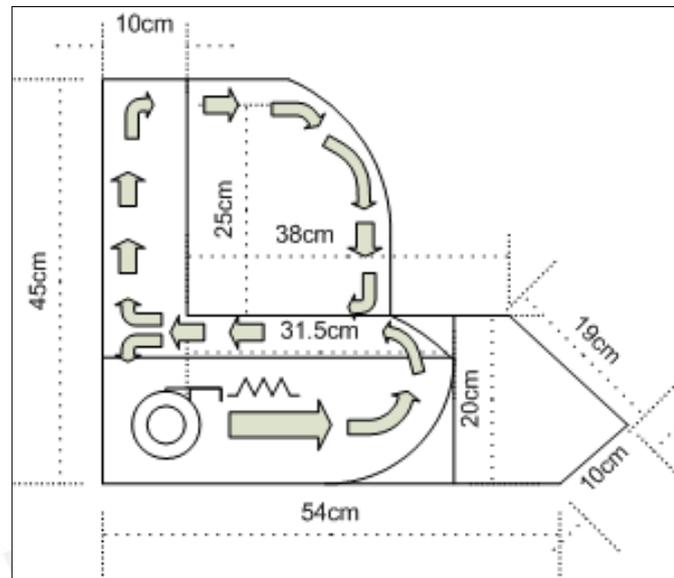


Figura 3.20. Vista lateral del prototipo con el flujo de aire en su interior

3.3.3. Recomendaciones para la mecánica de la bandeja y sus rodamientos

Al realizar pruebas con el agitador se notó que, debido a la falta de una correcta fijación del eje del motor DC a la bandeja del agitador y al uso de billas o canicas de vidrio como rodamientos, la bandeja tendía a perder su orientación y a golpear con las paredes del prototipo.

Dados estos inconvenientes y problemas de diseño, aún con el motor apropiado, estos serían aun generadores de turbulencias y problemas en la correcta agitación de las sustancias en el interior del prototipo, por lo que se plantearon dos soluciones ante estos problemas.

La primera solución es el cambiar los rodamientos actuales (canicas) por billas de acero debidamente lubricadas y colocadas, para que la bandeja pueda sostenerse y desplazarse sobre estas a lo largo de su movimiento orbital sin fricción apreciable.

La segunda solución consiste en adicionar un aditamento de fijación entre el eje del motor DC y la bandeja, como una tuerca enroscada al eje del motor DC o una fijación de presión. Dado que esta fijación dependerá del eje del motor que se seleccione para alcanzar los objetivos, esta solución se presenta como una recomendación que busca mejorar el movimiento orbital en el prototipo.

3.3.4 Revisión del aislamiento térmico del prototipo

Tanto como la correcta circulación de aire dentro del prototipo es un factor importante para mantener la estabilidad de temperatura en el mismo, así también lo es un correcto aislamiento térmico entre el interior y el exterior del prototipo. Mientras más deficiente sea el aislamiento térmico del equipo mayores serán las pérdidas de temperatura en el mismo, lo que ocasionará finalmente que la temperatura deseada tome más tiempo en alcanzarse o sea en caso extremo inalcanzable.

El aislamiento térmico en el prototipo, además de la propia estructura de aluminio del mismo, consiste en una capa de aproximadamente 4mm de algodón industrial y una capa de 4mm de cartón prensado (nordex), el cual recubre solo ciertas secciones del prototipo como se muestra en las figuras 3.21.-3.23.

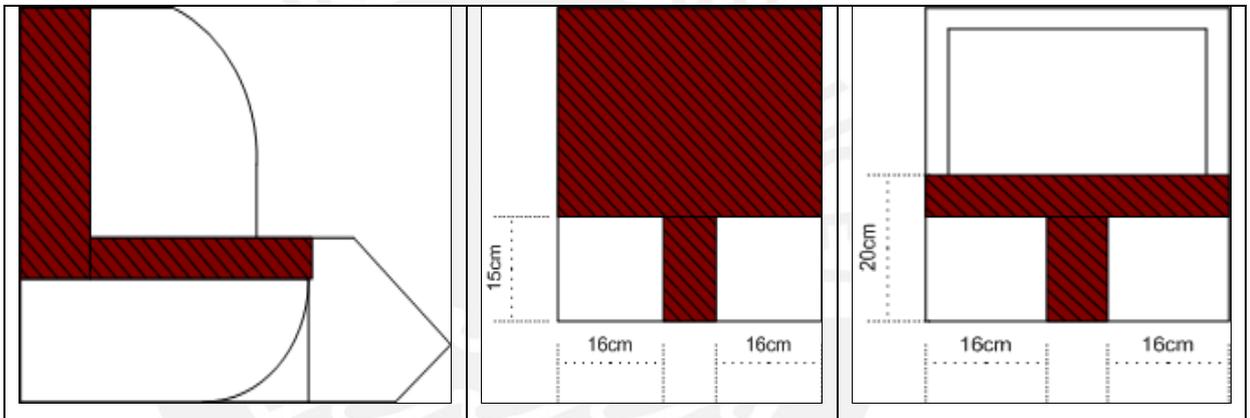


Figura 3.21. Vista lateral del aislamiento

Figura 3.22. Vista posterior del aislamiento

Figura 3.23. Vista frontal del aislamiento (sin tapa de circuitos)

Para verificar si el aislamiento térmico en el equipo era el adecuado se realizaron varias pruebas a temperaturas mayores a la temperatura ambiental, en las cuales se midió la temperatura central de la cámara del agitador y seguidamente la temperatura en distintos puntos de las paredes exteriores del prototipo para analizar la pérdida de temperatura en cada punto. Los datos de temperatura fueron tomados con el termómetro TECHNE 4400 el cual posee las siguientes características.

- Rango de medición: -20°C a 130°C
- Exactitud: $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
- Resolución: $0,01^{\circ}\text{C}$
- Tolerancia: $\pm 0,015^{\circ}\text{C}$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Temperatura medida en distintos puntos del prototipo

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
	T(°C)	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ con respecto a T central	T(°C)	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ con respecto a T central	T(°C)	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ con respecto a T central
(A) Punto más cercano a la calefacción	33.5	6.9	55.2	7.6	38.4	6
(B) Acrílico	23.7	-2.9	42.3	-5.3	28.9	-3.5
(C) Espalda	24.8	-1.8	45.8	-1.8	30.1	-2.3
(D) Punto más lejano	32	5.4	49.1	1.5	36.3	3.9
(E) Central	26.6		47.6		32.4	
(F) Ambiente	19.4		19.5		19.4	

Elaboración: Propia

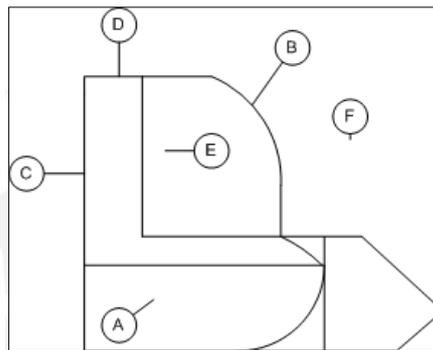


Figura 3.24. Puntos de medición

Las mediciones realizadas mostraron que la temperatura variaba según el punto de medición (Ver Figura 3.24.), esto en base a factores como la posición de las resistencias calefactoras y su relación con el punto de medición, y además por el aislamiento térmico del prototipo que solo recubre ciertas áreas del mismo.

Dado que la temperatura referencial es la temperatura central del prototipo se determinó que había dos puntos o áreas principales por las cuales se perdía temperatura. Estas áreas son la parte superior del prototipo (punto más lejano) y el área que rodea a las resistencias calefactoras. Esto se debe básicamente a que no se colocó ningún tipo de aislamiento térmico en ninguna de las dos superficies.

