

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN GERMINADOR ELECTRÓNICO
PILOTO PARA SEMILLAS**

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

Manuel Alejandro Masuda Nishimata

ASESOR: Ing. Alejandro Carlos Alcócer García

Lima, 2015

Resumen

El Perú se encuentra entre los países más vulnerables al cambio climático. En este contexto, el país depende mucho de la agricultura, pues es la actividad más realizada en sectores rurales. Diversos estudios indican que pequeñas variaciones en condiciones climáticas pueden influir negativamente la germinación, lo cual afecta a la agricultura. Una posible medida para asistir a los agricultores son los germinadores, que pueden controlar las diversas condiciones ambientales para incentivar el brote de semillas. Sin embargo, no existen proveedores conocidos de estos dispositivos en el Perú, y los que existen en el extranjero suelen apuntar a fines diferentes a la agricultura.

La idea de desarrollar un germinador nace en el Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO PUCP), pues necesitaba hacer brotar unas semillas en Lima, Perú. No obstante, estas necesitaban condiciones climáticas diferentes a las de la zona, y emplear un invernadero completo no era viable. Es por esto que la organización busca apoyo en los tesis de Ingeniería Electrónica para realizar el proyecto.

Dada la necesidad de hacer germinar estas semillas y teniendo en cuenta que localmente no existen estos dispositivos, en la presente tesis se desarrolla un piloto de germinador electrónico que pueda servir como base para el futuro desarrollo de equipos similares. Para lograr esto, en primer lugar se realiza una investigación acerca del tema, para luego determinar que los factores más críticos para la germinación son la temperatura y la humedad a la que la semilla es expuesta. Una vez que se determinan los parámetros que debe seguir el diseño, se procede a detallar todo el diseño del germinador en sí. Se abarca desde la selección de los componentes hasta la fabricación y ensamblado de los circuitos electrónicos, para lograr implementar un modelo funcional.

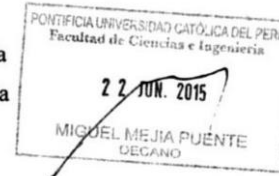
Una vez armado el piloto, se realizan pruebas de funcionamiento para verificar que el circuito regulador del microclima funciona correctamente. Estas pruebas incluyen dejar el germinador operando por varios días, para determinar sus ventajas y limitaciones. Se concluye que como piloto y a nivel de circuito de control, el proyecto funciona de manera correcta, pero se debe armar la estructura del germinador tomando en consideración las pérdidas térmicas para lograr una mayor diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del equipo. Asimismo, se sugieren cambiar ciertos componentes para reducir el riesgo de un mal funcionamiento. Por último, se hace énfasis en que el proyecto se realizó de manera modular para que se pueda reusar el diseño de algunas partes en caso se decida hacer un rediseño de hardware.

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un germinador electrónico piloto para semillas
 Área : Circuitos y Sistemas # 1271
 Asesor : Ing. Alejandro Carlos Alcócer García
 Alumno : Manuel Alejandro Masuda Nishimata
 Código : 20090480
 Fecha : 09-06-2014


Descripción y Objetivos

El Perú se encuentra entre los países más vulnerables al cambio climático. En este contexto, el país depende mucho de la agricultura, pues es la actividad más realizada en sectores rurales. Diversos estudios indican que pequeñas variaciones en condiciones climáticas pueden influir negativamente la germinación, lo cual afecta a la agricultura.

Una posible medida para asistir a los agricultores son los germinadores, que pueden controlar las diversas condiciones ambientales para incentivar el brote de semillas. Sin embargo, no existen proveedores conocidos de estos dispositivos en el Perú, y los que existen en el extranjero suelen apuntar a fines diferentes a la agricultura.

Como punto inicial, la presente tesis busca describir los principales parámetros que afectan la germinación: la temperatura, la humedad y la iluminación. En base a esta información, se diseñará un sistema de monitoreo integral de estos factores que al mismo tiempo puedan controlarlos para lograr obtener las condiciones óptimas para la germinación.

Para que este sistema sea efectivo, en primer lugar se debe diseñar e implementar un control de temperatura programable. Además, se deberá incluir un control de humedad también programable, y uno de iluminación que se sincronice con un reloj para que funcione de acuerdo a horarios. Por otra parte, el sistema debe ser operable por un usuario que no sea especialista en electrónica. Finalmente, el sistema deberá de ser capaz de llegar a los valores establecidos para que las semillas que se vayan a colocar en este dispositivo puedan desarrollarse bajo las condiciones más adecuadas.

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATANO SANCHEZ

MÁXIMO 50 PÁGINAS

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un germinador electrónico piloto para semillas

Índice

Introducción

1. Proceso de germinación en condiciones tradicionales
2. Estado del arte de los sistemas de germinación y consideraciones para el diseño
3. Diseño del germinador con control ambiental
4. Implementación y pruebas del piloto. Costos

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

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

MÁXIMO 50 PÁGINAS

Contenido

| | |
|--|----|
| Resumen..... | ii |
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Proceso de germinación en condiciones tradicionales | 2 |
| 1.1 Antecedentes en el Perú..... | 2 |
| Situación actual del cambio climático en el Perú | 2 |
| Agricultura y cambio climático | 2 |
| 1.2 Variables Externas..... | 3 |
| 1.3 Variables Internas..... | 4 |
| 1.4 Problemática actual | 5 |
| Capítulo 2: Estado del arte de los sistemas de germinación y consideraciones para el diseño..... | 7 |
| 2.1. Estado del Arte | 7 |
| 2.1.1. Presentación del asunto de estudio | 7 |
| 2.1.2 Información acerca del proceso de germinación | 8 |
| 2.1.3 Productos Existentes..... | 10 |
| 2.1.4 Tecnología actual en sensores..... | 12 |
| 2.2 Conceptos Generales | 13 |
| 2.3 Modelo Teórico del germinador | 14 |
| 2.4 Hipótesis..... | 16 |
| 2.4.1 Hipótesis Principal..... | 16 |
| 2.4.2 Hipótesis Secundarias | 16 |
| 2.5 Objetivos | 17 |
| 2.5.1 Objetivo General | 17 |
| 2.5.2 Objetivos específicos | 17 |
| Capítulo 3: Diseño del germinador con control ambiental | 18 |
| 3.1 Metodología de la investigación | 18 |
| 3.1.1 Universo y muestra..... | 18 |
| 3.1.2 Procedimiento e instrumentos de análisis | 18 |
| 3.2 Características iniciales del diseño | 19 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.2.1 | Sensores de temperatura | 19 |
| 3.2.2 | Actuadores de Temperatura | 21 |
| 3.2.3 | Control de Humedad y actuadores | 23 |
| 3.2.4 | Control de Iluminación | 24 |
| 3.3 | Diseño del circuito..... | 25 |
| 3.3.1 | Diagrama de bloques del circuito | 25 |
| | Inputs | 25 |
| | Outputs..... | 25 |
| 3.3.2 | Selección de componentes | 26 |
| 3.3.3 | Diagramas esquemáticos | 31 |
| 3.3.4 | Diseño de Circuitos impresos | 33 |
| 3.4 | Diseño del Programa | 35 |
| 3.4.1 | Menu Principal | 35 |
| 3.4.2 | Pantalla principal | 36 |
| 3.4.3 | Botones..... | 36 |
| 3.4.4 | Convertidor Análogo Digital (Analog-Digital Converter – ADC)..... | 36 |
| 3.4.5 | Diagramas de flujo | 37 |
| Capítulo 4: Implementación y pruebas del piloto. Costos. | | 39 |
| 4.1 | Simulación..... | 39 |
| 4.2 | Implementación y pruebas..... | 40 |
| 4.2.1 | Pruebas del RTC..... | 40 |
| 4.2.2 | Pruebas en laboratorio | 41 |
| 4.2.3 | Pruebas en campo | 42 |
| 4.2.4 | Resultados | 44 |
| 4.3 | Costos..... | 44 |
| Conclusiones y Recomendaciones..... | | 47 |
| Bibliografía | | 49 |
| Anexos | | 51 |
| A1. Tabla de Especificaciones de germinadores industriales | | 51 |

| | |
|---|----|
| A2. Definiciones Operativas | 51 |
| Indicadores cualitativos | 51 |
| Indicadores cuantitativos | 51 |
| A3. Cálculos de pérdida de calor | 52 |
| A4. Esquemático General (ampliado)..... | 53 |
| A5. Manual de Usuario | 54 |



Introducción

El Perú se encuentra entre los 10 países más vulnerables al cambio climático, pues presenta diversas características en su geografía que lo hacen más sensible a variaciones climáticas. En este contexto, el país depende mucho de la agricultura, pues es la actividad más realizada en sectores rurales. Diversos estudios indican que pequeñas variaciones en condiciones climáticas pueden influir negativamente la germinación, perjudicando a los agricultores. Actualmente no existen programas importantes para prevenir el cambio climático, o muchos estudios que puedan sugerir los efectos secundarios que este pueda tener. Una posible medida para asistir a los agricultores son los germinadores, que pueden controlar las diversas condiciones ambientales para incentivar el brote de semillas.

A pesar de lo expuesto, no existen proveedores conocidos de estos dispositivos en el Perú, y los que existen en el extranjero suelen apuntar a fines diferentes, ya sean ornamentales o producción de germinados para su consumo directo. Aquellos germinadores que cuentan con control ambiental suelen ser muy caros y demasiado grandes para utilizarlos para fines agrícolas. Por otro lado, aquellos que se aproximan más al tamaño deseado, no cuentan con un control electrónico, lo que incluso podría llegar a perjudicar a las semillas al no medir las variables ambientales para llegar a valores adecuados.

Por este motivo, la presente tesis busca desarrollar un germinador con control electrónico de temperatura, humedad e iluminación -factores externos que afectan el proceso de germinación- para poder simular las condiciones óptimas para la planta. Más específicamente, se buscará que el control de temperatura tenga un error menor a las oscilaciones que puedan ser ocasionadas por el cambio climático. Además, el control de humedad deberá de mantener valores mucho más estables que aquellos vistos en condiciones normales. Por otro lado, este dispositivo deberá incrementar la probabilidad y reducir el tiempo de germinación de una semilla, a comparación de un proceso tradicional. Finalmente, el sistema tiene que ser fácil de usar; es decir, debe ser operable por un usuario sin conocimientos de electrónica.

El documento de tesis estará dividido en cuatro capítulos principales. El primero describirá el proceso de germinación actual, los posibles problemas detectados a lo largo de este y cómo el cambio climático puede afectarlo. El segundo capítulo expondrá el estado del arte en el tema, ya sean investigaciones acerca de la germinación de diferentes tipos de semillas y los factores que la afectan, así como los actuales sensores y actuadores que podrían usarse en el dispositivo a diseñar. El tercer capítulo se explayará en todo el proceso de diseño del germinador, desde la selección de los componentes hasta la programación del microcontrolador. Finalmente, el cuarto capítulo hablará de la implementación y las pruebas que se realizarán al dispositivo terminado.

Capítulo 1: Proceso de germinación en condiciones tradicionales

1.1 Antecedentes en el Perú

Situación actual del cambio climático en el Perú

El Perú se encuentra entre los 10 países más vulnerables al cambio climático, pues presenta diversas características en su geografía que lo hacen más sensible a variaciones climáticas (Minam-PNUD 2010:127). Según reportes del MINAM, en los próximos 30 años, la temperatura máxima y mínima promedio variaría en 1.6 °C. Las zonas más afectadas serían todo el norte del país, la sierra central y el sur del país. Por otro lado, las lluvias aumentarían hasta en 20 % en la costa y sierra norte, parte de la sierra central y selva sur; y disminuirían hasta en 20 % en la selva norte y parte de la sierra central y sur (Minam-PNUD 2010:127).

Agricultura y cambio climático

La agricultura representa la actividad primordial del 23.3 % de la población económicamente activa (PEA) nacional y el 65 % de la PEA rural, y genera ingresos por un valor de 1800 millones de dólares, que se traduce en el 4.7 % del PBI nacional (Minam-PNUD 2010:144). Si el cambio climático afectara la productividad de las tierras, repercutiría negativamente en una gran cantidad de la población. Por otro lado, si bien no representa una gran parte del PBI, la cadena de suministros a distintas ciudades del país se vería perjudicada, causando pérdidas aún mayores.

Ahora bien, la pobreza es un factor crítico en la vulnerabilidad de este sector, pues muchas veces la población de agricultores ignora los riesgos o incluso la presencia del cambio climático. Más aún, sus bajos recursos no les permiten tener seguros o tecnología que puedan ayudar a mitigar los efectos negativos del mismo. En la última década, ya se han reportado grandes pérdidas por la variabilidad climática; por ejemplo, en el periodo 2006-2007, se reportaron pérdidas que superaron los S/. 250 millones (La Revista Agraria 01-2014:158-159). En parte, esto se debe a que en el Perú no existen muchas políticas de prevención de desastre, más bien se está implementando programas para actuar en caso de emergencia en vez de prevenir (La Revista Agraria 02-2013:148-149). Esto no quiere decir que estos no funcionen o no sean importantes; pero es necesario formar una cultura de prevención paralelamente.

En referencia a factores climáticos, los más significativos para la agricultura son la temperatura y la humedad, ambos afectados por el cambio climático. No obstante, no existen muchos estudios acerca del efecto específico que puedan tener sobre las plantas (La Revista Agraria 01-2013:147). A veces la falta de estudios puede generar resultados poco exactos o sin un valor científico real, perjudicando las posibles medidas que puedan tomarse para prevenir

daños. Esto pone en evidencia que se necesita una mayor cantidad de recursos para poder obtener datos para validar resultados previos y obtener información nueva.

1.2 Variables Externas

La figura 1.1 muestra las variables externas relacionadas con el proceso de germinación y el dispositivo germinador. En la gráfica se detallan los requerimientos para que este proceso funcione. En general, se menciona que actualmente la metodología es bastante tradicional y trabajoso a nivel organizacional. Por otro lado, en el medio local no existen regulaciones de las autoridades ni recursos diversos que puedan facilitar el trabajo; es decir, no aparecen resultados al buscar en la base de datos de las NTP. Sin embargo, se sabe que existe la tecnología a nivel mundial, y que incluso localmente, es posible fabricar un dispositivo que pueda asistir a los agricultores en la germinación. El cambio climático es uno de los factores que menos se pueden controlar y es lo más probable que afecte a todo el desarrollo de las cosechas. Siendo la agricultura una actividad muy común en el país, es crucial disponer de todos los recursos posibles para optimizar todo el proceso.

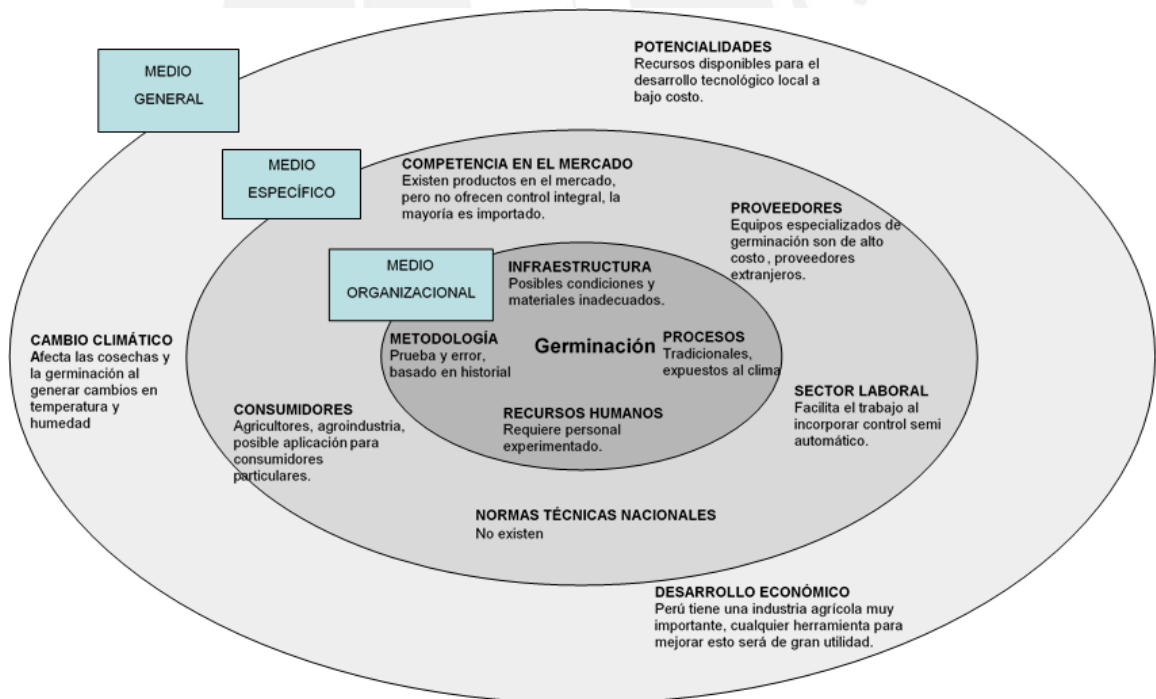


Figura 1.1: Variables externas. Elaboración propia.

1.3 Variables Internas

Se describe a continuación, en la figura 1.2 y la tabla 1.1, el proceso de germinación tradicional para cultivos en la costa. En esta zona, los problemas de germinación suelen ser menores que en zonas altoandinas, sin embargo, se pueden extraer posibles problemas y hacer énfasis en ciertos procesos que pueden ser mejorados con recursos tecnológicos.

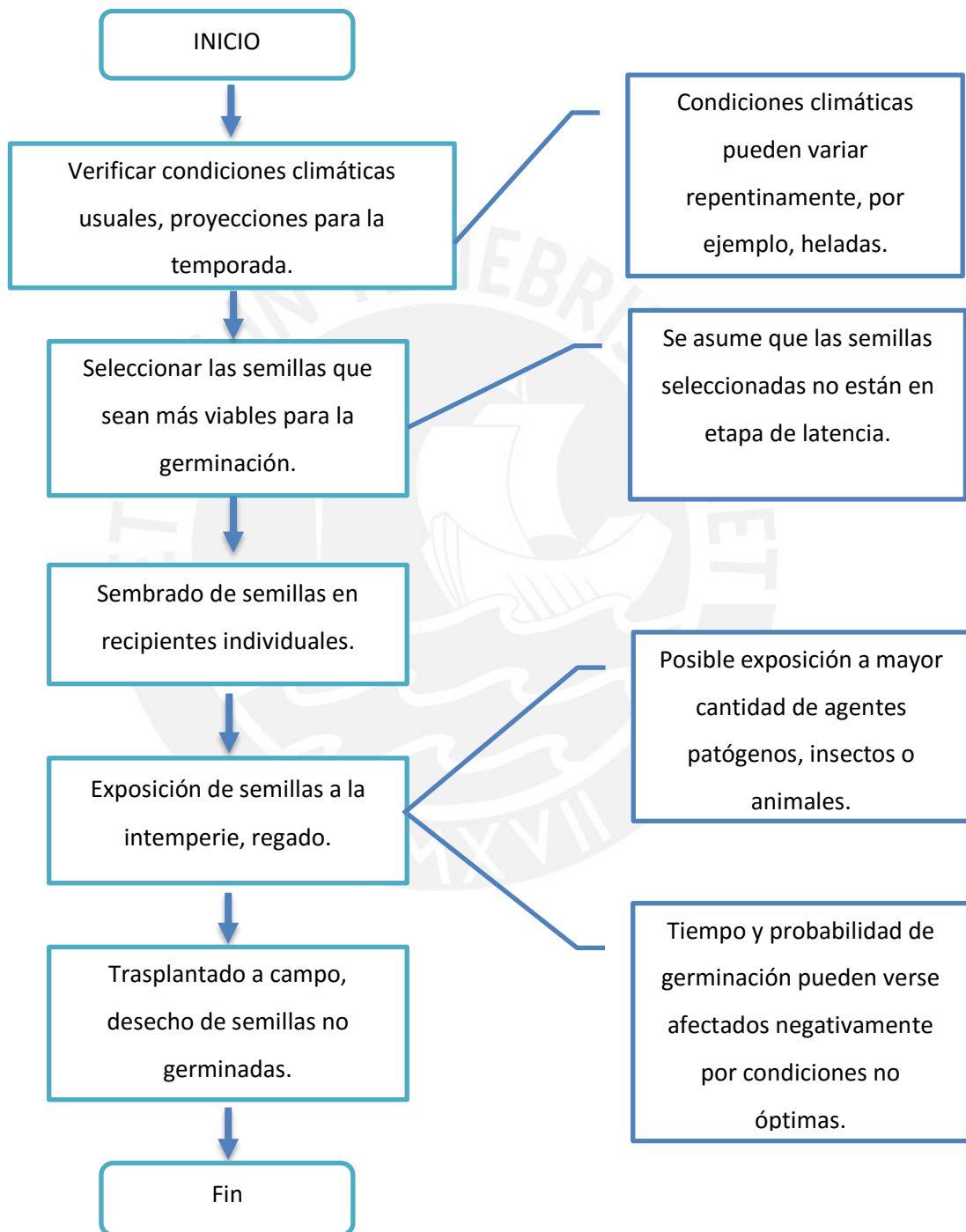


Figura 1.2: Proceso de germinación en la costa y problemas hallados. Elaboración propia.

Tabla 1.1: Problemas de la germinación: características y causas. Elaboración propia.

| Problemas | Características y causas |
|---|--|
| Acontecimientos inesperados o variaciones climáticas repentinas. | Fenómenos climáticos comunes en el Perú, como heladas, pueden causar condiciones extremas que inhiban la germinación o incluso maten a la semilla. |
| 1. Se asume que las semillas no están en periodo de latencia. | Una semilla en periodo de latencia no está lista para germinar, y a veces requiere de condiciones específicas (diferentes a las óptimas para su germinación) para salir de esta etapa. |
| 2. Posible exposición a mayor cantidad de patógenos, insectos o animales. | En el proceso tradicional se exponen las semillas a la intemperie, lo que las vuelve vulnerables a otros organismos que pueden comerse o afectar negativamente a la semilla. |
| 3. Condiciones del tiempo como temperatura y humedad pueden afectar a la germinación. | Muchas semillas necesitan condiciones precisas para la germinación. Al querer hacer germinar semillas fuera de su hábitat natural, o incluso debido a variaciones debido al cambio climático en su propio hábitat, es posible que las condiciones no sean las óptimas. |

1.4 Problemática actual

Este proyecto busca poder proporcionar un recurso de germinación a agricultores de diversas zonas rurales, además de propiciar un instrumento que pueda ayudar a generar una mayor cantidad de datos para futuros estudios. El rápido cambio climático propicia que las condiciones cambien de manera más brusca a lo largo del año, lo que perjudica al cultivo de plantas. La germinación sería especialmente difícil, pues en esta etapa la planta es más vulnerable. En consecuencia, un germinador, en donde las condiciones ambientales están controladas electrónicamente, mejoraría considerablemente las probabilidades que las plantas sobrevivan hasta que lleguen a una etapa más madura, en la cual es más fácil que se adapten a las nuevas condiciones ambientales.

Dado que no existen estudios con datos del impacto del cambio climático sobre la germinación, no se pueden dar estimaciones del posible impacto económico que una masificación de este aparato pueda causar. Por ello, sería de mucha utilidad poder contar con instrumentos de bajo

costo para comenzar a recopilar datos. Es urgente que se tomen medidas de prevención ante la variación climática, y no solo programas de acción ante emergencias.

De acuerdo a los datos mencionados anteriormente, y que más adelante serán estudiados, tanto la temperatura como la humedad juegan un papel muy importante en la germinación y a lo largo de la vida de las plantas. Un ligero cambio en cualquiera de estos puede reducir la probabilidad de germinación, poniendo en un mayor riesgo tanto cosechas como especies nativas, ya que su reproducción sería más lenta. Se pone en evidencia, entonces, que con el cambio climático muchas especies migrarán a hábitats que se asemejen a lo que estaban acostumbradas y otras se extinguirán. Muchos biólogos y científicos concuerdan que la biodiversidad no tiene un precio, y surge la necesidad de tomar acciones para preservar aquellas que están en riesgo.

Debido a que este germinador se llevaría a sectores rurales, no podría tener un programa y componentes que se puedan descalibrar fácilmente, pues perdería la funcionalidad. Algo importante que se debe mencionar es que se va a simular un ambiente ideal para las plantas, lo que quiere decir que, a diferencia de una planta común, la respuesta que debe tener es bastante lenta, y no requiere de sistemas predictivos o de acción rápida.

Un problema constante en invernaderos y germinadores es la presencia de bacterias y hongos. Así como la temperatura y la humedad beneficia el crecimiento de las plantas, también estimula el crecimiento de hongos y la reproducción de bacterias y otros microorganismos, lo que puede ser perjudicial para las plantas recién germinadas y para quien las quiera consumir. Esto también causa que el germinador se ensucie rápidamente y necesite de un constante mantenimiento para que siga funcionando de manera correcta.

Capítulo 2: Estado del arte de los sistemas de germinación y consideraciones para el diseño

2.1. Estado del Arte

2.1.1. Presentación del asunto de estudio

Los humanos han sabido cultivar plantas desde los inicios de la sociedad, es un conocimiento que ha sido transmitido de generación en generación y que hasta hoy se sigue aplicando. Si bien los métodos tradicionales de agricultura son eficientes y han sido satisfactorios desde la antigüedad, siempre se puede implementar nueva tecnología para mejorar las condiciones en las cuales se trabaja. Adicionalmente, el mundo se encuentra en una etapa de rápido desarrollo tecnológico en diferentes campos de la industria, incluso la agronomía. Nuevos estudios han incrementado la comprensión que se tiene acerca de las plantas, pudiendo mejorar así el proceso de cultivo.

Una de las etapas más cruciales de este proceso es la germinación. Este abarca desde que la semilla es plantada hasta que la planta crece lo suficiente para que se pueda trasplantar a un medio en donde pueda desarrollarse mejor. Lo más común es que, al menos que sea una semilla muy difícil de germinar, estas se lancen sobre el campo de cultivo. En el mejor de los casos, se siembran en bandejas dentro de invernaderos para estimular este proceso.

Los estudios actuales y los métodos aplicados buscan aumentar la probabilidad de germinación de una semilla. En esta etapa inicial de vida es cuando la planta se encuentra más vulnerable a cualquier factor externo, y por lo tanto se tienen que buscar maneras de proteger a la planta. Debido a agentes patógenos o a condiciones ambientales poco adecuadas, no es raro que una semilla pueda pasmarse o la planta recién germinada muera. El objetivo del diseño de un germinador con control electrónico es mejorar las condiciones ambientales para la semilla y que pueda brotar más rápido y de manera sana.

El diseño de un sistema electrónico para un germinador no busca que todo el proceso de brote sea automático, sino que el agricultor o agrónomo pueda tener brotes de las plantas seleccionadas de una manera más controlada y segura, sin depender exclusivamente del clima exterior. Además, el diseño requerirá la operación por parte de alguien con conocimiento en el tema, pues tendrá un rango de operación para diferentes semillas, lo que quiere decir que habrán rangos en los cuales ciertas semillas crecerán y otras no.

2.1.2 Información acerca del proceso de germinación

Temperatura

Es importante mencionar que cada semilla tiene diferentes características. Al hablar con diferentes personas encargadas de invernaderos, se concluyó que la capa exterior de la semilla – el exocarpo- es determinante en el tiempo y las condiciones ambientales de germinación. Si esta es muy gruesa, como en el caso de las semillas de las palmeras, puede soportar temperaturas de hasta 32 grados Celsius y demorarse más de 2 años en romperse. En cambio, si esta “piel” es delgada, la semilla puede brotar en cuestión de días, y con temperaturas no mayores a 25 grados Celsius. Esta observación basada solo en la capa exterior de la semilla es un fuerte indicador que cada especie de semilla tiene una temperatura ideal para la germinación.

Diversas fuentes (Baskin y Baskin, Raven, Tom Clothier) coinciden en que una temperatura adecuada es crucial para la germinación y el desarrollo de la planta en general. En pocas palabras, cuando el ambiente está muy frío, la semilla no saldrá; mientras que si está muy caliente, es probable que la semilla se seque o muera. Se debe resaltar que para cada especie hay una temperatura adecuada, y mientras más se aleja de este ideal, la probabilidad de germinación disminuye mientras que el tiempo que tarda la semilla en germinar es mayor. Esto se observa en diversas tablas mostradas en el libro de Baskin y en el siguiente gráfico (Figura 2.1) que resume este hecho.

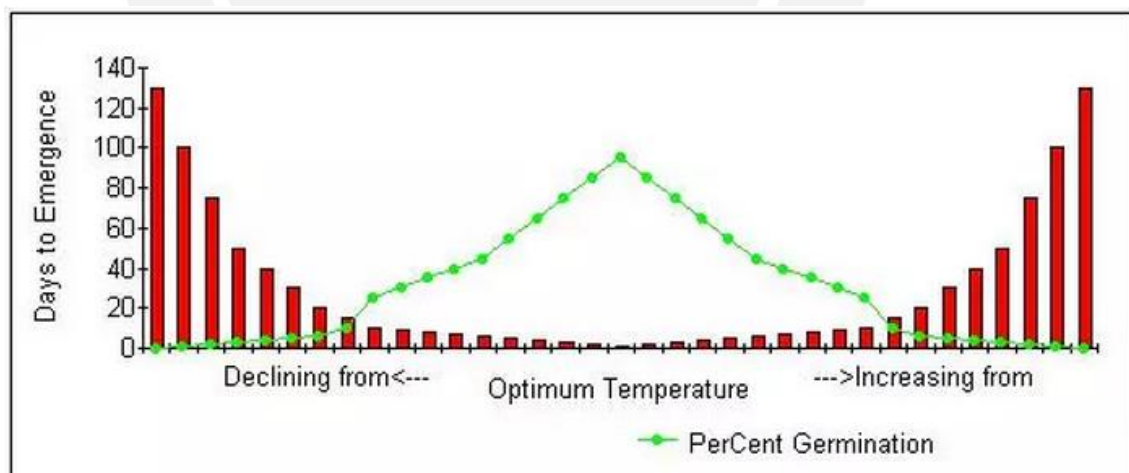


Figura 2.1: Tiempo y porcentaje de germinación vs temperatura óptima.
Extraído de <http://tomclothier.hort.net/page11.html>.

Humedad

Por otro lado, la humedad también es crucial para todo este proceso. Se debe controlar la cantidad de agua en la tierra para que suavice el exocarpo y facilite la germinación de la semilla. Sin embargo, este debe ser lo suficientemente bajo para no incentivar el crecimiento de hongos o bacterias ni que haya tanta agua que inunde el medio alrededor de la semilla, ya

que ambos inhiben la germinación. De manera similar que con la temperatura, la humedad que requiere cada semilla varía de acuerdo a la especie. Se recomienda que el sustrato esté entre 50 y 100% de saturación de agua (Baskin y Baskin, 2014:17).

Para mantener la humedad adecuada, existen dos tipos conocidos de riego, cuyas características básicas se muestran a continuación:

Tabla 2.1: Comparación entre tipos de riego. Elaboración propia.

| | |
|----------------------------|---|
| Riego por goteo | <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia en el uso de agua. • El agua se concentra solo en donde se desea, esto lleva más agua a las raíces solamente, evitando el crecimiento de mala hierba. • Variedad de productos en el mercado. |
| Riego por aspersión | <ul style="list-style-type: none"> • Riega una superficie uniformemente. • Menos eficiente. • Existen opciones de bajo costo. |

Por el mismo motivo que el riego por goteo inhibe el crecimiento de mala hierba, también inhibe la germinación en general para la mayor parte de especies, pues moja constantemente la raíz, provocando que el sustrato esté completamente saturado de agua todo el tiempo. Por ello, el riego por aspersión es más adecuado para un germinador. Al conversar con biólogos y personas que trabajan en el cambo, coincidieron que para la utilidad de este proyecto, este último tipo de riego es el más adecuado.

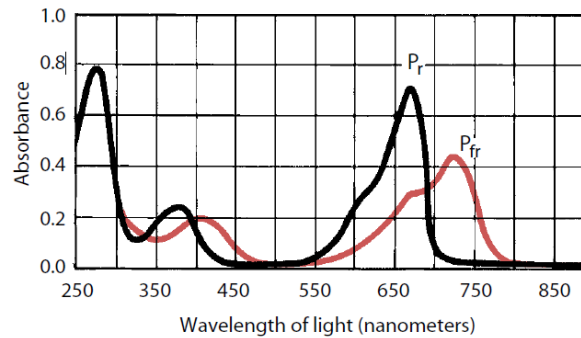
Iluminación

Las plantas tienen diferentes tipos de fotoreceptores, los cuales regulan distintas funciones a lo largo del ciclo de vida de las mismas. Uno de los más estudiados son los fitocromas¹, que son un fototransductor de luz roja o infrarroja, y está demostrado que son esenciales en todas las transiciones del desarrollo de una planta. Los fitocromas son sintetizados en su forma Pr, los cuales tienen una absorción pico en 660 nm, y otra en 380 nm. Cuando la forma Pr se activa, se convierte a la forma Pfr, que absorbe la luz con una longitud de onda de 730 nm, y regresa nuevamente a Pr cuando recibe este tipo de luz. La forma Pfr, es decir, cuando la planta se expone a luz roja, se relaciona con la inducción de crecimiento y desarrollo de la planta, incluidas las semillas. (Fankhauser y Chory, 1997: 5). Se muestra en la figura 2.2 el espectro de frecuencias que absorben los fitocromas.