En base a los resultados obtenidos, los cuales indican tal como se muestra en la tabla 3.3 que en las zonas con aislamiento las pérdidas de calor son mínimas a diferencia de las zonas no aisladas, se determinó que con recubrir las áreas restantes con el mismo tipo de aislamiento térmico, cuidando que el calor generado por las resistencias calefactoras no lo dañe, se podrán reducir las pérdidas de calor entre el interior y el exterior del prototipo al igual que en las zonas ya aisladas, que como se detallará más adelante es de aproximadamente de 0.5°C cada 60 seg.

3.4. Revisión del control de temperatura y diseño de sus mejoras

El prototipo realizaba el control de temperatura a través de un control de tipo ON-OFF, en el que se prenden o apagan las resistencias calefactoras según la temperatura sensada en el equipo. Para realizar esta tarea se cuenta con dos sensores LM335 con las siguientes especificaciones:

- Rango de operación: $-40^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$
- Error de medición sin calibración: Tip. 4°C Max. 9°C
- Error con calibración a 25°C : Tip. $\pm 1^{\circ}\text{C}$ Max. $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- Constante de tiempo: Aire quieto-80seg 100pies/min-10seg Aceite agitado-1seg
- No linealidad: Tip. 0.3°C Max. 1.5°C

Para comprobar si con el uso de estos sensores de temperatura y con el control actual sería posible lograr el objetivo de tener un control de temperatura que mantenga la misma en un rango no mayor a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ del valor ingresado, se procedieron a realizar varios ensayos de calentamiento y enfriamiento en los que se midió la temperatura central del prototipo y se vio como cambiaba a lo largo del tiempo. Los resultados se muestran en las figuras 3.25.-2.27.

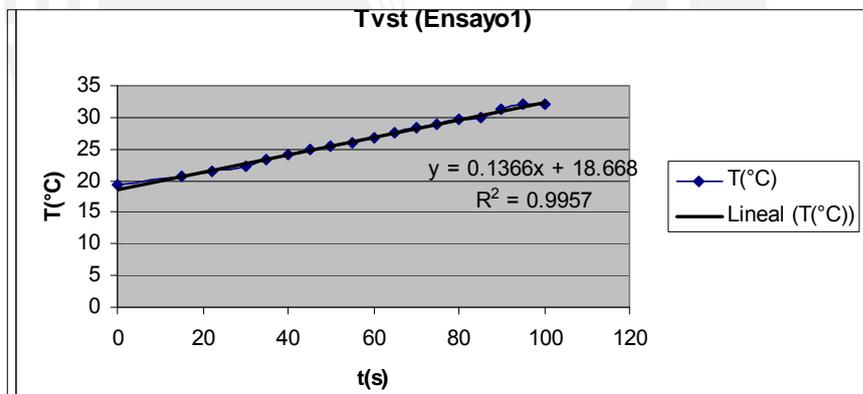


Figura 3.25. Ensayo 1 Temperatura central vs tiempo (calentamiento)

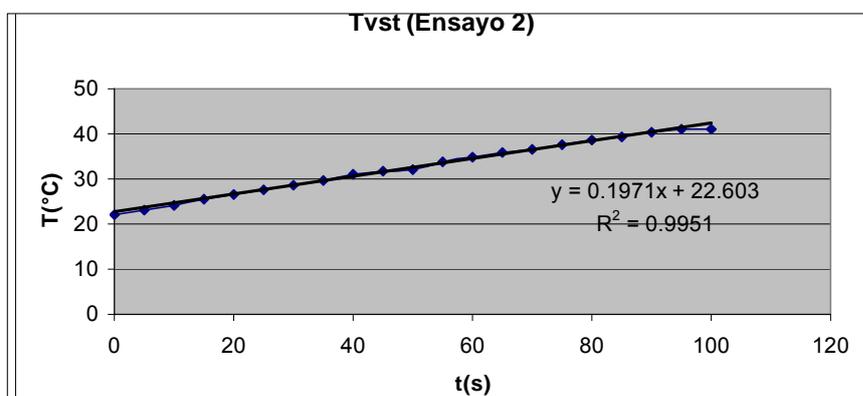


Figura 3.26. Ensayo 2 Temperatura central vs tiempo (calentamiento)

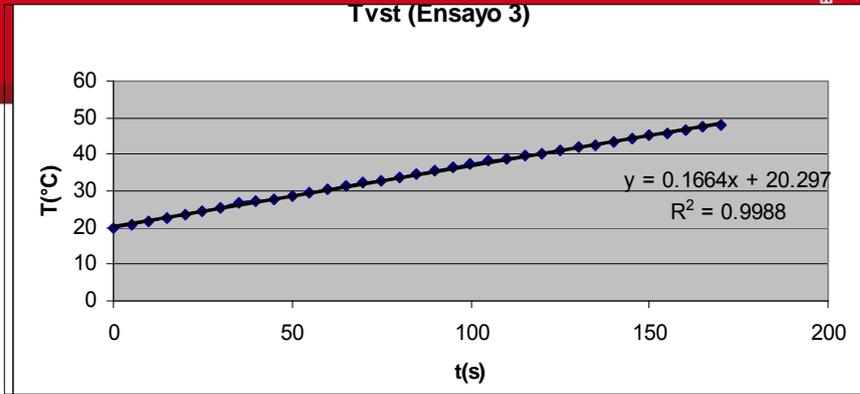


Figura 3.27. Ensayo 3 Temperatura central vs tiempo (calentamiento)

A partir de los ensayos de calentamiento realizados se hizo el siguiente cuadro comparativo mostrando los resultados: Ver tabla 3.4.

Tabla 3.4. Variación promedio de temperatura cada 5seg y ecuaciones resultantes

Datos de los 3 ensayos		
	Cada 5 seg	
	$\Delta T(^{\circ}C)$ promedio	Ecuación Tvst
Ensayo 1	0.794	$y = 0.1366x + 18.668$
Ensayo 2	1.014	$y = 0.1971x + 22.603$
Ensayo 3	0.836	$y = 0.1664x + 20.297$

Elaboración: Propia

De igual modo se realizó un ensayo para el enfriamiento del prototipo desde una temperatura $T > T_{ambiente}$, como se muestra en la figura 3.28. y tabla 3.5.

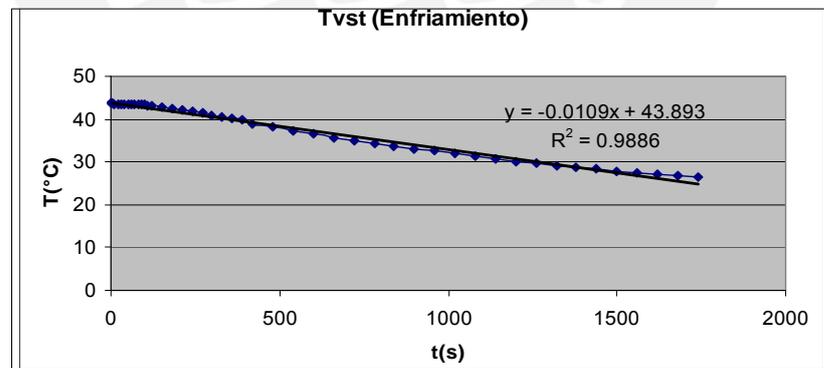


Figura 3.28. Ensayo Temperatura central vs tiempo (enfriamiento)