Nuevamente, depende mucho de la especie para que las condiciones de iluminación sean óptimas. En algunas especies, es necesario que las semillas se expongan a la luz, mientras que

¹ Fitocroma: cromoproteína sensible a la luz en el espectro del rojo hasta el infrarrojo, que controla diversas etapas de crecimiento y desarrollo en la planta.

en otras, no. Asimismo, el tiempo que estén expuestas las semillas a la luz también puede afectar los resultados, ya que los fitocromas tienen diferentes tipos de respuesta dependiendo del tiempo de exposición. Se sabe, por ejemplo, que una luz continua activa puede activar la respuesta de alta irradiancia, que inhibe la germinación. La Seed Testing International Association recomienda una iluminancia de entre 750 y 1250 lux para estudios de germinación, lo que significaría que dos fluorescentes blancos a 15 – 20 cm sobre cada incubadora encendidos por pocas horas al día sería suficiente (Baskin y Baskin, 2014:23).



28–18 Absorption spectra of P_r and P_{fr} The difference in the absorption spectra of the two forms of phytochrome, P_r and P_{fr} , made it possible to isolate the photoreceptors.

Figura 2.2: Espectro de absorción de P_r y P_{fr} .
Extraída de Biology of Plants (Raven, 2013)

2.1.3 Productos Existentes

En la figura 2.3 se muestra un producto que ya está en el mercado, llamado Click and Grow. Este aparato apunta al sector de la población que vive en ciudades pero que le gusta crecer sus propias plantas y tenerlas dentro de casa. Ofrece dos modelos, el más caro costando alrededor de \$100. La ventaja de este sistema es que viene ya con semillas y pequeñas macetas en donde la planta se puede desarrollar. Además, la empresa ha desarrollado un sustrato que permite que el agua drene, evitando así hongos y microorganismos que puedan vivir en agua empozada. Por otro lado, indica al usuario cuándo la planta necesita agua. Tiene capacidad para 3 plantas.

La figura 2.4 es una foto de un sistema de germinación de la empresa Hydrofarms, cuyo precio en el mercado bordea los \$35. Es bastante simple, pues solo tiene una manta calentadora y una bandeja con macetas a la cual se le echa agua cuando el usuario crea necesario. El domo evita que esta se evapore tan rápido y protege a las plantas de insectos. También está dirigido a aficionados de la agricultura que vive en espacios reducidos y no tiene su propio huerto. Mide aproximadamente 30 cm x 60 cm, lo que se traduce en espacio suficiente para 72 semillas, de acuerdo a especificaciones del fabricante.

La figura 2.5 muestra un sistema de germinación de Freshlife, el cual cuesta aproximadamente \$150 actualmente. Este sistema tiene un control automático de riego, y la empresa afirma que el riego depende de la temperatura que haya dentro del germinador. Sin embargo, además del riego no hay otro sistema que pueda controlar la temperatura. Por otro lado, existen reviews que sugieren que el control de temperatura es en realidad un temporizador programado para activar el aspersor. Al igual que los sistemas anteriores, el público objetivo para este producto es gente que viva en ciudades con gusto por lo orgánico.



Figura 2.3: Jardín inteligente Click and Grow.

http://i.i.cbsi.com/cnwk.1d/i/tim2/2013/10/02/Click_and_Grow_Collage2.jpg



Figura 2.4: Estación de germinación Hydrofarm.

http://www.hydrofarm.com/image.php?image=/i/jpg/1898_6173.jpg&width=800&height=800



Figura 2.5: Germinador automático Freshlife.

<http://www.freshlifesprouter.com/dodont.asp>

También existen productos para el sector industrial (Figura 2.7), pero solo se pudieron hallar a través de sitios web como alibaba.com, en donde proveedores ofrecen estos productos al por mayor. Estos ya resultan ser muy grandes para el objetivo que se está buscando con esta tesis, además que el consumo energético es bastante elevado. Sin embargo, no se descarta tener que llegar a una potencia similar a los productos más pequeños, ya que los elementos que se incorporarían al germinador fabricado son muy similares a los ofrecidos por estos proveedores. La desventaja de estos sistemas es principalmente su precio, que asciende a más de \$1000.



Figura 2.7: Estación de germinación comercial

2.1.4 Tecnología actual en sensores

En la actualidad existe una gran variedad en los sensores electrónicos que pueden ser necesarios para lograr el control óptimo de un germinador. En el capítulo 3 se describirán con más detalle los modelos de sensores que fueron opciones para el proyecto. En términos generales, para diseñar el germinador se necesitan dos sensores básicos: un sensor de humedad de la tierra y un sensor de temperatura. Se estima que el control de iluminación no requerirá de un lazo cerrado pues la intensidad de luz puede ser pre programada en el microcontrolador, así como los tiempos de encendido.

Los sensores de humedad de la tierra son generalmente usados para fines agrícolas, y para fines de medición por medio de voltajes existen dos tipos principales. El primero es el método de bloques resistivos, que inserta dos electrodos en un material poroso que pueda actuar como filtro y solo deje pasar la humedad. La resistencia medida entre ambos será proporcional a la humedad en el medio. Una variación de este método es colocar los electrodos directamente en la tierra, pero suele causar problemas de corrosión y de sensibilidad a sales. El segundo método es el de sensores dieléctricos, que funcionan enviando frecuencias altas hasta hallar frecuencias de resonancia entre dos electrodos que usan la tierra entre ellos como un

dieléctrico. Estos sensores suelen ser más precisos, pero a la vez más caros por lo que no se suelen usar para fines agrícolas, sino para laboratorios e investigaciones (Mecham 2010:2-3).

Para el caso de sensores de temperatura, existen diversos integrados que pueden medir la temperatura tanto analógica como digitalmente con errores que van desde varios grados centígrados hasta décimas de unidades. Existen otras opciones como termocuplas, las cuales también tienen una precisión adecuada para el trabajo que se está realizando. Sin embargo, se deberá de estudiar la factibilidad de acuerdo a los precios.

En pocas palabras, la tecnología requerida para censar diferentes parámetros en el germinador es bastante básica. Existe una variedad de sensores que pueden funcionar bastante bien para la utilidad que se les piensa dar. Entonces, es importante estudiar la relación entre el precio y las ventajas de cada sensor, más que la disponibilidad de estos. Se ha podido comprobar que en el mercado local estos recursos están disponibles.

2.2 Conceptos Generales

Para comprender mejor el tema de germinación, es necesario definir ciertos conceptos generales. A continuación, se muestran las definiciones básicas relacionadas con el proyecto de germinador.

- Semilla: Parte del fruto de las fanerógamas (o espermatofitas), que contiene el embrión de una futura planta, protegido por una testa, derivada de los tegumentos del primordio seminal (RAE, 2014).
- Latencia: Condición especial de crecimiento detenido, que necesita condiciones muy específicas para poder salir de ella.
- Germinación: Proceso en el cual una planta crece de una semilla.
- Germinador: Dispositivo diseñado específicamente para proporcionar condiciones adecuadas para la germinación de plantas.
- Control de temperatura: Sistema de control compuesto por diferentes componentes que monitorean y regulan la temperatura del sistema por medio de sensores de temperatura y actuadores, como calentadores o ventiladores. Este control se realiza en tiempo real y los elementos deben ser lo suficientemente rápidos como para poder satisfacer los requisitos del sistema.
- Control de humedad: Sistema que controla el nivel de humedad en un ambiente usando sensores y un conjunto de irrigadores (aplican agua sobre un terreno).
 - Riego por aspersión: Método de riego que, por medio de rociadores o aspersores, genera una “lluvia” localizada.

- Riego por goteo: Método de riego que mediante tuberías concentra el riego en puntos específicos utilizando goteros que funcionan continuamente.
- Control de iluminación: Sistema que controla la iluminación, por medio del encendido y apagado de focos, de acuerdo a tiempos preprogramados o a fotoreceptores que indiquen la cantidad de luz ambiental.
 - Fitocroma: es una cromoproteína sensible a la luz en el espectro del rojo hasta el infrarrojo, que controla diversas etapas de crecimiento y desarrollo en la planta.

2.3 Modelo Teórico del germinador

Inicialmente, este proyecto surge ante la necesidad del Grupo de Apoyo al Sector Rural (“GRUPO PUCP”), que requería de un germinador para lograr hacer que unas semillas broten en Lima. Dado que las condiciones climáticas locales no son las adecuadas, las primeras semillas con las que se hicieron pruebas no lograron germinar. Por ello, se propuso el proyecto de tesis para diseñar y fabricar un piloto de germinador, que pueda simular y controlar diversos factores climáticos para que estos se asemejen más a los ideales para las semillas.

Dado que no se ha podido hallar un proyecto similar al que se está realizando, que incluya todos los tipos de control y haya sido diseñado para objetivos similares, en esta tesis se debe realizar desde el diseño hasta la implementación de un prototipo, tanto software como hardware de todo el germinador. De acuerdo a lo investigado, se dividirá el control del germinador en tres partes diferentes: control de temperatura, control de humedad e iluminación. En una etapa inicial de investigación, se determinó que el sustrato no tiene que ser una tierra rica en nutrientes, pues es indiferente para la primera etapa de vida de una planta. Lo que debe buscarse es que sea un medio en el que no proliferen los hongos y no sea alcalino.

Si bien hasta ahora la mayor parte de germinadores disponibles se encuentra destinado al mercado de personas individuales, este proyecto busca diseñar un aparato que pueda ser usado con fines agroindustriales. Por ello, se requiere que pueda hacer crecer a unas 500 plantas al mismo tiempo, siempre y cuando las semillas sean pequeñas. Otro factor importante es que el Grupo de Apoyo al Sector Rural (GRUPO PUCP) desea que todo el aparato pueda funcionar independiente del suministro eléctrico para poder ser llevado a zonas alejadas de bajos recursos. Por esto, la energía debería ser provista por un panel fotovoltaico.

Dado que el equipo debe tener un consumo de energía muy bajo, se debe de tratar de ahorrar en todas las partes que tenga el germinador. Como se mencionó, en un caso ideal un germinador debe tener diferentes tipos de control, siendo los más importantes la temperatura,

la humedad y la luz. De los tres elementos, el que consumirá más probablemente sean los calefactores. De todas formas, se debe encontrar los elementos de iluminación y bombas de agua que sean lo más ahorrativos en cuestión de energía.

En la actualidad, la fuente de luz que menos energía por lumen consume son los leds². Si bien solían tener un costo elevado, los precios de este tipo de tecnologías han disminuido considerablemente en los últimos años por la gran demanda que existe para este tipo de producto. Es por esto que es una manera viable de lograr un sistema de bajo consumo y bajo costo para el germinador. Otra ventaja de los leds según investigaciones de la Universidad de Wisconsin-Madison (1991) es el ángulo en el cual la luz es emitida. Es decir, los leds emiten luz en una dirección muy específica, similar a un cono angosto. Esto se traduce en más eficiencia pues de otra manera, la luz producida no estaría siendo aprovechada por las plantas al no iluminarlas directamente.

Una de las mayores preocupaciones al momento de hacer un control automático de luz es la fotosíntesis. La absorción de luz en las plantas para la fotosíntesis se realiza a través de unas proteínas llamadas fitocromos. Existen estudios previos que indican que la absorción de la luz solar tiene picos en la longitud de onda de la luz azul y la luz roja o naranja (Fankhauser, 1997). Por esto, se pueden usar leds de esos colores específicos para poder cubrir las necesidades de la planta sin desperdiciar energía generando luz de otras longitudes de onda que no van a poder ser aprovechadas para la fotosíntesis.

El control de temperatura es el más importante de acuerdo a diversas fuentes. Por ello, este módulo tendrá el control más complejo. Un microcontrolador tendrá como entrada un sensor de temperatura, y comparará las lecturas con datos ingresados por el usuario para que funcione en este rango de temperaturas. Finalmente accionará ventiladores y calentadores usando un driver para llegar al rango de temperatura deseado. Para el control de humedad y de nivel de agua, se requiere de un sensor de humedad y otro de nivel de agua para el tanque. En este caso, habrá datos pre programados, y los actuadores se accionarán al comparar los valores de los sensores con los grabados. Finalmente, el control de luz se considera ser el menos importante durante la etapa de germinación (es mucho más importante una vez que la planta ha brotado y necesita realizar fotosíntesis), por ello, se tendrá un arreglo simple de leds rojos y azules para que estimulen el crecimiento. En la figura 2.8 se muestra un esquema del modelo teórico del germinador.

² : led.: 1. m. Electr. Diodo de material semiconductor que emite luz al aplicar una tensión eléctrica, y que se utiliza para componer imágenes en pantallas de diversos instrumentos, como calculadoras, relojes digitales, etc. (RAE, 2014)

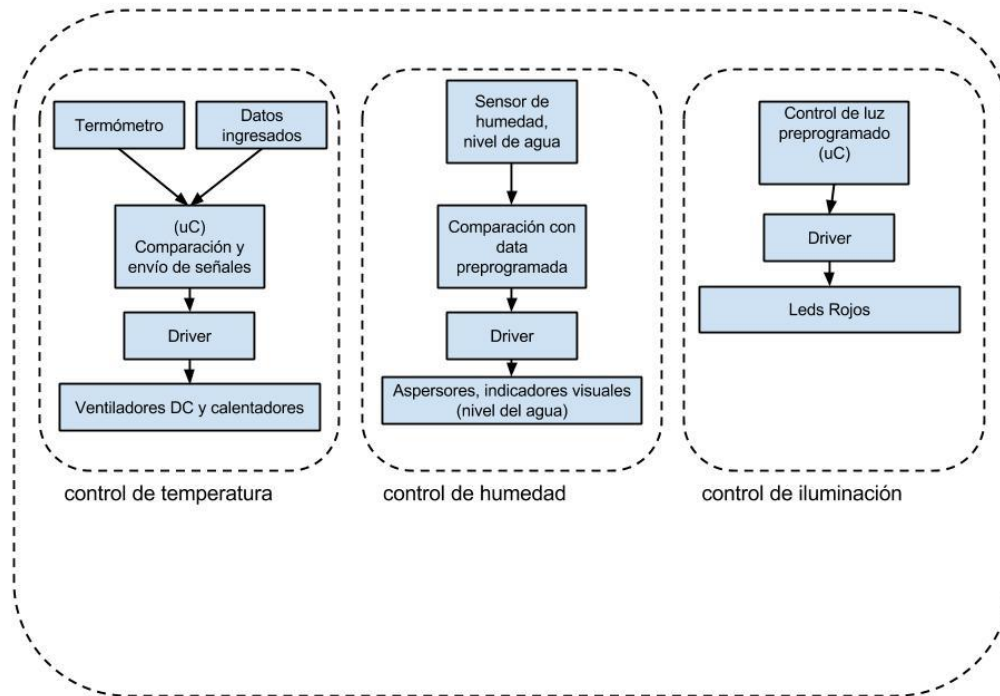


Figura 2.8: Modelo Teórico del germinador

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis Principal

Dado que no existen datos acerca del impacto del cambio climático sobre la germinación, pero sí existe información acerca de cómo factores externos afectan a las semillas, entonces se puede asumir qué pasará a largo plazo con la agricultura una vez que el clima varíe. Si bien existen modelos que predicen que no habrá mucho daño a la zona de Latinoamérica, no se puede descartar que los otros modelos, que sí predicen un escenario menos favorable, estén en lo correcto. Por ello, se desea probar que un aparato con control electrónico de temperatura, humedad e iluminación puede simular diferentes condiciones climáticas y posibles escenarios futuros, para lo que el germinador deberá poder llegar a valores estimados hallados en estudios previos.

2.4.2 Hipótesis Secundarias

Con la ayuda del germinador, se podrá hallar datos acerca de diversas semillas para obtener el rango óptimo de condiciones para la germinación. Además, se podría determinar qué especies son las más delicadas ante el cambio climático para poder tomar acciones preventivas.

De tener un rango amplio de control en las diversas variables, se podría simular condiciones adecuadas en cualquier lugar, lo que permitiría incubar plantas en hábitats diferentes a los normales para estudios y reproducción en laboratorios. Incluso, el germinador podría ser un

recurso para ayudar a germinar plantas en peligro de extinción, simulando las condiciones óptimas para su desarrollo.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitoreo integral de temperatura, humedad e iluminación que pueda controlar dichos parámetros para obtener las condiciones óptimas para la germinación.

2.5.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un control electrónico de temperatura programable por medio de una interfaz de usuario simple, con un error no mayor a 2 °C
- Diseñar e implementar un control de humedad programable con un error menor a 5 %.
- Diseñar e implementar un control de iluminación que funcione por tiempos, utilizando un RTC que no se desfase más de 5 minutos al mes.
- Incrementar la probabilidad y reducir el tiempo de germinación de una semilla, a comparación de un proceso tradicional.
- Lograr que el sistema sea operable por un usuario sin conocimientos de electrónica.

Capítulo 3: Diseño del germinador con control ambiental

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 Universo y muestra

Dado que el objetivo principal es diseñar el sistema de control climático, se toma como universo las condiciones requeridas por diferentes tipos de semillas para lograr la germinación; es decir, el rango de temperaturas, humedad, tiempo de luz, etc. que pueda necesitar casi cualquier semilla para brotar. La investigación previa muestra que las semillas se adaptan a prácticamente cualquier clima en la tierra, así que si se quisiera abarcar todos estos casos, el sistema tendría que poder simular cualquier hábitat de la tierra.

Dado que esto requeriría una construcción y componentes mecánicos muy complejos, en primer lugar, la muestra que se va a tomar asume que las semillas que se van a colocar en el germinador no están en etapa de latencia. Desde un punto de vista de temperatura, esto previene que la semilla requiera que sea enfriada (simulando un invierno) a temperaturas muy bajas, que a su vez evita que se deba incluir un sistema de enfriamiento por debajo de la temperatura del ambiente. Asimismo, debido a las pérdidas de calor que podría tener una construcción sencilla, el piloto no llegará a temperaturas que superen los 10 grados centígrados a la temperatura de ambiente. En pocas palabras, la muestra de las semillas que se tomará será el grupo de semillas en climas costeros (o de temperaturas similares, 16-26 grados centígrados) que no estén en etapa de latencia.

Aun así, para que estas semillas puedan germinar, se necesita simular la mayor cantidad de condiciones climáticas posibles, por lo que debe incluir varios elementos del universo. Un primer prototipo debería de ser capaz de llegar a controlar al menos los tres parámetros principales (mencionados en el modelo teórico) para que pueda ser de utilidad. Existen otros, como el pH, temperatura del aire, estado interno de la semilla, etc. que no se tomarán en cuenta para este trabajo.

Con respecto al aparato en sí, el universo se refiere a un dispositivo de tamaño real y comercializable. Dígase de aquel que tiene integrado tanto la parte mecánica como las partes eléctrica y electrónica. Para esta tesis, se tomará como muestra solo la parte electrónica, sin embargo, se harán comentarios de las otras dos partes.

3.1.2 Procedimiento e instrumentos de análisis

En primer lugar, se describirán los componentes y materiales a usar para el diseño del sistema de control del germinador, tomando en cuenta tanto precios como rangos de trabajo y sensibilidad. Una vez que el diseño esté listo, se pasará a la programación del microcontrolador

para lograr que cumpla las funciones de control. Sin necesidad de tener una maqueta completa, se pueden probar distintos sensores y actuadores en condiciones controladas para verificar su funcionamiento. Por ejemplo, podría colocarse el termómetro con los calentadores en un pequeño ambiente cerrado y verificar que regule la temperatura. Cuando la parte de programación esté lista, se harán las pruebas con posibles usuarios para determinar si es funcional al momento de emplearlo o si es necesario revisar la interfaz de usuario. Finalmente, se debe implementar una maqueta y comprobar que el sistema integrado funcione, ya sea con mediciones o, si es posible, con semillas.

Para poder concluir con la tesis a buen término, el Grupo de Apoyo al Sector Rural “Grupo PUCP” acordó en proporcionar la parte mecánica del germinador, mientras que en el presente trabajo se desarrollará la parte electrónica. Adicionalmente, la misma organización financiaría los materiales necesarios para la implementación del germinador, como sensores de temperatura y humedad, así como los componentes electrónicos necesarios. Por otro lado, para poder verificar que el dispositivo funciona correctamente, también se necesitará de instrumentos calibrados que puedan medir tanto temperatura como humedad, para comparar los valores obtenidos.

3.2 Características iniciales del diseño

3.2.1 Sensores de temperatura

Existen diferentes tipos de sensores de temperatura disponibles en el mercado local, sin embargo se debe elegir el más adecuado para el presente proyecto. Como se mencionó, se busca que el sensor de temperatura tenga un error menor a 2 grados Celsius y debe ser de bajo costo. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que para esta aplicación solo se medirán temperaturas del ambiente, por lo que muy probablemente no bajen de 0 °C y no superen los 40°C.

En primer lugar, descartamos las termocuplas, pues su mayor fortaleza es soportar temperaturas extremas, lo que no resulta útil para el germinador. Peor aún, no suelen ser lineales, por lo que habría que hacer una calibración por software. Finalmente, tampoco suelen ser muy precisas, con un error superior al requerido por este proyecto. En la figura 3.1 se puede apreciar una termocupla comúnmente encontrada en el mercado local.



Figura 3.1: Termocupla PT100

http://www.pixsys.net/uploads/Sonda_PT100_AR_2000_00_395_fondo_bianco.jpg

Una segunda opción podría ser un detector de temperatura resistivo (Resistance Temperature Detector - RTD). Este ofrece un error de tan solo unas décimas de grado centígrado. Por otro lado, tiene una respuesta lenta, aunque esto no afectaría mucho al sistema pues el control climático no generaría cambios inmediatos de temperatura, sino cambios lentos y graduales. La desventaja que presenta este tipo de sensor es que requiere de un circuito de acoplamiento de regular complejidad, pues la resistencia varía de acuerdo a la temperatura pero de manera mínima. Adicionalmente necesita ser alimentado con una corriente limitada para que no se caliente por sí mismo, pues puede generar calor al ser una resistencia.

También existen sensores de temperatura en forma de circuitos integrados. Este tipo de sensores, bastante usados en aplicaciones fuera del ámbito industrial, son más baratos que las opciones mencionadas anteriormente, y usualmente no requieren de un circuito de acoplamiento muy complejo. Existen diversos circuitos integrados que cumplen con funciones parecidas, sin embargo, se analizarán tres de ellos que fueron encontrados en el mercado local y que tienen un precio similar.

El LM35, mostrado en la figura 3.2, es un circuito integrado analógico que mide la temperatura en escala centígrada, y tiene la particularidad de que es lineal. Lo más importante es que tiene una precisión típica de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente. Debido a que usa una corriente mínima, no se calienta más de 0.1°C según el fabricante. Adicionalmente, el rango de temperaturas no es tan amplio, pero es adecuado para un control climático (-40° a 110°C). Por último, no necesita un circuito de acoplamiento muy complicado; en el peor de los casos, se deberá usar un amplificador.

temperatura. De acuerdo a lo calculado, se necesitarían 100 W efectivos de calor para poder calentar a un ritmo de 1 °C cada 5 minutos, aproximadamente. Adicionalmente hay que considerar las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. Solamente por conducción, usando un envase de tecnopor de 1cm de ancho se perderían casi 50 W de calor³.

Por lo expuesto anteriormente, se seleccionaron diversas opciones para los actuadores de temperatura. Una primera opción, mostrada en la figura 3.4, es un calentador cerámico de 12 VDC / 40W, usualmente usado para impresoras 3D. La ventaja de este calentador es que logra calentarse muy rápidamente y puede colocarse en cualquier parte del germinador fácilmente. Además funciona a 12 VDC, lo que funcionaría más adelante con un panel solar, y tiene un precio bastante accesible, de aproximadamente 5 Nuevos Soles por pieza. El reto de usar un actuador como este es que puede llegar a calentarse demasiado, lo que implicaría que necesita un control más fino. Adicionalmente hay que considerar que de darse el caso de una falla, habría un riesgo mayor de incendio. Por otro lado, solo se hallaron proveedores de estos componentes a través de sitios web comerciales, como Ebay o Aliexpress. Debido a que no había especificaciones técnicas o un datasheet para estos componentes, se hizo una compra para probarlos, y se comprobó que de no haber un control y ser alimentados directamente, podrían calentarse por encima de los 220 °C, ya que al acercar un papel, se quemó⁴ (mas no se encendió). Una posible solución sería armar un disipador de aluminio y alimentar este calentador con un pwm para controlar mejor la temperatura, pero implicaría un incremento en el costo y en el tiempo de desarrollo.



Figura 3.4: Reprap ceramic heater - Foto: amazon.com.

Una segunda opción propuesta fue usar calentadores/deshumecedores para clóset. Estos aparatos, a la venta en diversas tiendas de herramientas o electrodomésticos cuestan alrededor de 50 nuevos soles y tienen la apariencia de unos tubos de aluminio. Son alimentados por 220 VAC y tienen una potencia de 20 a 40 W. Al probar uno de estos, tuvo la ventaja de que al

³ Referirse al anexo “Cálculos de pérdida de calor”.

⁴ La temperatura de autoignición del papel es de aproximadamente 220 °C

dejarlo conectado por varias horas, su temperatura máxima fue de 45 °C, lo que es totalmente manejable, incluso seguro para su manipulación directa. Esto disminuiría considerablemente la necesidad de un circuito de desactivación en caso de emergencia y reduciría la complejidad del control.

La tercera opción, propuesta por el “GRUPO PUCP”, fue de usar una malla resistiva, debido a que disponían de ella para realizar pruebas. Esta malla resistiva tiene 20 W de potencia y se alimenta con 12 VDC. Según mediciones realizadas sobre esta malla en particular, su temperatura máxima es de 60 °C, lo que aún es seguro para su manipulación, pero de no ser controlada de manera correcta podría afectar negativamente a las semillas porque supera ampliamente la temperatura idónea para la germinación de cualquier especie. Con respecto al precio en caso se deseen fabricar más, se hallaron proveedores por internet de productos similares, pero con mayor potencia. La desventaja de estos es que también se calentarían demasiado, y su precio elevado (entre 100 y 150 Nuevos Soles). Un ejemplo de este tipo de calentadores se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5: Calentador en forma de malla. Foto: ebay.com.
<http://goo.gl/VWHRUy>

3.2.3 Control de Humedad y actuadores

El control de humedad va a determinar la concentración de agua en el sustrato en el que esté la semilla. De acuerdo a lo investigado, la manera más fácil de realizar esto es mediante la medición de la conductividad en el sustrato. Esto se realiza usando un higrómetro, que es una especie de estaca con dos terminales recubiertos de un material conductor, de manera que se puede pasar corriente a través de ellos y medir el voltaje que existe. En el mercado local no se pudo encontrar uno de estos dispositivos, pero sí hay disponibilidad de los mismos a través de sitios web dedicados a las ventas como Ebay o Ali express. Usualmente se venden como un accesorio para Arduino, pero debido a su principio de funcionamiento básico, se puede utilizar fácilmente para un microcontrolador ordinario.

Como se mencionó anteriormente, el tipo de riego que debe tener el germinador es por aspersión, pues así no se inhibe la germinación. Usualmente no hay micro aspersores para una superficie tan pequeña como la que se propone para el germinador, por lo que se concluyó que debía ser algo de fabricación propia. Lo que se halló en el mercado que serviría para este fin fueron bombas de agua, comúnmente usadas para fuentes de agua decorativas o en algunas peceras. Estas pequeñas bombas de agua distribuyen un flujo reducido de agua, y por su tamaño son bastante económicas y no consumen mucha energía.

3.2.4 Control de Iluminación

El control de Iluminación que se realizará en esta tesis es un encendido y apagado básico. De acuerdo a lo investigado anteriormente y lo que se mencionó en el capítulo 2, se sugiere luz diurna por aproximadamente 8 horas al día para que las semillas puedan germinar. Incluso para el crecimiento temprano se recomienda este tiempo, por lo que la programación del sistema incluirá en el firmware un encendido y apagado dependiendo de la hora del día, y que dure aproximadamente 8 horas al día.

Debido a la investigación previa, se usarán focos led azules y rojos para estimular los receptores de la forma Pr de las semillas, al mismo tiempo que son mucho más eficientes que otro tipo de lámparas. Además, al emitir una longitud de onda más corta, se evitan pérdidas de energía por emisión de colores de luz que no son detectados por la planta.

La luz roja y azul combinadas de los leds forma un haz de color magenta. Existe en el mercado local una tienda que importa un “foco led para cultivo de plantas”. Este foco emite una luz de color magenta también, lo que concuerda con lo hallado en la investigación previa. La desventaja de este foco es su precio (190 Nuevos Soles), lo que aumentaría considerablemente el costo total del germinador. Una ventaja es que puede ser alimentado directamente con 220VAC y tiene un socket E26/27, que es el más común para un foco (ver figura 3.6).



Figura 3.6: Foco led para crecimiento de plantas.

<https://www.demasled.pe/public/archivos/pe/productos/1366750121.jpg>

La otra opción para la iluminación es usar LEDs ultra brillantes, disponibles en el mercado por menos de S/. 1 la unidad. De acuerdo al datasheet del fabricante, cada led de 5mm brinda aproximadamente 7000 mcd, por lo que se necesitarían unos 15 leds para llegar a la iluminancia de 750 lm propuesta por diversos autores. Si bien estos leds no iluminan mucho, no requieren de disipadores, por lo que su costo sería aún menor que comprar varios leds de potencia, que sí necesitan que se tome en cuenta disipación de calor.

3.3 Diseño del circuito

Para el circuito electrónico, se propone un diseño modular, ya que esto permitiría que más adelante se siga mejorando el proyecto, y que se puedan usar los circuitos que se están fabricando con esta tesis. Un diseño modular, además, mejora la compatibilidad, pues deja abierta la posibilidad de cambiar alguna de las partes sin necesidad de tener que modificar el resto. En otras palabras, funcionaría con un principio similar al que usan los módulos de la marca Arduino, que tiene unas plataformas open hardware y open software para que todos puedan fabricar nuevos accesorios que puedan ser incorporados a la plataforma principal. Otras ventajas de este tipo de diseño son la facilidad en el uso y un mantenimiento con menor costo, pues sería fácil identificar fallas y cambiar las piezas que estén averiadas sin comprometer a las otras.

3.3.1 Diagrama de bloques del circuito

Inputs

- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad de tierra (conductividad de la tierra)
- Botones
- RTC (Reloj de tiempo real – Real time clock)

Outputs

- Calentador
- Ventiladores
- Luces
- Aspersor (riego)
- Pantalla (display LCD 16 x 2)

El diagrama de bloques mostrado en la figura 3.7 muestra la estructura que se seguirá para las tarjetas de esta tesis. Como se puede observar, cada uno de los colores del diagrama representaría un módulo diferente, para que luego se puedan cambiar si fuese necesario. Por ejemplo, si se desea usar el mismo diseño electrónico pero escalar el proyecto a un germinador del doble de tamaño, los actuadores usados actualmente no servirían para abastecer a un espacio más grande. Sin embargo, armando los módulos por separado permitiría reusar el

diseño de los sensores y el micro, y solo se necesitaría hacer un escalamiento a la parte de actuadores.

Otro motivo por el cual se opta por tarjetas separadas es para evitar que el microcontrolador esté expuesto a las condiciones internas del germinador, y que los actuadores y sensores puedan estar ubicados de la manera más conveniente.

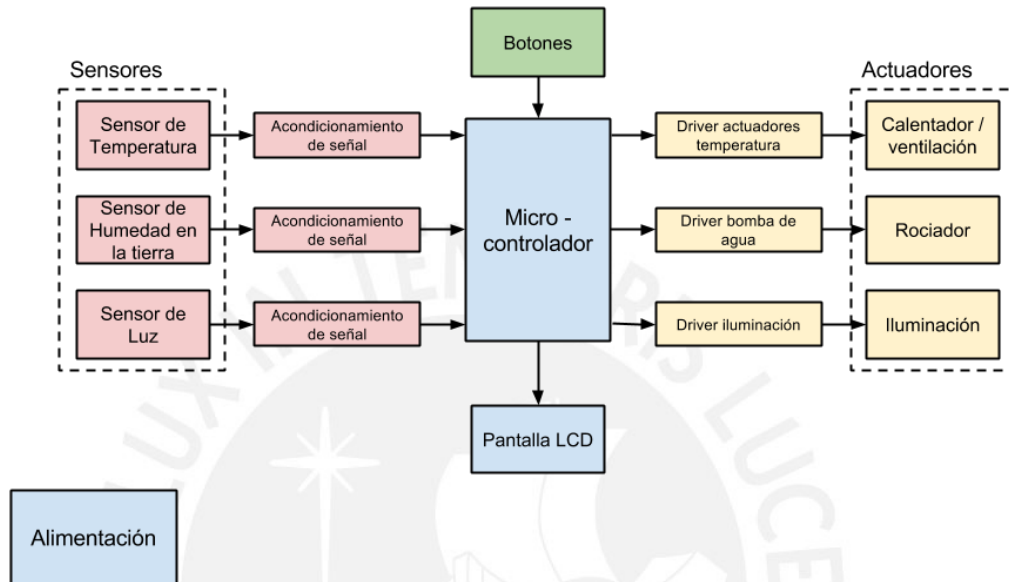


Figura 3.7: Diagrama de bloques del germinador. Elaboración propia.