Tabla 3.5. Variación promedio de temperatura cada 5, 10 y 60 seg

Cada 10seg		Ecuación en todo el rango $y = -0.0109x + 43.893$
$\Delta T(^{\circ}C)$ promedio	-0.035	
Cada 30seg		
$\Delta T(^{\circ}C)$ promedio	-0.394	
Cada 60 seg		
$\Delta T(^{\circ}C)$ promedio	-0.573	

Elaboración: Propia

En base a los resultados de los ensayos realizados y al tiempo de respuesta del sensor utilizado se llegó a la conclusión que de seguir usando el mismo control de temperatura no se podría alcanzar el objetivo de temperatura deseado a menos que como primer paso se realizara el cambio del sensor. Esto debido a que el sistema eleva la temperatura en el interior del prototipo a una velocidad de entre 0.79°C y 1°C cada 5 segundos y pierde alrededor de 0.5°C cada 60 segundos, entonces, tomando la constante de tiempo del sensor de temperatura en aire en movimiento de 10 segundos, este arrojará un valor de temperatura que podría estar hasta 2 grados por debajo del valor real la primera vez que se caliente el equipo, pero de mantener la ley de control ON-OFF cuando se apaguen las resistencias calefactoras y la temperatura descienda por debajo de la temperatura deseada y se prendan estas nuevamente el error podría ser cada vez más grande.

3.4.1 Selección del nuevo sensor de temperatura

Para la selección del nuevo sensor de temperatura se tomó la premisa de que el sensor a elegir, tendría que tener un muy buen tiempo de respuesta ($<15\text{seg}$ aire quieto), una gran precisión y de ser posible un bajo costo, esto último siguiendo la idea de obtener de ser posible un equipo con un costo menor al de los equipos comerciales.

La búsqueda del sensor de temperatura abarcó todos los tipos de sensores como RTD's, termistores, termocuplas, entre otros, siendo los típicamente utilizados en equipos agitadores del tipo incubador los RTD PT100 o PT1000. Finalmente se seleccionaron dos sensores RTD que cumplieran con las premisas mencionadas y cuyos datos se muestran a continuación.

PT100-1000 RTD M213

El sensor de temperatura **M213** de la compañía HERAEUS es un detector resistivo de temperatura de platino o PRTD por sus siglas en inglés. Este tipo de sensor es el usualmente usado en agitadores del tipo incubador y sus principales características son las siguientes [22]:

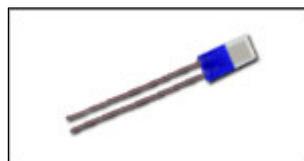


Figura 3.29. Sensor Pt RTD de la compañía Heraeus

- Resistencia nominal: 100 Ohmios a 0°C
1000 Ohmios a 0°C
- Tolerancia: Sigue la norma DIN EN 60751 Clase 1/3B, A y B para PT100 (0.15°C)
Sigue la norma DIN EN 60751 Clase B para PT1000 (0.3°C)
- Rango de temperatura: -70°C – 500°C
- Coeficiente de temperatura: 3850 ppm/K
- Auto calentamiento: 0.6K/mW a 0°C
- Tiempo de respuesta: Corriente de agua $t_{0.9}=0.12s$
Corriente de aire ($v=2m/s$) $t_{0.9}=7s$

TD5A

El sensor de temperatura **TD5A** de la compañía Honeywell es un circuito integrado con una lámina delgada de un elemento resistivo o también conocido como RTD tipo F. Sus principales características se muestran a continuación [23]:



Figura 3.30. Sensor TD5A de la compañía Honeywell

- Rango de temperatura: -40°C – 150°C
- Tiempo de respuesta: aire quieto 11seg
- Resistencia nominal: 2000 Ohmios a 20°C
- Linealidad: $\pm 0.15\%$
- Corriente de alimentación: tip. 1mA Max. 2mA
- Exactitud: 0.7°C a 20°C

En base a los parámetros de los sensores se determinó que dado a que ambos cumplieran con las premisas iniciales tanto de tiempo de respuesta como de precisión, se debía considerar alguna premisa adicional para la selección. Esta premisa fue la información y notas de aplicación que se ofrecieran para el uso de los sensores elegidos.

La compañía Heraeus brinda comentarios acerca de los posibles usos para los sensores que ofrece y posee hojas de datos con información que, si bien describen al sensor, carecen de curvas con ensayos realizados para sus sensores así como de posibles circuitos de acondicionamiento. Por otra parte la compañía Honeywell brinda gran cantidad de notas de aplicación para el sensor seleccionado así como circuitos de acondicionamiento y parámetros de selección. Bajo esta última premisa se decidió seleccionar como el sensor apropiado a ser utilizado al **TD5A** de la compañía Honeywell, cuyo precio además varía entre 1.5 y 3 dólares en los EEUU.

3.4.2. Circuito de acondicionamiento para el sensor TD5A

La compañía Honeywell ofrece entre sus notas de aplicación para la serie de sensores TD, un circuito de acondicionamiento para su sensor de temperatura que permite regular el voltaje de salida hasta los 5V. El circuito se mencionado se muestra a continuación.

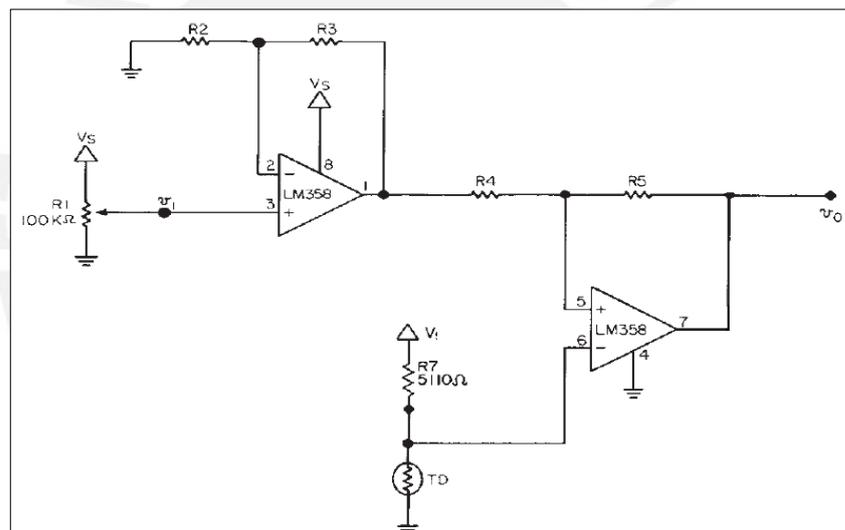


Figura 3.31. Circuito de acondicionamiento para el sensor TD5A [23]

Las características para este circuito de acondicionamiento son las siguientes:

- El LM358 es un amplificador operacional de propósito general.
- La tolerancia de las resistencias no debe ser de más de $\pm 1\%$.
- Vo es medido con respecto a tierra.

Debido a que con una corriente mayor a 1mA sobre el sensor de temperatura, este podría empezar a sufrir los efectos del sobrecalentamiento, el circuito mostrado brinda como máximo 1mA sobre el sensor.

La función de transferencia para el circuito es:

$$\left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) \cdot V \left[\frac{R_{TD}}{(R_{TD} + R_7)} \right] - \left(\frac{R_5}{R_4}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) V_1 = V_o$$

Los elementos desconocidos de la ecuación son el Offset (V_1) y la ganancia.