3.3.2 Selección de componentes

Selección de componentes – Temperatura

Para medir la temperatura se selecciona el LM35, pues cumple con los requisitos iniciales de la tesis (al menos 1° C de precisión). Además, está disponible en el mercado local por un precio bastante accesible, aproximadamente 6 nuevos soles. Se realizó una prueba con este sensor para comprobar su precisión, comparando su salida con la temperatura medida por un multímetro Fluke 179 con termocupla. Este equipo fue adquirido a inicio de este año y el fabricante indica que cualquier equipo nuevo está calibrado por al menos 1 año, por lo que su calibración aún es válida para realizar este tipo de pruebas.

Al medir la temperatura en diferentes momentos del día para obtener diferentes lecturas, se midió la salida del LM35 (en mV) para saber la temperatura que está registrando. Se obtuvo que la diferencia con la lectura del Fluke era menor a 2 mV; es decir, menos de 0.2 °C (valores que coinciden con lo que dice el datasheet de dicho componente. Las temperaturas a las que estaría este sensor en un futuro son cercanas a la temperatura ambiente (máximo 35 °C) por lo

que no habría problemas de no-linealidad por estar midiendo temperaturas cercanas a los límites del sensor.

Como se mencionó, se usará el calentador con el que el “GRUPO PUCP” ya cuenta. Sin embargo, se podría usar otro tipo de actuadores que puedan adquirir en el futuro, ya que el circuito que se empleará usa relés, por lo que no habría problema de conectar otros actuadores, siempre y cuando se disponga también de una fuente de alimentación adecuada para ellos. Para este caso, el calentador funciona con 220 VAC, por lo que se conectará directamente a un tomacorriente.

Selección de componentes - Humedad

Se ordenaron dos sensores de la empresa TxHang Electronic. La primera fue solo la estaca de medición mientras que la segunda, mostrada en la figura 3.8, incluía un módulo de acondicionamiento de señal, y ya envía la señal como un voltaje.

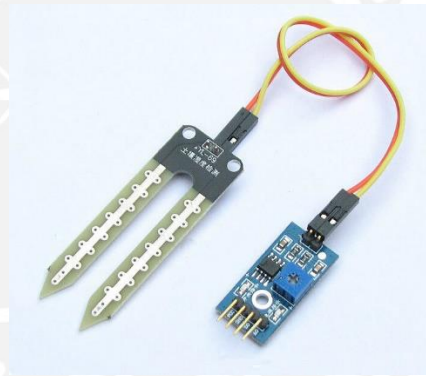


Figura 3.8: Sensor de humedad en la tierra.

Se realizó una prueba de linealidad de este módulo para determinar si era adecuado para la aplicación que se está realizando. Se debe tomar en cuenta que estas pruebas podrían variar de acuerdo al sustrato y a otros minerales que podrían estar presentes. Para esta prueba, se tomaron en cuenta los siguientes factores:

- El sustrato a utilizar fue arena lavada. Esto se hizo debido a que la arena suele contener diferentes sales o minerales que al disolverse podrían aumentar la conductividad eléctrica del sustrato. Adicionalmente, para el cultivo de plantas se usa agua dulce.
- Voltaje de alimentación de 5VDC, igual que el microcontrolador.
- Para la prueba se usó un rociador de agua, de manera que cada vez que se rociaba la arena se hacía una medición de voltaje a la salida analógica del adaptador.
- Las mediciones se realizaron cada 10 segundos, es decir, se esperó un tiempo para que el agua pueda filtrarse a través de la arena y llegar al sensor.

- Al final de la prueba se comprobó que la arena estaba mojada por todo el alrededor del sensor, lo que indica que se filtraba correctamente y no quedaron espacios secos que pudieran alterar la resistencia del medidor.

En la figura 3.9 se muestra el medidor dentro de la arena mientras se realizaban las mediciones.



Figura 3.9: Prueba de linealidad del sensor de humedad de tierra.

El resultado del experimento fue satisfactorio, pues el adaptador usado sí tiene una respuesta bastante lineal. Asimismo, hay que tomar en cuenta que incluso luego de los 10 segundos iniciales que se esperó entre descargas, la filtración podía seguir, lo que podría incrementar la conductividad aún más. El siguiente gráfico (Figura 3.10) muestra el voltaje de salida vs el número de veces que se accionó el rociador:

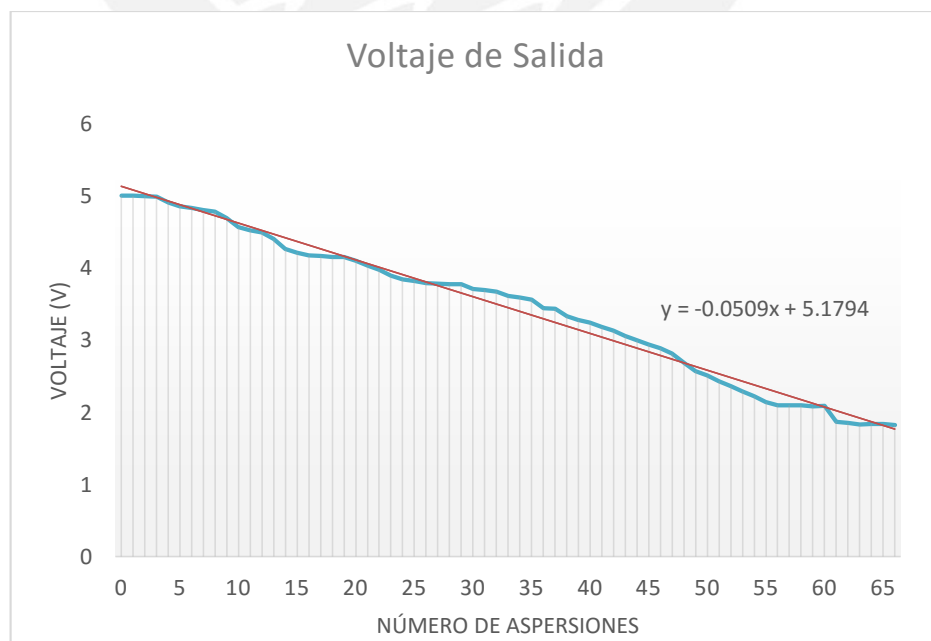


Figura 3.10: Gráfica del voltaje de salida del higrómetro.

El gráfico también muestra la línea de tendencia lineal con la ecuación propuesta. Tomando en cuenta estos resultados, se aproximará el sensor como si fuera totalmente lineal.

Selección de componentes – Iluminación

Se seleccionaron leds de 5mm azules y rojos ultrabrillantes para iluminar el germinador. Los valores de iluminancia fueron obtenidos usando un datasheet disponible de un proveedor local. No obstante, se realizó una prueba práctica para confirmar los valores y poder seleccionar una resistencia adecuada.

Los leds azules consumen un voltaje de 2.95V, por lo que se emplea una resistencia de 75 Ohms para obtener una corriente de 24 mA. Por otro lado, los leds rojos consumen solo 2.2 V, de manera que se usan resistencias de 100 Ohms para que pase una corriente de 25 mA.

Selección de componentes - otros

Se usa un microcontrolador de la serie ATMEGA debido a su versatilidad y a la experiencia previa con estos dispositivos. El modelo seleccionado es el ATMEGA32, ya que cuenta con las siguientes características relevantes para este proyecto:

- 32 KB de memoria Flash.
- 20 años de retención de información a 85 °C/ 100 años a 25 °C
- ADC de 10 bits, 8 canales
- 32 puertos I/O
- Consumo de 1.1mA @ 1MHz, 3V, 25 °C

Los puntos críticos son el número de puertos, que permite que se use tanto el LCD como el teclado sin problema alguno; el ADC de 10 bits, el cual admite el uso del LM35 sin necesidad de un circuito amplificador, y la capacidad de memoria Flash que permite escribir un programa en lenguaje C sin preocupaciones por que pueda acabarse la memoria. En la figura 3.11 se muestra el microcontrolador descrito.



Figura 3.11: ATMEGA32, empaque TQFP.
<http://goo.gl/M7vfd5>

El DS1307 es un circuito integrado RTC (Real time clock o reloj de tiempo real) que permite disponer de un reloj más preciso y de bajo consumo que si se usara el reloj interno del microcontrolador. Además, permite incluir un backup de energía para que no se pierda la hora en caso haya un corte de energía. Usa una batería normal de 3 VDC, y una batería usual, como el modelo 2032, puede durar por varios años. Debido a que el germinador usará un reloj, sobre todo para el control de la iluminación, es básico que se tenga un reloj calibrado y que no se desfase con el tiempo. La figura 3.12 muestra el circuito integrado a utilizar.



Figura 3.12: DS1307.
<http://goo.gl/dbOmxN>

Para la alimentación de todo el sistema, se dependerá de un tomacorriente que proporcione 220 VAC. Se conectará un supresor de picos para poder colocar la bomba de agua, el calentador y la fuente de la tarjeta. Esta última será una fuente *switching* de 5 VDC a 2 A, debido a que si se implementa la iluminación y el ventilador está encendido, se podría llegar a una corriente de casi 1 A. Se elige este tipo de fuente debido a su bajo costo, tamaño compacto y disponibilidad en el mercado.

3.3.3 Diagramas esquemáticos

El proyecto se divide en 5 tarjetas diferentes: La principal, en donde está la pantalla LCD y el microcontrolador; la tarjeta de los sensores; otra para actuadores; una para el teclado y finalmente una para los leds. Además, se debe mencionar que el sensor de humedad tiene una pequeña tarjeta que viene incluida cuando se compra el sensor, por lo que su diseño no se está tomando en cuenta y solo se coloca el conector en la tarjeta de sensores. En cuanto a los componentes adicionales que se puedan observar en los diagramas esquemáticos, estos fueron colocados en base a las recomendaciones de los fabricantes en los datasheets. Por ejemplo, los condensadores conectados entre la alimentación y tierra están colocados para evitar ruido.

A continuación se muestran los diagramas esquemáticos de las 5 tarjetas (figuras 3.13 – 3.17):

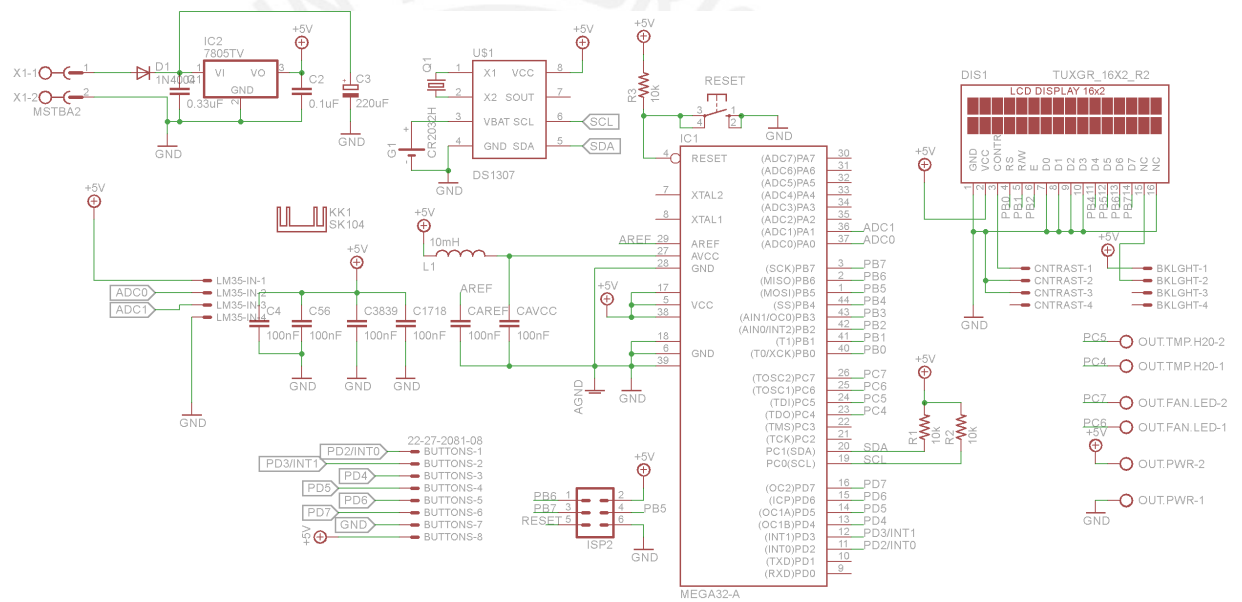


Figura 3.13: Esquemático principal. (Véase Anexo)

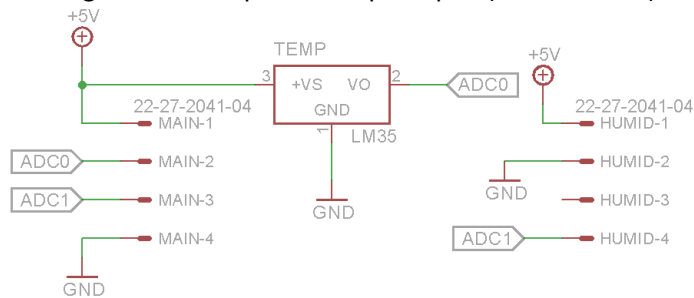


Figura 3.14: Esquemático de sensores.

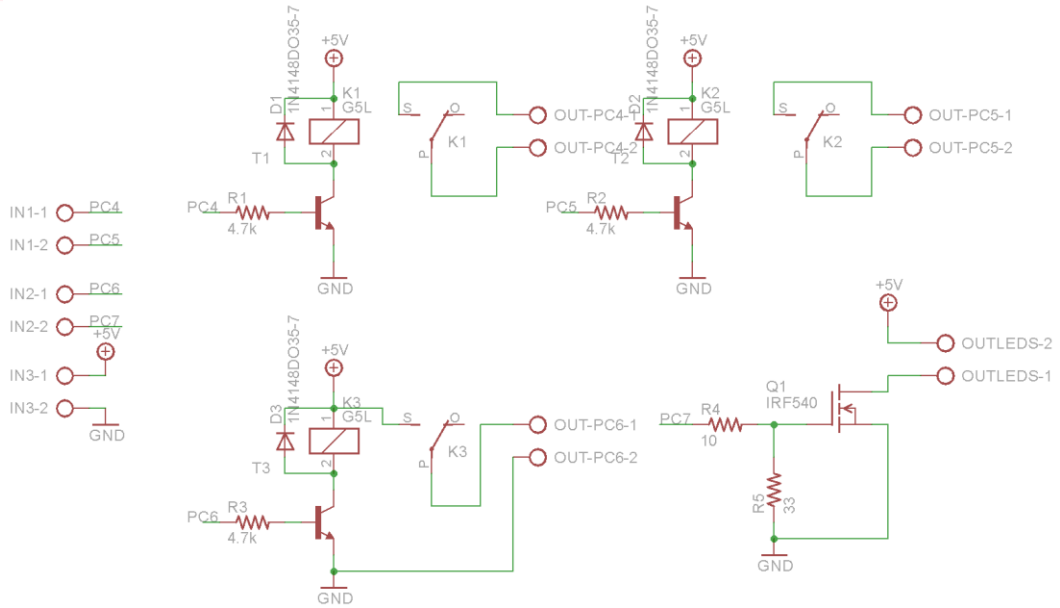


Figura 3.15: Esquemático de actuadores.

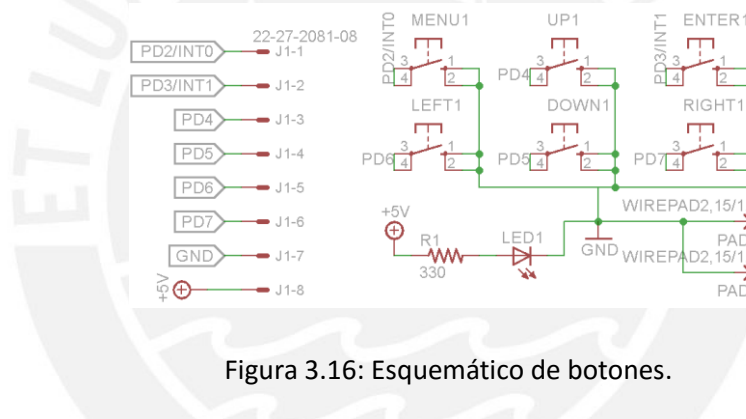


Figura 3.16: Esquemático de botones.

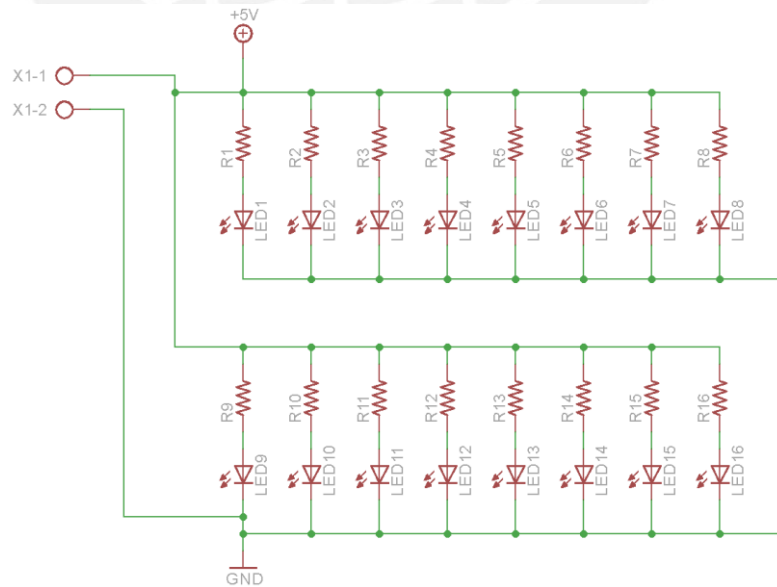


Figura 3.17: Esquemático de LEDs.

3.3.4 Diseño de Circuitos impresos

En esta sección se muestran los circuitos impresos (Printed Circuit Boards – PCBs) diseñados para el proyecto. Se usaron componentes superficiales (Surface-mount device - SMD) para reducir el espacio usado en la tarjeta y lograr un resultado más profesional. Se toma en cuenta las especificaciones técnicas de los fabricantes para reducir el ruido al mínimo y proteger los componentes. Como se puede observar, se coloca un condensador y un diodo antes de alimentar a la tarjeta para prevenir daños por alimentación inversa o inestable. Además, se colocan condensadores de desacoplo en la alimentación de cada integrado. Se debe mencionar que no se están separando la tierra analógica y la tierra digital debido a que los sensores también son alimentados con 5 VDC, lo que implica que no habría ruido por este lado.

La distribución de los botones en el teclado responde al objetivo de hacer que el sistema sea lo más intuitivo posible, de manera que fue inspirado en controles para videojuegos, más que en teclados convencionales. En las figuras 3.18 a la 3.22 se muestran los diseños de PCB para este proyecto.

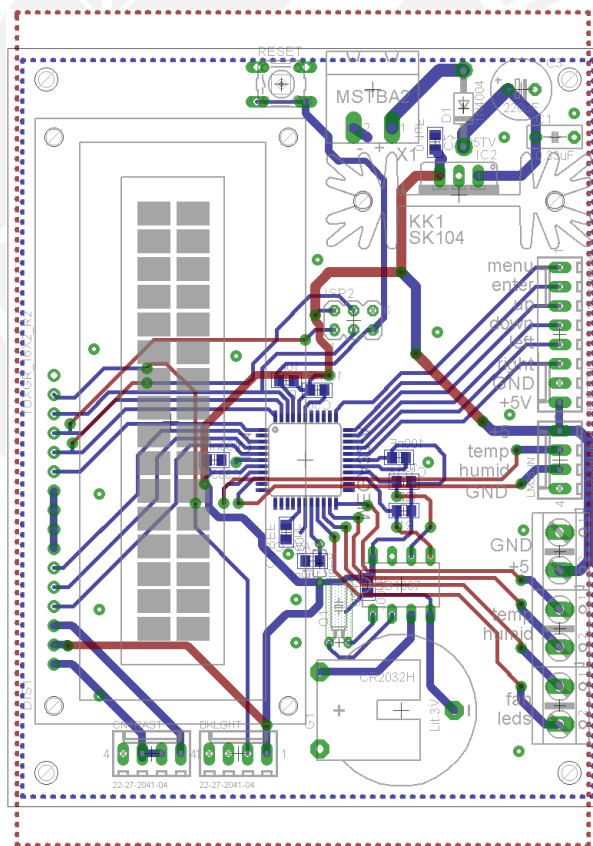


Figura 3.18: PCB Principal.

3.4 Diseño del Programa

3.4.1 Menu Principal

El menú principal debe de mostrar las opciones disponibles de una manera sencilla y entendible para el usuario. Para este caso, solo se tienen cuatro opciones principales: Set Temp, que configura la temperatura; Set Humid, que configura la humedad de la tierra; Set Clock, que programa el reloj del RTC; y Exit, que sale del menú principal y regresa a la página principal.

Se programa un cursor simple que indica cuál es la posición que se está seleccionando y una navegación básica con botones de flechas, de Enter y Salir. La siguiente tabla 3.1 muestra los diferentes estados en los que pueden estar las variables del menú que determinarán la navegación y el display, se complementa con la figura 3.23, que muestra el diagrama de estados que se usó para diseñar el menú:

Tabla 3.1: Estados del menú principal. Elaboración propia.

| | | |
|----|-------------------------|---------------------------|
| a) | > Set Temp Set Humid | sc_pos = 0 abs_pos = 0 |
| b) | Set Temp > Set Humid | sc_pos = 1 abs_pos = 1 |
| c) | Set Humid > Set Time | sc_pos = 1 abs_pos = 2 |
| d) | Set Time > Exit | sc_pos = 1 abs_pos = 3 |
| e) | > Set Time Exit | sc_pos = 0 abs_pos = 2 |
| f) | > Set Humid Set Time | sc_pos = 0 abs_pos = 1 |

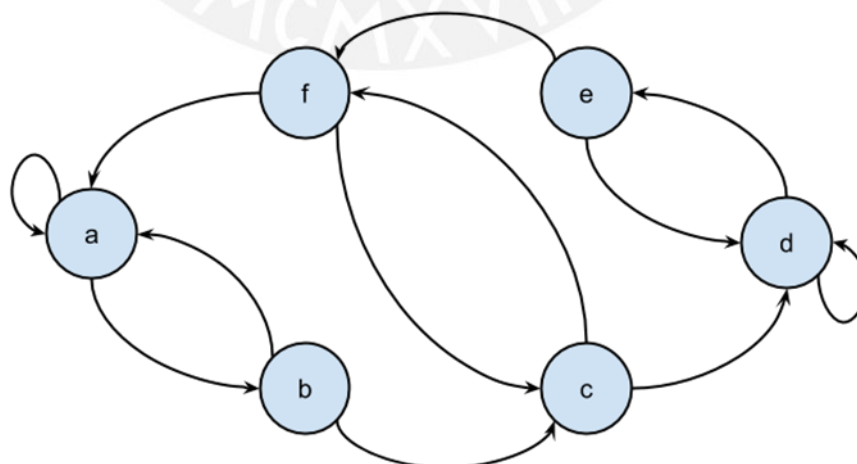


Figura 3.23: Diagrama de estados del menú principal. Elaboración propia.

3.4.2 Pantalla principal

La pantalla principal que aparecerá en el *display* cuando el dispositivo está en funcionamiento mostrará información básica de la configuración y el estado actual de los sensores. Se determinó que también se mostraría la hora y la fecha para darle una funcionalidad extra. En la siguiente imagen se puede observar un ejemplo de cómo se visualizaría la pantalla del LCD bajo condiciones normales y se indica qué significa cada campo.

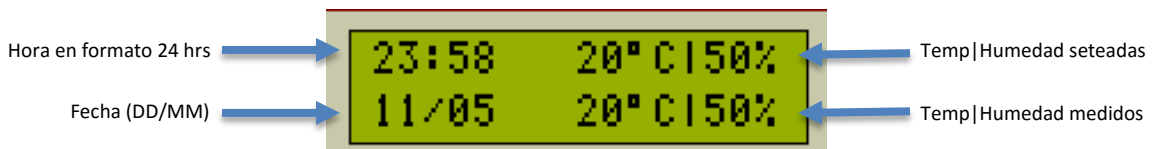


Figura 3.24: Display LCD en funcionamiento normal.

3.4.3 Botones

Se menciona en otros trabajos que los botones requieren de un circuito para evitar el rebote, dependiendo de la calidad de los pulsadores y también del mismo usuario. Usualmente para esto se implementa un circuito divisor de voltaje con un filtro RC de primer grado. Sin embargo, para simplificar este circuito y evitar incluir más componentes en los PCBs se utilizará un breve algoritmo en el programa que evita lecturas erróneas en los botones debido a rebote. Básicamente el programa espera a que se accione cualquier botón, y apenas detecta un cambio de estado, no realiza mayores detecciones por 300 ms para dar tiempo a que el botón vuelva a estabilizarse, evitando así múltiples detecciones o problemas de hardware que pueda tener el pulsador.

3.4.4 Convertidor Análogo Digital (Analog-Digital Converter - ADC)

El ADC del ATmega32 se utiliza para la lectura de los valores de voltaje enviados por los sensores de temperatura y humedad. Este microcontrolador permite al programador seleccionar el voltaje de referencia que usará para realizar las comparaciones y asignarle un valor de bits a la lectura. Como este ADC en particular tiene 10 bits, esto quiere decir que tiene 1024 niveles diferentes. Con respecto a los niveles de referencia, se puede seleccionar voltajes internos de 2.56 VDC y 5.0 VDC además de una referencia externa.

Para el sensor de temperatura, con una sensibilidad de 10 mV / °C, se usa la referencia de 2.56 VDC. De esta manera, se tendrían 4 niveles digitales por grado Celsius como lo se muestra a continuación:

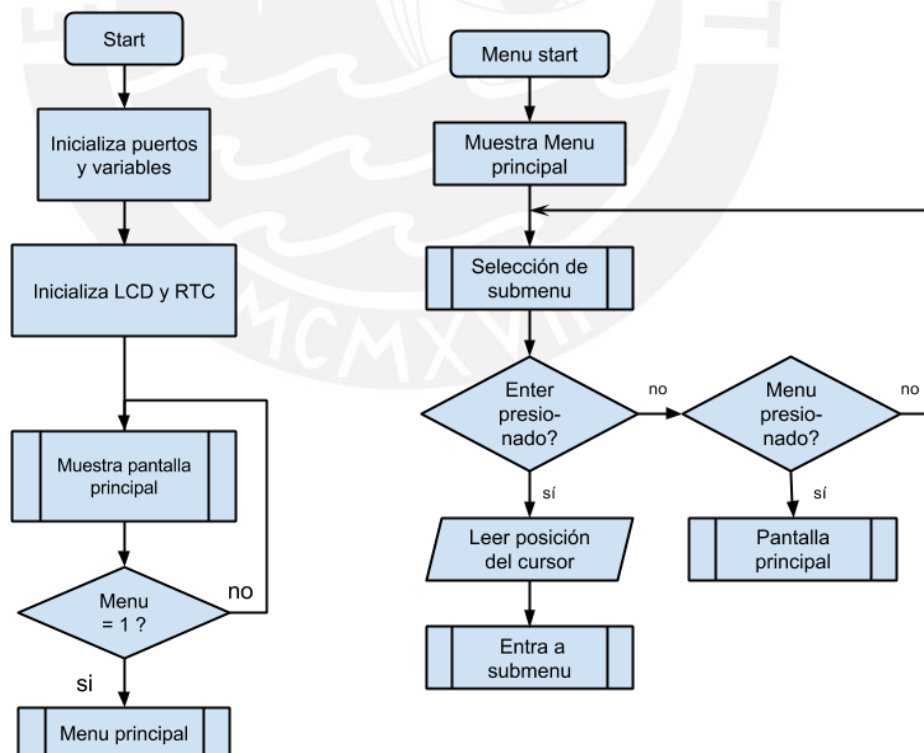
$$2.56 \text{ V} / 1024 \text{ bits} = 2.5 \text{ mV} / \text{bit}$$

$$10\text{mV}/^\circ\text{C} / 2.5\text{mV/bit} = 4 \text{ bits} / ^\circ\text{C}$$

El sensor de humedad tiene como referencia 5 VDC internos debido a que este sensor envía voltaje desde 5 VDC a aproximadamente 1.5 VDC. Sin embargo, el sensor de temperatura nunca pasará los 350mV en el peor de los casos. Por este motivo, es importante realizar el cambio de referencia entre las lecturas para lograr una mayor precisión y los rangos correctos.

3.4.5 Diagramas de flujo

A continuación se muestran los diagramas de flujo principales del programa. Se puede observar que para la detección de tanto la temperatura como la humedad de la tierra se emplea una histéresis para evitar conmutaciones excesivas cuando los valores de los sensores se encuentran en el límite de los valores preestablecidos. Asimismo, la detección se realiza cada 0.5 s, de manera que incluso si hubiera oscilaciones rápidas en la temperatura o humedad, los actuadores no se prenderán y apagarán demasiado rápido. De esta manera, se protege tanto los actuadores como el circuito con relés del desgaste.



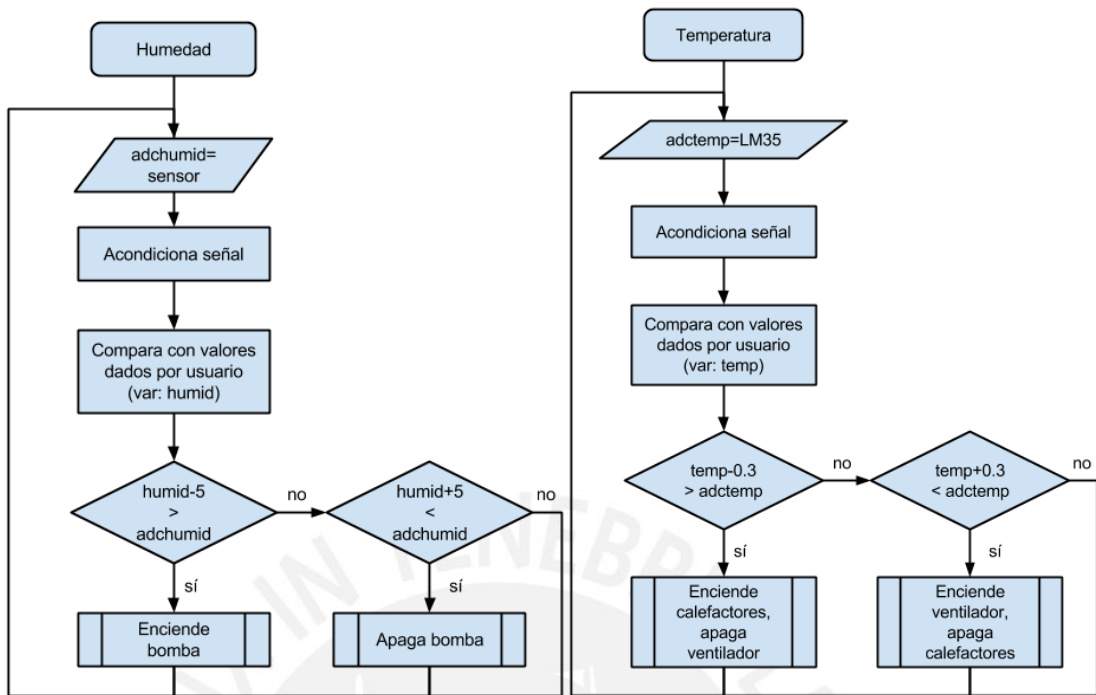


Figura 3.25: Diagramas de flujo del programa principal, menú principal, control de temperatura y control de humedad.

Capítulo 4: Implementación y pruebas del piloto. Costos.

El presente capítulo describe el proceso de implementación y pruebas del piloto terminado. Además, se muestran las simulaciones del programa que se realizaron en un software especializado, así como las pruebas físicas realizadas antes de hacer las pruebas finales en el dispositivo germinador. Finalmente, se detallan los costos de este proyecto, dentro de lo que fue delimitado (sin incluir la parte mecánica).

4.1 Simulación

Antes de implementar las tarjetas, se realizaron diferentes simulaciones en el software “Proteus” para verificar las conexiones y el correcto funcionamiento del circuito y del programa. Para mayor facilidad en la depuración de errores, se realizaron dos simulaciones diferentes. En la primera se simuló la interfaz de usuario y el reloj de tiempo real (RTC), mientras que en la segunda se simuló los sensores de temperatura y humedad, tal como se muestra en las dos siguientes figuras.