Para simplificar los cálculos se puede asumir: $\frac{R_5}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$

Además si se asume que no habrá sobrecalentamiento el en sensor, debido a las condiciones del circuito, las notas de aplicación indican que los valores de V y R_7 serán constantes, donde $V=5$ y $R_7=5110$. Con esto la ecuación quedaría como se muestra:

$$\left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) \cdot 5 \left[\frac{R_{TD}}{(R_{TD} + 5110)} \right] - \left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) V_1 = V_o$$

Dado que el rango de temperatura objetivo se encuentra entre los 20 y 80°C, y debido a que se quiso utilizar un rango considerable del ADC del PIC16F877(1-5V), se tuvo:

$$R_{TD}(20^\circ C) = 2000\Omega \quad V_o = 1V$$

$$R_{TD}(80^\circ C) = 2482\Omega \quad V_o = 5V$$

Se obtuvieron dos ecuaciones:

$$\left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) \cdot 5 \left[\frac{2000}{(2000 + 5110)} \right] - \left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) V_1 = 1V \quad \dots(1)$$

$$\left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) \cdot 5 \left[\frac{2482}{(2482 + 5110)} \right] - \left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) V_1 = 5V \quad \dots(2)$$

Haciendo (2)-(1) se obtuvo:

$$\left(\frac{R_5}{R_4} + 1\right) = 17.5323 \dots \text{Ganancia}$$

Reemplazando en (1):

$$V_1 = 1.3494 \dots \text{Offset}$$

Seleccionando R_5 y R_4 para cumplir con la ganancia, se seleccionó $R_4 = 3.39\text{K}\Omega$ y

$R_5 = 56\text{K}\Omega$, y según lo asumido inicialmente $\frac{R_5}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$ se tuvo, $R_2 = 56\text{K}\Omega$ y

$R_3 = 3.39\text{K}\Omega$.

Para lograr el valor de Offset, bastará con reemplazar el sensor en el circuito por una resistencia de 2000Ω y mover el potenciómetro R1 hasta que el voltaje de salida sea 1V. De esta forma el circuito estará listo para entregar valores de 1 a 5V con una linealidad de 0.2% la cual será verificada en simulaciones.

Para que los datos obtenidos del circuito puedan ser posteriormente procesados por el PIC16F877 se procedió a linealizar la ecuación que relaciona la temperatura del sensor con su resistencia y se reemplazó en la ecuación del circuito, con lo que se obtuvo una relación entre temperatura y voltaje como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{514T - 3197}{8T + 6949} \right) = V_o$$

Los valores se redondearon para que puedan ser fácilmente programados, lo cual solo produce un error de menos de 0.1°C , además se realizó una gráfica de V_o vs T para observar la linealidad en el rango seleccionado.

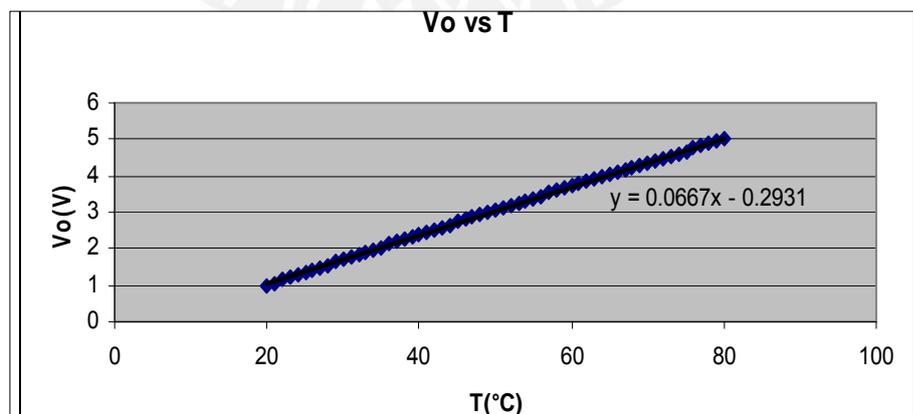


Figura 3.32. Gráfica V_o vs T para el circuito y sensor presentados

3.4.3. Revisión de la técnica de control

Una vez obtenidos todos los datos para trabajar con el sensor de temperatura TD5A, el cual brinda significativas mejoras tanto en su precisión como en su tiempo de respuesta, se observó que si bien se alcanzan los objetivos deseados se podría aplicar en lugar del control ON-OFF actual, el control proporcional, siendo este más adecuado para, en general, todo tipo de incubadoras [24].

Para realizar un control proporcional que no afecte de manera significativa al tiempo de establecimiento del sistema es necesario combinar este control con el control ON-OFF. Para esto se elige una zona o intervalo de temperatura en el cual el control proporcional comenzará a actuar, esta zona es conocida como **banda proporcional** [25].

Dado que se conoce el tiempo de respuesta del sensor de temperatura y la velocidad con la que aumenta la temperatura en el sistema (aprox. 1°C cada 5 seg), se decidió que con una banda proporcional de 4°C centrada en el 50% de la potencia de las resistencias calefactoras se podría aumentar la estabilidad del sistema. Esto último debido a que, al reducir la potencia a medida que se acerca la temperatura programada, se podrá evitar el tener sobre picos de temperatura.

El valor de 4°C fue elegido para dar un margen de acción a la banda proporcional que tomará en cuenta la velocidad de respuesta del sensor de temperatura, y la banda proporcional se centró al 50% de la potencia de las resistencias calefactoras para que, si bien el aumento de temperatura disminuya, se evite así tener mayores picos u oscilaciones marcadas en el sistema. Además el centrar la banda proporcional en 50% permite al sistema tener correcciones máximas disponibles en ambas direcciones [25].

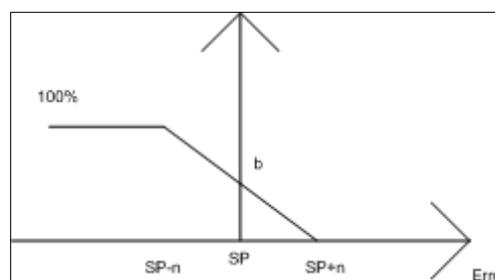


Figura 3.33. Banda proporcional

La energía suministrada a las resistencias calefactoras está dada por: $E=mT+b$, en donde m es la constante de proporcionalidad K_p ($K_p=100\%E/(SP-n - Sp+n)$), T es

la temperatura de error ($T = T_{medida} - SP$) y b es la energía cuando el error es cero, para el caso 50%. En términos de control proporcional $E = K_p * error + b$ [26].

En valores de tiempo, tomando como premisa que la onda de voltaje alterno que alimenta a las resistencias calefactoras tiene una frecuencia de 60Hz, el 100% de la energía equivaldrá a 8.3ms de onda alterna. De esto se tiene que b a su vez equivaldrá a 4.17ms de onda alterna. Para que estos valores puedan ser programados y el valor de K_p hallado correctamente se deberán de saber los datos del microcontrolador necesario para realizar el control proporcional, tanto el número de cuentas del temporizador como la resolución del ADC de mismo. A fin de simular los efectos del control proporcional se usó un dimmer para variar la potencia de las resistencias calefactoras como se muestra en las simulaciones.

Para realizar el control de potencia, es necesario tanto, un circuito de detección de cruce por cero que otorgue una referencia para el ángulo de disparo fijo, como un control de potencia para activar las resistencias calefactoras.

Existen distintos tipos de detectores de cruce por cero, siendo la mayoría de estos compuestos por un transformador de muy baja potencia, el cual puede ir montado en un PCB, y algún elemento de disparo que envíe una señal de control al microcontrolador cada vez que se detecta un cruce.

El circuito mostrado a continuación en la figura 3.34. está compuesto por un transformador de 220/5V de muy baja potencia (200mA) para obtener una referencia de la red eléctrica, una etapa de rectificación para tener la onda rectificada completa, un condensador que se cargará a través de D1 al voltaje rectificador y cuyo valor reducirá el rizado y brindará un voltaje DC constante, y como disparador un transistor 2N3904 que envía un pulso al microcontrolador cada vez que se detecta un cruce por cero. Los valores de las resistencias se eligen para que lograr que el transistor funcione como interruptor con cada cruce.

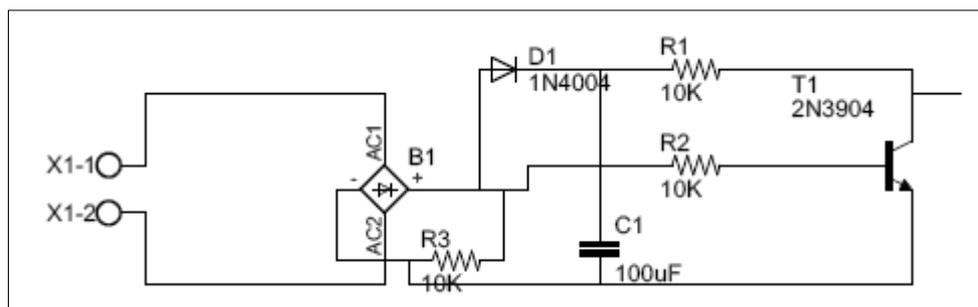


Figura 3.34. Detector de cruce por cero

Para realizar el control de potencia es posible usar el circuito actualmente implementado en el prototipo y revisado en la primera parte del capítulo, puesto que solo variará la señal de control más no el consumo de las resistencias calefactoras.

3.5. Revisión de la programación y modificaciones necesarias

Debido a que el programa que controla todas las partes electrónicas y electromecánicas del prototipo solo se encontraba dentro del PIC 16F877 que se encuentra en el mismo y dado que no existían copias del programa, se procedió a realizar el proceso de extracción del programa del microcontrolador y a analizarlo.

3.5.1 Revisión de la programación

La decisión de hacer la revisión del programa utilizado antes que realizar un nuevo programa se basó en que, el revisar un programa previamente diseñado para el propósito particular de controlar las partes revisadas, brindaría ya, un programa base sobre el cual realizar solo ciertas modificaciones más no realizarlo nuevamente, lo que conllevaría a un mayor tiempo y por ende mayores costos de investigación y desarrollo.

El primer paso fue extraer el programa del PIC, lo cual fue realizado utilizando un grabador de PIC comercial. Una vez extraído el programa este se encontraba en formato .HEX (hexadecimal), lo que hacía que el poder analizarlo tomara un tiempo excesivo. Entonces, debido a que el modelo del PIC era conocido y por lo tanto así también lo era el juego de instrucciones que este utiliza, se procedió a utilizar un programa para desensamblar el código .HEX, en este caso el WinDis84 debido a que este era conocido, aunque existen otros programas que realizan la tarea mencionada. El programa mencionado al igual que todos los programas para desensamblar entregan el código en lenguaje ensamblador, el cual puede tomar menos tiempo en ser entendido. El problema principal es que tanto las variables utilizadas en el momento de la programación inicial como las etiquetas de cada subrutina pierden su nombre.

Una vez que se tuvo el programa en lenguaje ensamblador se procedió a comentar el mismo línea tras línea y a analizar su funcionamiento. A partir de este análisis se logró realizar el diagrama de flujo del programa principal que se muestra en la figura 3.35., así como el programa total comentado línea por línea que se adjunta como anexo a la presente tesis.

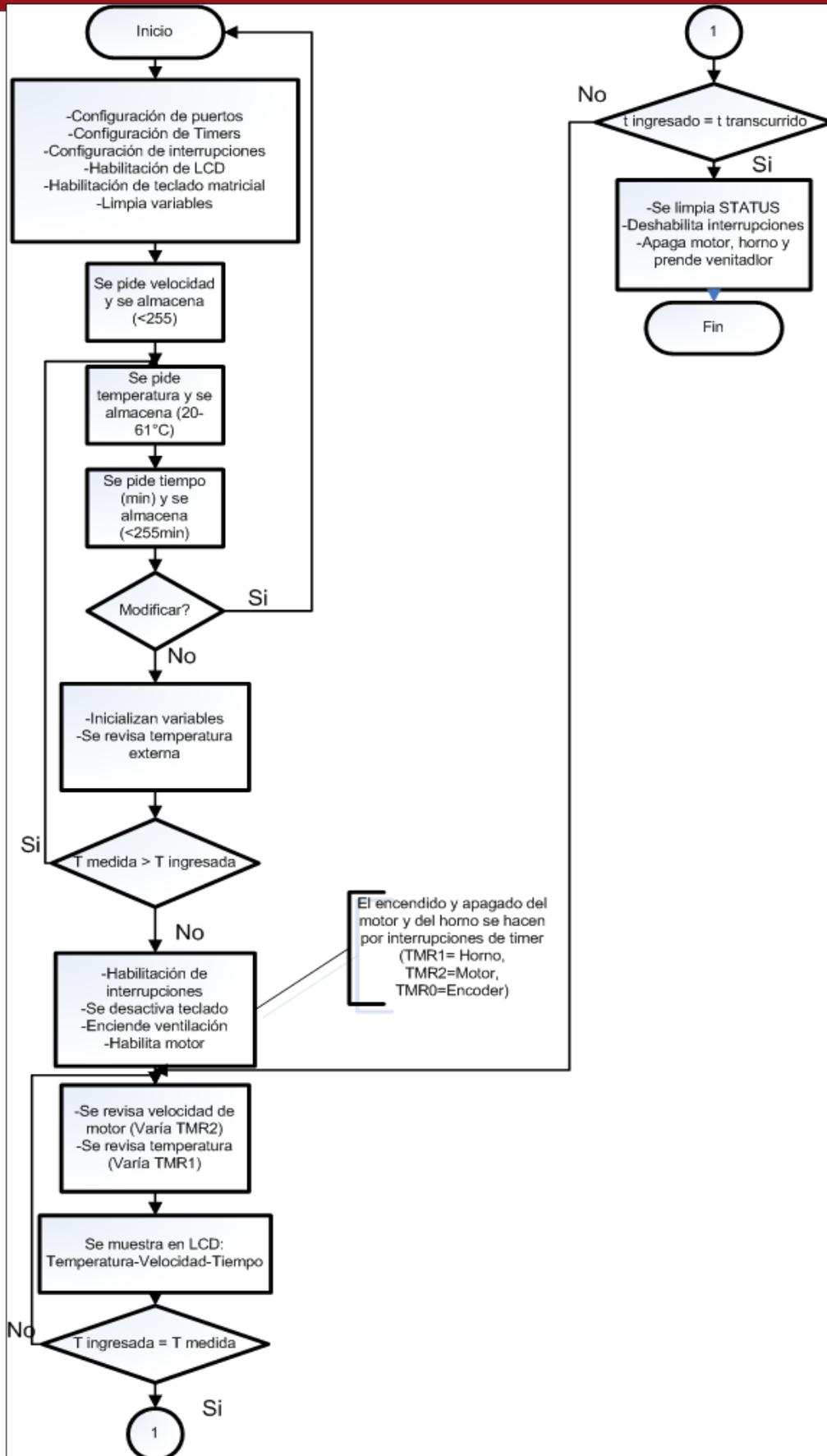


Figura 3.35. Diagrama de flujo general del programa extraído del prototipo

3.5.2 Modificaciones necesarias en la programación

Una vez obtenida toda la información necesaria de la programación del prototipo así como el diagrama de flujo que describe al mismo se pudieron analizar las secciones de código del mismo, las cuales tendrían que ser modificadas para alcanzar las mejoras propuestas.

Para alcanzar la velocidad objetivo (400RPM), además del motor DC, será necesario que se disponga de al menos dos registros de 8bits para almacenar el dato de velocidad ingresado, dado que como se quiere una resolución de 1RPM un único registro para almacenar este dato es insuficiente (8bits=255max). Además, una vez se que tenga el motor a utilizar se tendrán que realizar las mediciones correspondientes para programar, ya sea por PWM o por interrupciones de timer, la velocidad del motor.

Para la temperatura objetivo, será necesario programar la nueva ecuación que relacione el voltaje suministrado por el circuito de acondicionamiento de los sensores, con el valor en bits generado por el ADC del microcontrolador y finalmente con la temperatura programada. Asimismo, será necesario programar el control proporcional que funcione dentro de la banda proporcional previamente definida, y que además controle la potencia de las resistencias calefactoras a partir del dato generado por el circuito detector de cruces por cero y el error entre la temperatura medida y la programada.

Para cumplir con el correcto control de tiempo, a partir de evaluar el diagrama de flujo del programa principal, es notorio que el mismo da prioridad a la temperatura sobre el dato de tiempo. Ante esto existen dos posibles soluciones que podrían ser programadas, la primera es el darle prioridad al control de tiempo sobre el dato de temperatura, caso en el cual el usuario tendrá que saber el tiempo que requiere el sistema para alcanzar aproximadamente la temperatura deseada. La segunda solución es el en lugar de usar una condición de igual entre la temperatura ingresada y la temperatura medida se use una condición de "mayor o igual", de tal forma que en caso se alcance la temperatura y el tiempo programada ya hubiera pasado, el programa igual finalice y no permanezca en un bucle.

A continuación se muestran los datos obtenidos para el voltaje de salida del circuito de acondicionamiento para varios valores de resistencia del sensor TD5A dentro del rango configurado.

T(°C)	R(Ω)	Vo(V)
20	2000.00	1.02
25	2037.71	1.36
30	2075.82	1.69
35	2114.40	2.02
40	2153.43	2.35
45	2192.92	2.69
50	2232.86	3.02
55	2273.27	3.35
60	2314.13	3.69
65	2355.45	4.02
70	2397.23	4.36
75	2439.47	4.69
80	2482.16	4.94

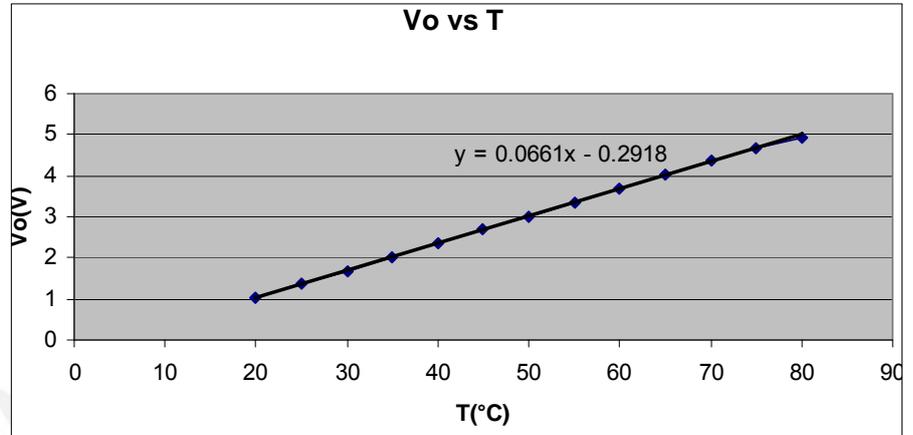


Figura 4.2.Vo vs T producto de simulación en ISIS

Tabla 4.1. Simulación T-R-Vo

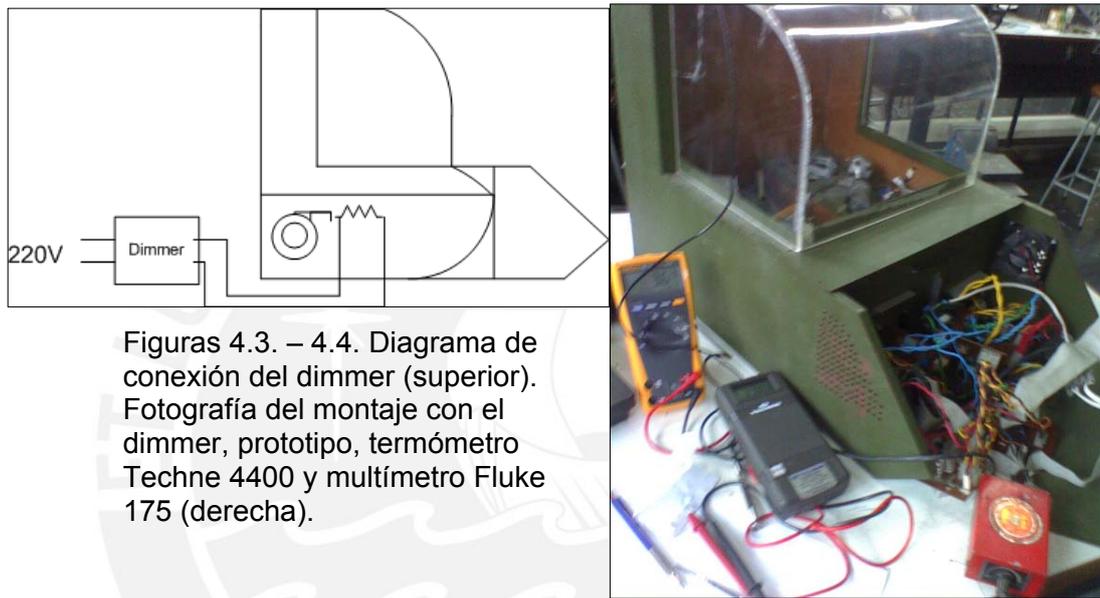
Se verificó que la salida del circuito de acondicionamiento difiere ligeramente de la salida teórica, más esta diferencia provoca tan solo una variación de 0.1V con respecto al voltaje teórico, lo que, al aplicar la fórmula de conversión entre Vo a temperatura, provoca un error no mayor a 0.1°C, lo cual podría ser corregido por software aunque es un valor permisible dentro de los objetivos planteados.

4.2. Simulación del control proporcional en el prototipo de agitador

Debido a que se querían tener datos físicos reales de la variación de la temperatura aplicando la técnica de control proporcional propuesta en el diseño, se procedieron a simular los efectos del control variando la potencia de las resistencias calefactoras de manera manual usando un dimmer comercial. Ver figuras 4.3. y 4.4.

Las resistencias calefactoras fueron conectadas al dimmer y se marcó el punto en el cual este entregaba el 50% de la potencia a las mismas. De esta forma, cuando se estuviera a una temperatura de 2°C menor a una temperatura deseada para el ensayo, se empezaría a disminuir la potencia desde el 100% hasta el 50% tratando que la disminución de la misma no fuera demasiado brusca. Una vez alcanzada la temperatura deseada se empezaría a reducir la potencia aplicada hasta que esta fuera de aproximadamente 0%, todo esta buscando imitar el comportamiento del sistema dentro del control de la banda proporcional.

Dos tipos de ensayos fueron realizados, el primero buscó mostrar los efectos del control proporcional sobre los sobre picos de temperatura en el sistema, por lo que se procedió a elevar la temperatura en el sistema desde la temperatura ambiente hasta una temperatura deseada ($T_{ambiente} < T_{deseada}$); el segundo de los ensayos buscó mostrar la estabilidad del sistema dentro de la banda proporcional por lo que una vez alcanzada una temperatura deseada se procedió a variar la potencia suministrada a las resistencias calefactoras tratando de seguir la variación del porcentaje de potencia total según lo establecido por la banda proporcional.