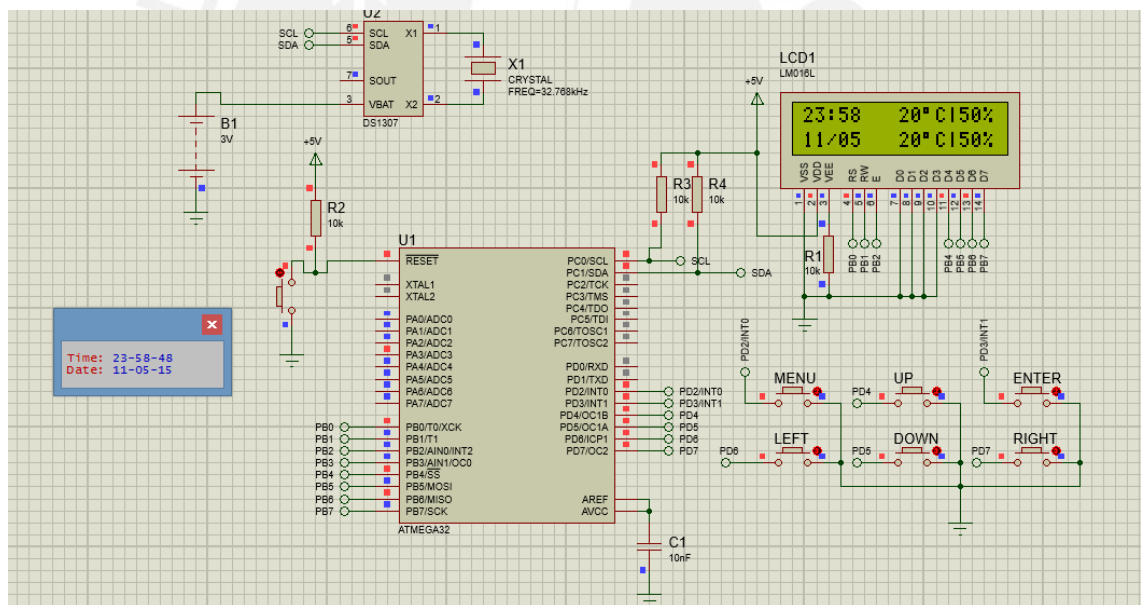


Figura. 4.1: Simulación del display, RTC y del menú principal.

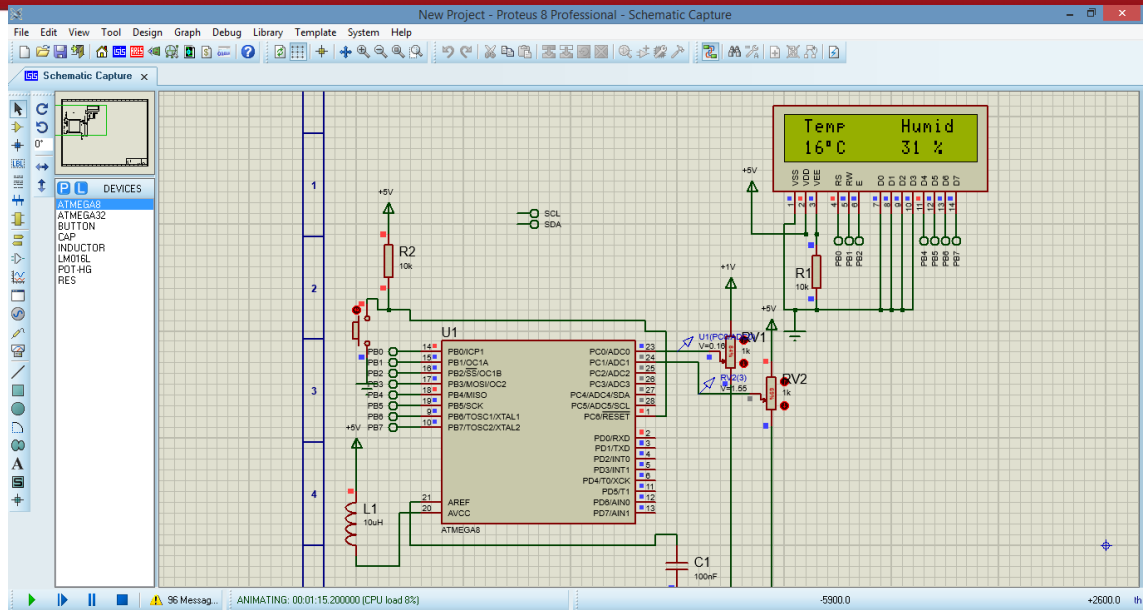


Figura 4.2: Simulación de los sensores de temperatura y humedad.

4.2 Implementación y pruebas

Las tarjetas diseñadas en el capítulo anterior fueron ordenadas a fabricar localmente, para luego ser ensambladas. Se probó que una vez conectadas estas funcionen de la manera esperada, sobre todo que las instrucciones de la tarjeta principal lleguen a las otras. De manera similar, se probaron individualmente antes de conectarlas para asegurar que los PCB y las soldaduras hayan sido efectuadas correctamente y evitar errores al energizarlas por primera vez. La siguiente figura muestra las tarjetas ensambladas y ya conectadas.

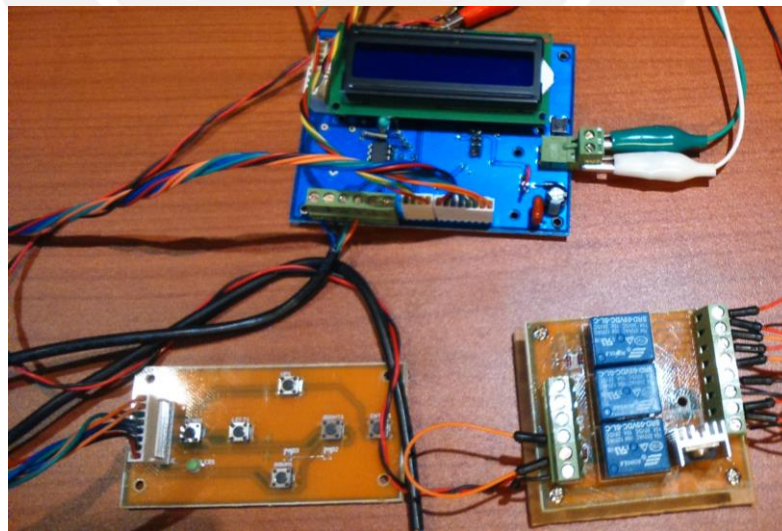


Figura 4.3: Tarjetas fabricadas y ensambladas, prueba en laboratorio.

4.2.1 Pruebas del RTC

El RTC se probó de dos maneras diferentes. En primer lugar, se sincronizó el RTC con el reloj de una computadora personal y se dejó el sistema activado por 24 horas en el laboratorio. Se

realizaron algunas medidas durante ese periodo y al final del mismo. Cada hora, el error fue de entre 1 y 2 segundos, pero no aumentaba conforme pasaba el tiempo. En total el desfase fue de aproximadamente 5 segundos, lo que implicaría que en 1 año el reloj podría desfasarse un máximo de 30 minutos, en caso el error fuera acumulativo. En segundo lugar, se desconectó la tarjeta luego de programar la hora. Al energizarla nuevamente, no se perdió dicha configuración, lo que quiere decir que la batería de respaldo funciona correctamente.

4.2.2 Pruebas en laboratorio

Para la detección de temperatura y humedad, que son los dos elementos que tienen un control electrónico, se realizaron pruebas tanto en laboratorio como en campo. Para la prueba en laboratorio, se conectó la tarjeta de actuadores a leds en vez de a los elementos de potencia. De esta manera, se pudo probar las salidas del microcontrolador sin comprometer sus componentes o desgastar los relés. Usando el teclado diseñado, se configuró la temperatura y humedad de tierra deseadas. Para esta prueba, se colocó 25 °C y 50% de humedad. La temperatura de ambiente era de aproximadamente 23 °C, por lo que apenas se configuró la tarjeta, se encendió el led que estaba en el lugar del calentador. Al calentar ligeramente el LM35, el sistema detectó el aumento de temperatura y pasó a encender el ventilador y apagar el calentador. Se debe mencionar que no hubo una conmutación rápida cuando el sensor mostraba una temperatura cercana a 25 °C debido a que se programó una histéresis de 0.3 °C. De esta manera se protegen los actuadores, que podrían acortar su tiempo de vida si se prendieran y apagaran de forma descontrolada. De manera similar, como el sensor de humedad estaba en el aire, el led en el lugar de la bomba de agua se encendió de manera inmediata y se apagó al colocar el sensor en el agua. En las siguientes fotos (figura 4.4) se muestra parte de las pruebas que se realizaron en el laboratorio (véase los LED encendidos respecto a la temperatura):

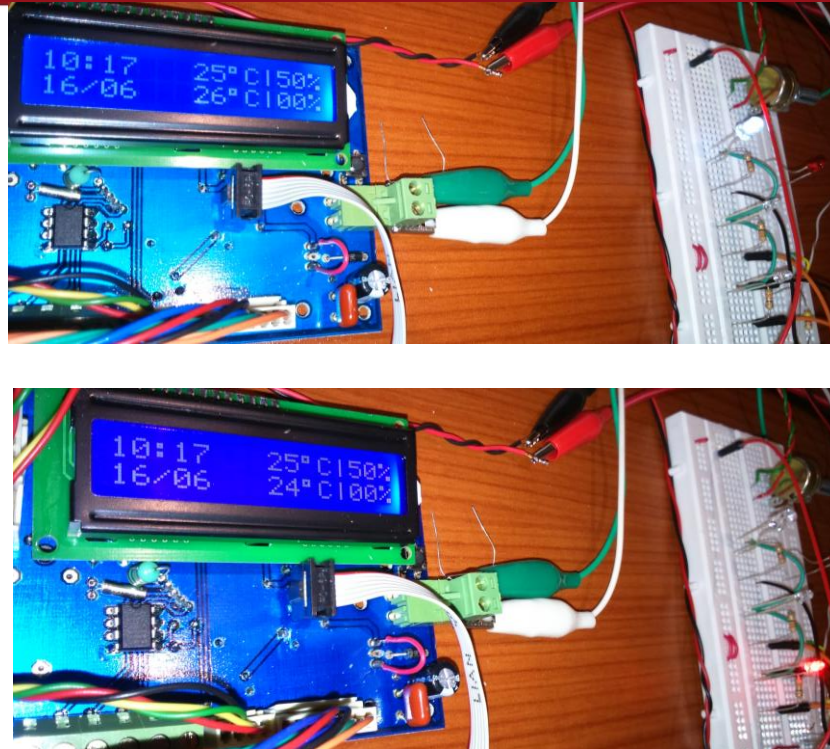


Figura 4.4: Pruebas en laboratorio del programa y el accionamiento de relés.

4.2.3 Pruebas en campo

Una vez terminadas las pruebas en laboratorio de manera satisfactoria, se pasó a coordinar con el GRUPO PUCP para poder implementar una primera prueba. El GRUPO preparó un pequeño invernadero (figura 4.5), algo más pequeño que lo pensado inicialmente, pero que funcionaría para probar a pequeña escala la funcionalidad de los actuadores y sobre todo el control de la tarjeta. Los actuadores que se usaron fueron proporcionados por el GRUPO también; se usó un ventilador de 5 V, un calentador 220 VAC de 20W y una bomba de agua pequeña 220 VAC. Luego, se realizó el cableado y se conectaron todos los dispositivos a los relés. La ventaja de estos es que se puede conectar tanto dispositivos AC como DC, pues depende únicamente de la alimentación que cada uno tenga.

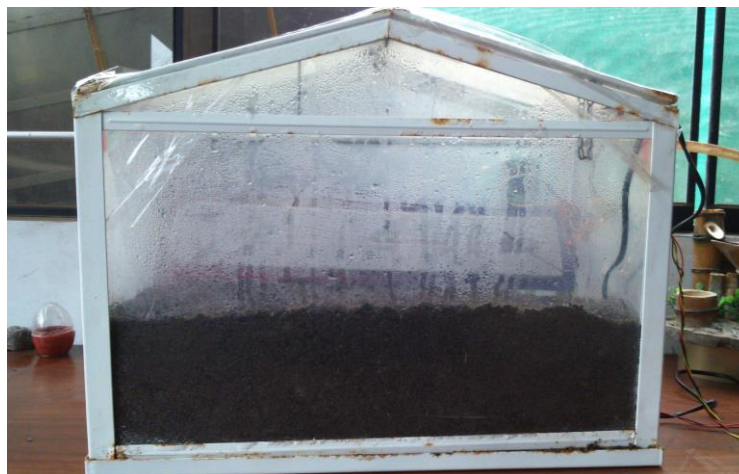


Figura 4.5: Pequeño invernadero proporcionado por el "GRUPO PUCP".

Después de verificar que los actuadores estén funcionando, se dejó el germinador conectado por una noche para confirmar que podría funcionar por sí mismo por periodos más largos de tiempo. En la mañana se pudo hallar condensación en las paredes del germinador, lo que indicaba a simple vista que se encontraba más caliente que el ambiente en el exterior. Se había dejado la temperatura configurada a 28 °C, y se halló el dispositivo a 26 °C. Esto en parte se debe a que este primer prototipo no es hermético, por lo que pierde calor tanto por las paredes como por las aberturas en la parte superior. Adicionalmente, el calentador tiene una potencia menor a la sugerida inicialmente; debido a esto, este equipo no podrá llegar a temperaturas mucho más altas que la del ambiente. En la figura 4.6, mostrada a continuación, se puede observar una foto de la tarjeta principal durante la mañana en que se hizo las pruebas.

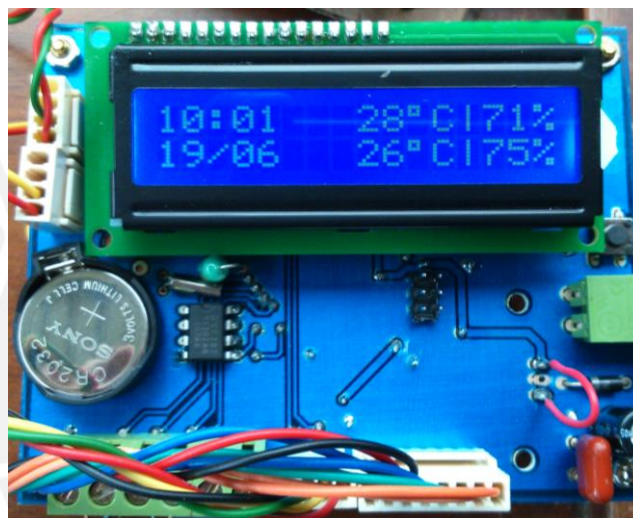


Figura 4.6: Tarjeta principal mostrando el estado actual luego de una noche de operación.

Finalmente, se dejó el germinador funcionando por un fin de semana completo para tener una referencia de funcionamiento de un tiempo más largo. La prueba fue exitosa, pues cuando se revisó el germinador al finalizar la prueba, se pudieron hallar algunos pequeños brotes de semillas que habían estado en el sustrato, como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7: Plantas comenzando a germinar dentro del dispositivo.

4.2.4 Resultados

Después de una semana de operación, se observaron distintos resultados que se deben mencionar, para que puedan ser corregidos en una segunda implementación. En primer lugar, lo que más resaltó fue que el dispositivo no llegó a la temperatura configurada de 28 °C, solo a 26 °C durante la mañana. Como se mencionó anteriormente, si hay pequeñas aperturas en el germinador, habrá pérdidas de calor a través de estas. Además, las paredes de este primer modelo son de acrílico de 3 mm, lo que no es un buen aislante térmico. Se debe considerar que la temperatura ambiente durante las mañanas en las que se probó el dispositivo fue de aproximadamente 20 °C. En otras palabras, este primer dispositivo puede calentar su interior 5 o 6 grados Celsius por encima de la temperatura ambiente, haciendo uso del calentador de tan solo 20 W y del primer modelo, que es una versión más pequeña que la que se había planteado inicialmente (tiene aproximadamente 50 x 25 x 40 cm). Por otra parte, hubo una tarde en la que se dejó el aparato expuesto al sol. Se observó que la temperatura subió hasta 30 grados, incluso con el ventilador encendido.

Con respecto al control de humedad, el sensor usado (mostrado en el capítulo 3) funcionó muy bien por los primeros días, pero luego de la semana de prueba mostró signos de desgaste y hasta oxidación. Esto limitó ligeramente la detección de conductividad, por lo que el sensor ya no llegaba a detectar 100 % de humedad. Esto se pudo solucionar temporalmente limpiando las pistas del sensor para eliminar la suciedad y la superficie ligeramente corroída. Sin embargo, el sensor probado demuestra no ser el óptimo porque no tiene protección en contra de la corrosión.