A continuación se muestra la gráfica obtenida de temperatura versus tiempo en el primer tipo de los ensayos realizados. La temperatura deseada fue de 40°C por lo que el control proporcional se aplicó en la banda proporcional de 38°C a 42°C . Ver figura 4.5.

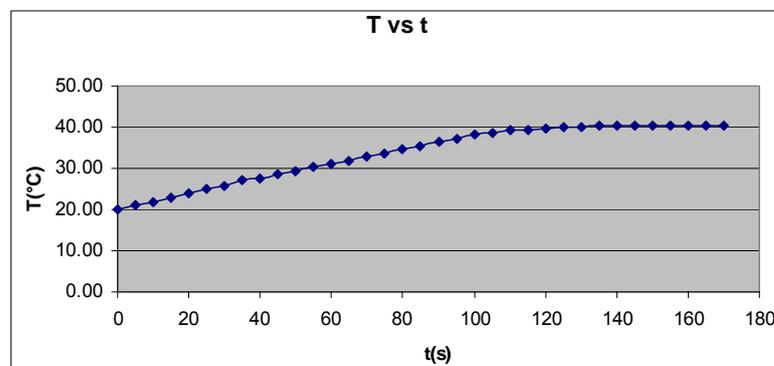


Figura 4.5. T vs t aplicando control proporcional de forma manual

Como se puede apreciar en la gráfica realizada con los valores de temperatura obtenidos cada 5 segundos y a pesar de que el control fue realizado de forma manual tratando de seguir una variación constante para imitar el control teórico, gracias a la gran estabilidad del sistema se logró confirmar que reduciendo la potencia se puede reducir de gran manera el sobre pico en la temperatura que generaría, por ejemplo, el control ON-OFF.

A continuación se muestra la gráfica de temperatura versus tiempo obtenida en base a los resultados del segundo tipo de ensayo realizado. En este la temperatura que se buscó mantener fue la de 50°C , por lo que una vez que se ingresó a la banda proporcional (48°C), se comenzaron a recolectar datos de temperatura cada 5 segundos mientras se variaba la potencia suministrada a las resistencias calefactoras tratando de imitar la acción del control proporcional. Ver Figura 4.6.

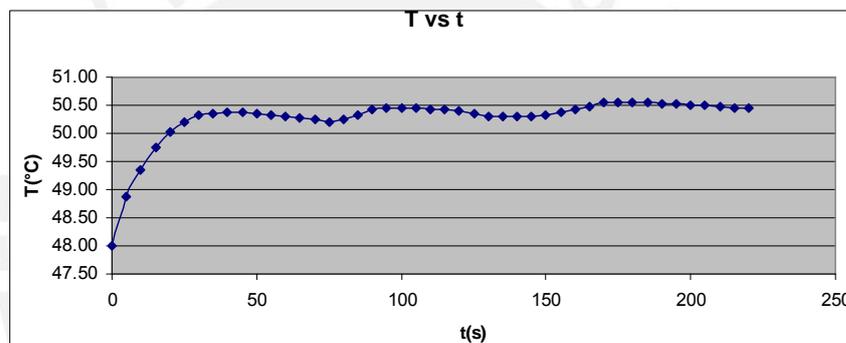


Figura 4.6. T vs t alrededor de la temperatura de interés (50°C) simulando el control proporcional

En base al ensayo realizado se pudo determinar que el sistema tarda alrededor de 20 a 25 segundos en estabilizarse alrededor de la temperatura deseada una vez que se ingresa dentro del rango de acción de la banda proporcional, valor que coincide con el tiempo que tardo el sistema en estabilizarse alrededor de la temperatura de 40°C una vez que se entro en la banda proporcional en el ensayo anterior. Además, como se puede apreciar, el sistema presenta una oscilación no mayor a 0.6°C sobre la temperatura deseada, lo que es un rango bastante menor que el propuesto como objetivo ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), reafirmando así la ventaja del uso de un control proporcional por sobre el control ON-OFF.

Si bien para el ensayo realizado el sistema osciló por sobre la temperatura deseada, para una temperatura mayor o menor el sistema oscilará por debajo, por sobre o alrededor de la temperatura deseada, debido que mientras el sistema se

acerca a la temperatura máxima que las resistencias calefactoras pueden otorgar, el aumento de la temperatura (ΔT_{vst}) empezará a disminuir.

4.3. Presupuesto aproximado para la realización del prototipo

Dentro de la realización de la presente tesis, la realización de un presupuesto de lo invertido en el prototipo resulta de gran importancia, puesto que permitirá identificar si el desarrollo del prototipo para ser comercializado tendría un beneficio real por sobre la adquisición de equipos comerciales.

Para esto se procedió a realizar un cuadro que presentase los gastos necesarios para el desarrollo del prototipo, el cual incluyó tanto los costos netamente materiales como los de investigación, construcción y programación del equipo. Estos datos se presentan en la tabla 4.2. y los datos desglosados en los anexos de la presente tesis.

Investigación	3000
	Precios (soles)
Programación	1000
Construcción	1000
Total mecánica	354
Total electrónica	609
Total inversión	S/. 2,963.00
Total inversión en dolares al 8/11/10	\$1,062.01

Tabla 4.2. Resumen de costos en el desarrollo y construcción del prototipo

Tras realizar el cuadro con los gastos necesario se notó que el costo aproximado de la construcción del prototipo bordea los 1100 dólares, precio que se encuentra por debajo del costo de equipos comerciales que comparten parámetros de funcionamiento comparables con los del prototipo realizado, los cuales varían desde los 3000 hasta los 10000 dólares en los EEUU, dependiendo del fabricante y la capacidad de los equipos. A esto habría que adicionarle un porcentaje del costo de investigación como parte del desarrollo del prototipo.

Dado que los costos se evaluaron para el desarrollo de un único prototipo y de forma individual, esto nos da como indicio que, de realizar la producción del prototipo de forma comercial, adquiriendo los componentes necesarios para su construcción de forma conjunta, tras implementar y verificar las mejoras presentadas, sería posible obtener un producto construido y desarrollado en el país con un costo menor al de los equipos de comerciales con funcionalidades comparables a las de estos.

CONCLUSIONES

1. Después de realizar la revisión del control de temperatura utilizado en el prototipo y con el diseño de las mejoras presentadas y simuladas en la presente tesis, se concluye que, con la implementación del sensor de temperatura TD5A y la aplicación de la técnica de control proporcional será posible alcanzar un control de la temperatura programada incluso menor (0.6°C) al del objetivo propuesto de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en un rango de 20°C a 80°C .
2. Tras realizar la revisión del control de velocidad y del motor del prototipo, así como incluir las recomendaciones que son necesarias a seguir, se concluye que, de seguir las indicaciones para la selección de un motor cuyo consumo de corriente no sobrepase los 2A, alcance una velocidad de 400RPM o más en su torque nominal y este sea implementado, se alcanzará una velocidad para el prototipo que se encuentre entre los 40 y 400RPM deseados.
3. Habiendo realizado la revisión de la mecánica del prototipo y dadas las recomendaciones a seguir, se concluye que, de utilizar pequeñas billas de acero adecuadamente lubricadas y colocadas funcionando como rodamientos, y fijando el eje del motor que le otorga el movimiento orbital a la bandeja haciendo uso de una tuerca enroscada al eje o una fijación de apriete se podrá lograr un movimiento sin balanceos ni golpes de la bandeja contra el interior del prototipo.
4. Luego de realizar la revisión del programa que se encontraba solo en el PIC16F877 ubicado en el interior del prototipo, se concluye que, al realizar las modificaciones en la programación del control proporcional, con el uso de más de un registro para el dato de velocidad y priorizando de igual manera el tiempo y la temperatura, se alcanzará el objetivo de un correcto control de tiempo conjuntamente con el correcto funcionamiento de las mejoras diseñadas.
5. Respecto a la revisión del aislamiento térmico y de la de circulación de aire en el prototipo, se concluye que, se conseguirá tener un sistema estable para un correcto control de la temperatura en el interior del mismo replicando el acondicionamiento térmico de 3mm de algodón industrial y 3mm de Nordex usado en ciertas partes del prototipo actual, en la totalidad del mismo, el cual siga las pautas presentadas en los diseños de la presente tesis y manteniendo la circulación de aire actual.
6. Con la realización del presupuesto de lo invertido en el desarrollo del prototipo y comparándolo con la adquisición de un equipo comercial que comparta un

funcionamiento comparable con el del prototipo, se concluye que, la producción del prototipo como equipo comercial tras la implementación de los diseños, recomendaciones y pruebas necesarias, podría tener un costo menor al de los equipos comerciales.



RECOMENDACIONES

De acuerdo a la revisión, consideraciones, modificaciones y diseños realizados, buscando mejorar el desempeño del prototipo de agitador PUCP, se podrá pasar a transformar toda la información recopilada en mejoras implementadas y verificadas, a fin de poder, en un futuro, lograr que el prototipo pueda pasar a ser un producto comercializable que brinde una opción más económica a todos los centros de investigación y análisis biológicos nacionales.

Debido a la gran cantidad de partes mecánicas que posee de manera inherente el prototipo de agitador PUCP, se observa la necesidad de contar con especialistas del área de mecánica que puedan aportar directamente con la implementación de las mejoras presentadas que se encuentran dentro del área de estudio de la misma. Asimismo, la realización de un estudio termodinámico que relacione de forma directa variables como la potencia de la calefacción utilizada, el aislamiento térmico en el equipo y el flujo de aire, darían respaldo teórico y práctico a fin de mejorar aún más la técnica de control utilizada para el prototipo.

Con la visión de convertir el prototipo PUCP en un equipo comercial, se podría tomar en cuenta el aporte de profesionales del área de diseño industrial, los cuales podrían aportar mejoras al aspecto estético del prototipo, debido a que no solo las funcionalidades de un equipo como tal logran la aceptación del mismo, sino también la apariencia del producto final, la cual no ha sido tomada en cuenta dentro de los alcances de este estudio, que más bien se han concentrado en la funcionalidad del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OH PERÚ, Laboratorios Farmacéuticos – Laboratorios Clínicos Perú,
[Consultado 02/05/2010] < [http://www.ohperu.com/empresas/laboratorios
.htm](http://www.ohperu.com/empresas/laboratorios.htm)>
- [2] Diario La Primera
2010 Analizaran presupuesto salud 2010 [Consultado 02/05/2010]
< [http://www.diariolaprimeraperu.com/online/actualidad/analizaran-
presupuesto-salud-2010_54410.html](http://www.diariolaprimeraperu.com/online/actualidad/analizaran-presupuesto-salud-2010_54410.html) >
- [3] Ministerio de Economía y Finanzas
2010 Ley 29465 (pág.10)
< <http://www.mef.gob.pe/DNPP/leyes/2010/Ley29465.pdf> >
- [4] E-Quipu
2010 Grupo de Desarrollo de Equipos para Laboratorios Biológicos
(EquiLab) [Consultado 07/06/2010]
<<http://www.e-quipu.pe/pucp/equipos/ver.php?id=23>>
- [5] Laboratorio FIRP – Universidad de los Andes, Agitación – Mezclado –
Emulsión [Consultado 07/06/2010]
<<http://www.firp.ula.ve/s240.html>>
- [6] Dr. Pedro F. Mateos Gonzáles – Universidad de Salamanca
Tema 12: Tipos de Fermentadores [Consultado 07/06/2010]
<<http://nostoc.usal.es/sefin/MI/tema12MI.html>>
- [7] María del Rosario Pascual Anderson, Vicente Calderón y Pascual
2000 Microbiología Alimentaria: Metodología analítica para alimentos y
bebidas, Editorial Díaz De Santos
- [8] Segel, I.
1976 Enzyme Kinetics, John Wiler & Sons. USA
- [9] Freeman, Bob A.

- 1986 Microbiología de Burrows 22a Edición, Editorial Interamericana, España
- [10] GlobalSpec, About laboratory Shakers [Consultado 03/05/2010]
<http://www.globalspec.com/LearnMore/Labware_Scientific_Instruments/Sample_Preparation_Wet_Chemical_Analysis/Laboratory_Shakers>
- [11] IPE Laboratorios, Agitador por balanceo Rock modelo 321 B
[Consultado 03/05/2010]
<<http://ipelaboratorios.com.ar/>>
- [12] IPE Laboratorios, Homogenizador Sang PP-18 [Consultado 03/05/2010]
<<http://ipelaboratorios.com.ar/>>
- [13] Daigger, FINEPCR® Thermo Rotisserie/Orbital Shaker
[Consultado 13/05/2010]
<<http://www.daigger.com/catalog/product/d-Orbital/Orbital/p-4894JZ/FINEPCR®+Thermo+Rotisserie/Orbital+Shakers#>>
- [14] Daigger, LabGenius™ WiseMix® Digital Orbital Shakers
[Consultado 13/05/2010]
<<http://www.daigger.com/catalog/product/d-Orbital/Orbital/p-7868A/LabGenius™+WiseMix®+Digital+Orbital+Shakers>>
- [15] Daigger, Thermo Scientific MaxQ Incubated/Refrigerated Orbital Shakers
[Consultado 13/05/2010]
<<http://www.daigger.com/catalog/product/d-Orbital/Orbital/p-22402A/Thermo+Scientific+MaxQ+Incubated/Refrigerated+Orbital+Shakers#>>
- [16] Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española
Vigésima Segunda Edición [Consultado en línea]
- [17] Donald E. Kirk
1998 Optimal control theory: an introduction, Dover Publications

- [18] Daigger, Orbital Shakers [Consultado 17/05/2010]
<<http://www.daigger.com/catalog/department/d-Orbital/Orbital>>
- [19] James R. Leigh
1988 Temperature Measurement & Control, Peter Peregrinus Ltd.
- [20] J. David Irwin
1997 The Industrial Electronics Handbook, CRC Press
- [21] Buehler Motors, Hoja de datos 1.61.046.xxx [Consultado 4/11/2010]
<[http://www.buehlermotor.com/C12572D40025EAF8/vwContentByKey/W274AHFA065WEBREN/\\$FILE/DC-gear-motor-1_61_046_en.pdf](http://www.buehlermotor.com/C12572D40025EAF8/vwContentByKey/W274AHFA065WEBREN/$FILE/DC-gear-motor-1_61_046_en.pdf)>
- [22] Heraeus, Hoja de datos sensor M213 [Consultado 4/11/2010]
< <http://www.hst-us.com/pdf/2010/M213%20Pt%20RTD%20thin%20film.pdf> >
- [23] Honeywell, Hoja de datos y notas de aplicación sensor TD5A
[Consultado 4/11/2010]
http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci_id=140301&la_id=&pr_id=103116 >
- [24] Webster, John G.
2003 Medical Instrumentation: application and design, John G. Webster
Editor
- [25] Timothy J. Maloney
2006 Electrónica Industrial Moderna, Pearson Educación
- [26] A.R. San Vicente, J.A. Acosta
Diseño y construcción de un controlador de temperatura para incubadora,
Memorias II Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, Habana
2001