Finalmente, para esta primera etapa no se habilitó el control de iluminación debido a que toda la carcasa está hecha de acrílico transparente y el germinador fue colocado detrás de una ventana, por lo que tenía mucha luz natural. Sin embargo, se probó en el laboratorio que la tarjeta de leds encendiera de manera correcta.

4.3 Costos

Para el presente proyecto, se tuvo en cuenta que el diseño electrónico debía tener el menor costo posible, para que el Grupo de Apoyo para el Sector Rural “GRUPO PUCP” pueda replicarlo y utilizarlo en sus actividades, que muchas veces tienen fines no lucrativos. Por eso, la selección de componentes se basó no solo en la eficiencia o precisión de los mismos, sino también en su precio y su disponibilidad en el mercado local. Se debe tomar en cuenta que el costo en materiales sería menor si el producto se produjera en masa; es decir, al menos 100 unidades. Esto se debe a que importar los componentes en paquetes de 100 tienen un precio

total menor, y el beneficio de precio supera al costo del envío recién en cantidades superiores a este número.

En la siguiente tabla (4.1) se muestra el detalle de los gastos realizados en compra de componentes para la presente tesis. La mayoría de precios colocados responden a los precios que se obtuvieron en tiendas locales, mientras que otros productos fueron solicitados a través de páginas de e-commerce; en dichos casos también se incluye el precio del “shipping” o entrega. Hay elementos que fueron proporcionados por el “GRUPO PUCP”, como el calentador o la bomba de agua, por lo que se colocan precios aproximados.

De manera adicional al costo en materiales, se suma el precio por el diseño y la mano de obra. Para conseguir los componentes, coordinar la fabricación y ensamblar las tarjetas, se necesita un tiempo de al menos tres días útiles (24 horas efectivas de trabajo). Esto multiplicado por el precio de mercado aproximado para el trabajo de un ingeniero recién egresado, que se estima en 20 Nuevos Soles la hora, el costo por la mano de obra sería de 500 Nuevos Soles. Por el diseño se le agregaría un costo de alrededor de 500 Nuevos Soles más, como parte del derecho por propiedad intelectual y todo el trabajo de desarrollo previo.

En total, el costo del sistema electrónico completo sería de aproximadamente 1400 Nuevos Soles. Esto toma en cuenta el precio de los componentes (mostrados en la tabla 4.1), el costo de la mano de obra y parte del costo de diseño.

Tabla 4.1: Costo de Materiales.

| Componente | Package | Tarjeta | Cantidad | Precio unitario | Total |
|------------------------|-----------|------------|----------|-----------------|-----------|
| 1n4148 | DO35-7 | Actuadores | 3 | S/. 0.20 | S/. 0.60 |
| AK500/2 | | Actuadores | 7 | S/. 0.50 | S/. 3.50 |
| RELAY 5V | G5LE | Actuadores | 3 | S/. 3.00 | S/. 9.00 |
| IRF540 | TO220 | Actuadores | 2 | S/. 1.50 | S/. 3.00 |
| MMBT3904LT1-NPN | SOT23-BEC | Actuadores | 3 | S/. 0.20 | S/. 0.60 |
| PCB | | Actuadores | 1 | S/. 17.50 | S/. 17.50 |
| Ventilador 5V | | Actuadores | 1 | S/. 15.00 | S/. 15.00 |
| Calentador | | Actuadores | 1 | S/. 80.00 | S/. 80.00 |
| Bomba de agua | | Actuadores | 1 | S/. 30.00 | S/. 30.00 |
| Conector Molex 4 pines | 6410-04 | Main | 3 | S/. 0.50 | S/. 1.50 |
| Conector Molex 8 pines | 6410-08 | Main | 1 | S/. 0.80 | S/. 0.80 |
| 0.33 uf | c5b3 | Main | 1 | S/. 0.20 | S/. 0.20 |
| 0.1 uf | 805 | Main | 1 | S/. 0.40 | S/. 0.40 |
| 220 uf | e3,5-8 | Main | 1 | S/. 0.50 | S/. 0.50 |
| 100 nf | 805 | Main | 6 | S/. 0.40 | S/. 2.40 |
| 1n4004 | | Main | 1 | S/. 0.20 | S/. 0.20 |
| display lcd | | Main | 1 | S/. 13.00 | S/. 13.00 |

| | | | | | |
|------------------------|------------|----------|----|-----------|-------------------|
| CR2032 | | Main | 1 | S/. 1.50 | S/. 1.50 |
| ATMEGA32A | TQFP | Main | 1 | S/. 28.00 | S/. 28.00 |
| 7805 | TO220 | Main | 1 | S/. 2.00 | S/. 2.00 |
| Espadin macho | doble fila | Main | 1 | S/. 1.50 | S/. 1.50 |
| 10mH | | Main | 1 | S/. 2.00 | S/. 2.00 |
| AK500/2 | | Main | 3 | S/. 0.50 | S/. 1.50 |
| crystal 32k | | Main | 1 | S/. 0.20 | S/. 0.20 |
| 10k | 805 | Main | 3 | S/. 0.20 | S/. 0.60 |
| boton res | | Main | 1 | S/. 0.50 | S/. 0.50 |
| ds1307 | | Main | 1 | S/. 4.00 | S/. 4.00 |
| phoenix 2 | | Main | 1 | S/. 1.50 | S/. 1.50 |
| PCB | | Main | 1 | S/. 47.00 | S/. 47.00 |
| Res-LED | 805 | LED | 32 | S/. 0.20 | S/. 6.40 |
| LED | 5mm | LED | 32 | S/. 0.18 | S/. 5.76 |
| AK500/2 | | LED | 1 | S/. 0.50 | S/. 0.50 |
| PCB | | LED | 1 | S/. 15.00 | S/. 15.00 |
| Conector Molex 4 pines | 6410-04 | Sensores | 2 | S/. 0.50 | S/. 1.00 |
| LM35 | | Sensores | 1 | S/. 6.60 | S/. 6.60 |
| PCB | | Sensores | 1 | S/. 4.00 | S/. 4.00 |
| Sensor de humedad | | Sensores | 1 | S/. 5.00 | S/. 5.00 |
| Botones 4 pines | | Botones | 7 | S/. 0.50 | S/. 3.50 |
| Conector Molex 8 pines | 6410-08 | Botones | 1 | S/. 0.80 | S/. 0.80 |
| PCB | | Botones | 1 | S/. 17.50 | S/. 17.50 |
| Cable unipolar | | | 7 | S/. 1.50 | S/. 10.50 |
| Fuente 5 V / 2 A | | | 1 | S/. 27.10 | S/. 27.10 |
| Total | | | | | S/. 372.16 |

Conclusiones y Recomendaciones

Al finalizar el periodo de pruebas y el análisis de los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- Se logró cumplir el objetivo general de diseñar un sistema de monitoreo integral de temperatura y humedad, que puedan controlar dichos parámetros. La iluminación fue programada para encenderse de acuerdo a un horario, pero en el piloto no se habilitó debido a que el germinador estaba expuesto a luz natural. Este objetivo general se pudo lograr debido a que también se cumplió con los diferentes objetivos de diseñar e implementar cada una de las partes descritas.
- Con referencia al control de temperatura, se logró una precisión de aproximadamente $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tomando en cuenta el error del sensor y la histéresis que se le dio al programa. Inicialmente se mencionó que la variación climática sería de un máximo de $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ como máximo. Si bien esto es cierto y el proyecto lograría amortiguar esta variación en la temperatura, lo que más resalta acerca de este piloto es que se pueden hacer germinar semillas fuera de temporada. Es decir, se puede programar el germinador en cierta temperatura para simular condiciones de otra estación y así lograr el brote de semillas, incluso en invierno. Por otro lado, con el cambio climático se sabe que serán más comunes condiciones extremas como heladas. El germinador con control electrónico puede amortiguar este cambio brusco de temperaturas, reduciendo así el daño que pudiesen sufrir las semillas.

El calentador es una parte crítica del sistema. Dependiendo de su potencia, se podrá llegar a mayores variaciones de temperatura con respecto a la temperatura del ambiente. De la misma manera, el ventilador deberá de ser de un mayor tamaño para que pueda enfriar el sistema de manera eficiente en caso sea expuesto a sol indirecto y se caliente muy rápidamente. En conjunto con la selección de nuevos actuadores, se deberá tomar en cuenta la construcción del germinador, pues un mayor aislamiento térmico permitiría usar actuadores de menor potencia.

- El control de humedad diseñado puede programarse con una precisión de hasta 1%. Sin embargo, se programó una histéresis de 5% para evitar que la bomba se prenda y apague constantemente. Adicionalmente, se demostró que el sensor tiene una tendencia lineal, pero esto no elimina el hecho que podría existir un error mayor a 5% en algún rango de humedad. Asimismo, en las pruebas se observó que el sensor de humedad en sí tiende a sufrir corrosión, lo que aumentaría el error mostrado. Por ende, se puede decir que este sistema logra brindar condiciones adecuadas para la semilla,

pues no estará en un sustrato saturado o demasiado seco. Sin embargo, no brindaría las condiciones óptimas que se desearían en un laboratorio.

Se recomienda que, para reducir este error, se consiga un sensor de humedad que sea más resistente a la humedad para evitar errores en la detección por culpa de la corrosión. Es importante mencionar que, de cambiar el sensor, también deberá de repetirse el procedimiento de determinar la curva de respuesta del mismo, para confirmar que sea lineal y ajustar la ecuación en el programa.

- Respecto al reloj en tiempo real (RTC), se logró diseñar e implementar de manera que no se desfase más de 5 minutos al mes. Se confirmó esto al dejarlo encendido por una semana y se halló que se aún seguía sincronizado con el reloj en el celular. Es decir, se desfasó menos de un minuto. De esta manera, se puede encender y apagar los leds de acuerdo a la hora que se muestre en el germinador sin tener una variación en el horario que pueda perjudicar a la planta.

De acuerdo a lo investigado, las 8 horas de luz requeridas es una recomendación general, pues diversas especies no necesitan ser expuestas a la luz. Sin embargo, es una buena medida para lograr que la planta llegue a crecer a un tamaño adecuado para su trasplante. Sería recomendable que en un futuro se haga un trabajo en coordinación con biólogos o agrónomos para que confirmen si este parámetro dado es suficiente o si un régimen de encendido y apagado más estricto es necesario.

- Por lo expuesto en el capítulo 2, se puede concluir que, dadas las condiciones de temperatura y humedad dentro del germinador, una semilla podría germinar con mayor facilidad dentro de este en comparación a si fuese sembrado a la intemperie. Si bien no se realizó una comparación directa, es importante mencionar que pocos días después de haber implementado el germinador comenzaron a germinar algunas plantas, probablemente de semillas que habían quedado en el sustrato (mezcla de tierra, musgo y compost) y no habían tenido las condiciones adecuadas para germinar antes.
- Finalmente, se puede afirmar que se cumplió con el objetivo de que sea fácilmente operable, ya que para que un miembro del GRUPO PUCP lo usara, bastó darle breves indicaciones, y no fue necesario presentarle el manual completo. Harían falta más pruebas con diferentes usuarios para poder afinar la interfaz y encontrar posibles “bugs” o fallas en la programación.

Bibliografía

- BASKIN, Carol C. y Jerry M. BASKIN
2014 *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination*. Second Edition. Department of Biology. University of Kentucky. Lexington, Kentucky, USA. Academic Press.
- CAFE, Tony. "Physical constants for investigators". <tcforensic.com.au>. TC Forensic P/L. Consulta el 11/02/2015.
- FANKHAUSER, Christian y Joanne CHORY.
1997 *Light control of plant development*. Annual Review of Cell and Developmental Biology. Tomo 13 (1997): 203-29.
- GALIL MOTION CONTROL Inc.
2008 "Application Note #5481: Interfacing Temperature Sensors with Galil products". Rocklin, CA 95765 USA. En línea. < www.galil.com/download/application-note/note5481.pdf> Consulta el 10/4/2015.
- LIEBERMAN, Mark
2012 "How to select the best growlight for indoor growing". *Urban Organic Gardener*. En línea. Consulta el 15/4/2015. <http://www.urbanorganicgardener.com/2012/02/how-to-select-the-best-grow-light/>
- MARAPI, Ricardo.
2013 "Los impactos del cambio climático sobre la agricultura". *La Revista Agraria*. Lima. Pp 11-12. Consulta el 31/05/2014. < http://www.larevistaagraria.org/content/los-impactos-del-cambio-clim%C3%A1tico-sobre-la-agricultura>.
- MAXIM INTEGRATED
2005 DS1620 Digital Thermometer and Thermostat. 160 Rio Robles, San Jose, CA 95134 USA. En línea. Consulta el 29/03/2015.
<datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1620.pdf>
- MAYER, A.M y A. POLJAKOFF-MAYBER
1982 *The Germination of Seeds*. 3rd Edition. Great Britain. Pergamon Press Ltd.
- MAZIDI, Muhammad Ali, Sarmar NAIMI y Sepehr NAIMI
2011 *The AVR microcontroller and embedded system*. Prentice Hall. Pearson Education. New Jersey.
- MECHAM, Brent Q.
2010 "A practical guide to using soil moisture sensors to control landscape irrigation". Northern Colorado Water Conservancy District. Loveland, Colorado. En línea. <https://watergreat.com/reference/Practical_overview_2010.pdf>. Consulta el 15/06/14.
- MINAM, PNUD
2010 "Segunda Comunicación Nacional del Perú a la convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático". Lima, Fondo Editorial del MINAM.
<http://cdam.minam.gob.pe/novedades/peruycambioclimatico.pdf>. Consulta el 31/05/2014

- NAVE, C. R.
2014 “Heat Conduction”. *Hyperphysics*. Georgia State University. En Línea. Consulta el 30/06/2015. <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatcond.html> >
- POSTIGO, Julio C.
2014 “Cambio climático y agricultura: una relación con un fuerte impacto en el Perú”. *La Revista Agraria*. Lima. Pp 22-23. Consulta el 31/05/2014.
<<http://www.larevistaagraria.org/content/cambio-clim%C3%A1tico-y-agricultura-una-relaci%C3%B3n-con-un-fuerte-impacto-en-el-per%C3%BA>>.
- RAVEN, Peter H.; Ray F. EVERT, Susan E. EICHHORN
2005 *Biology of Plants*, 7th Edition. New York: W.H. Freeman and Company Publishers. pp. 504–508.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA
2014 “led. - Diccionario de la lengua española”. 23ª edición. En línea.
<<http://lema.rae.es/drae/?val=led>>. Consulta el 29/06/2015.
- R.J. BULA, R.C. MORROW, T.W. TIBBITTS, y D.J. BARTA.
1991 *Light-emitting Diodes as a Radiation Source for Plants*. Wisconsin Center for Space Automation and Robotics and Department of Horticulture, University of Wisconsin-Madison. HORTSCIENCE 26(2):203-205.
- SALAZAR, Beatriz y RIVERA, Nelly.
2014 “Clima extremo: ¿estamos preparados?”. *La Revista Agraria*. Lima. Pp 10-11. Consulta el 31/05/2014. <<http://www.larevistaagraria.org/content/clima-extremo-%C2%BFestamos-preparados-0>>.
- SALAZAR, Beatriz y RIVERA, Nelly.
2013 “El conocimiento es vital para adaptarnos al cambio climático”. *La Revista Agraria*. Lima. Pp 14. Consulta el 31/05/2014. <<http://www.larevistaagraria.org/content/el-conocimiento-es-vital-para-adaptarnos-al-cambio-clim%C3%A1tico>>.
- SCERVINI, Michelle
2009 “Thermocouples: The Operating Principle” University of Cambridge. Department of Materials Science and Metallurgy. En línea.
<<http://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>>. Consulta el 10/04/2015
- TEXAS INSTRUMENTS Inc.
2015 LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor. Texas Instruments, Dallas, Texas 5265. Versión original 1999, revisado en enero del 2015. En línea. Consulta el 30/3/2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>
- TEXAS INSTRUMENTS Inc.
2015 LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors. Texas Instruments, Dallas, Texas 75265. Versión original 1999, revisado en febrero del 2015. En línea. Consulta el 06/4/2015. <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm235.pdf>>
- Polystyrene, (s. f). En Wikipedia. Recuperado el 30/06/2015.
<<https://en.wikipedia.org/wiki/Polystyrene> >
- Heat Capacity, (s.f) . En Wikipedia. Recuperado el 30/06/2015.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity >