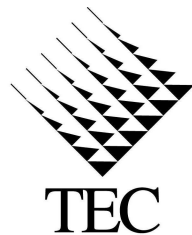


Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Diseño de un sistema prototipo de riego energéticamente autónomo para estructuras verdes

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

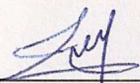
Frayzer Esaú Bonilla Matamoros

Cartago, 1 de marzo de 2012

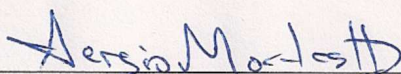
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

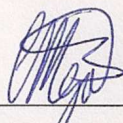
Miembros del Tribunal



Ing. Marvin Hernández Cisneros
Profesor Lector



Ing. Sergio Morales Hernández
Profesor Lector



Ing. Carlos Meza Benavidez Ph.D
Profesor Tutor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 25 de noviembre de 2011

Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Anteproyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Cartago, 1 de marzo de 2012

Frayzer Esaú Bonilla Matamoros

Resumen

Actualmente vivimos inmersos en un entorno que se ve afectado por las secuelas de la crisis ecológica mundial, de ahí que es necesario proponer soluciones amigables con el ambiente que mejoren la calidad de vida de las personas.

El uso de estructuras verdes en la infraestructura contemporánea se ha tornado una necesidad ya que permiten mejorar el diseño arquitectónico, disminuir el gasto en acondicionamiento y aislación y aportan belleza estética, sin embargo para generalizar su aplicación se requiere de un eficiente sistema de riego.

Este informe propone un sistema prototipo de riego energéticamente autónomo para estructuras verdes, se analizarán los parámetros y variables requeridos para su diseño, así como las ventajas de los sistemas de riego autónomos y los diferentes métodos de riego que pueden ser usados en estructuras verdes, finalmente se propondrá un sistema prototipo de riego que utiliza un inversor controlado de corriente directa a corriente alterna.

Palabras claves

Sistemas de riego, Estructuras verdes, Inversor, Controlador de corriente alterna, Dynaponics

Abstract

Nowadays, we live in an environment that is affected by the consequences of the global ecological crisis, hence there is a need to propose environmentally friendly solutions to improve the quality of life of human beings.

The use of green structures in modern infrastructure has become a necessity since they enhance architectural design, reduce spending on conditioning and insulation, and provide aesthetic beauty. However, to generalize their application green structures require an efficient irrigation system.

This report proposes an irrigation prototype system with autonomous energy for green structures, it will discuss the parameters and variables required for its design as well as the advantages of self-irrigation systems, and different methods of irrigation that can be used in green structures. Finally, the project aims to propose a prototype system of irrigation using a DC/AC Controlled Power Inverter

Keywords

Irrigation systems, green structures, Inverter, AC controller, Dynaponics

Dedicatoria

*“Regi autem saeculorum inmortalis, invisibilis,
soli Deo honor et gloria in saecula saeculorum amen”*

Ad Timotheum 1.17

Agradecimientos

A mis Dios...	que me dio la vida y la oportunidad de estudiar...
A mis padres...	los verdaderos héroes y merecedores de elogio por ser mentores y ejemplo...
A mi amor...	que es la inspiración de mis logros, quien vino a mi vida a llenarme de felicidad y cada día me impulsa a seguir adelante...
A mis hermanos...	mis eternos e incondicionales amigos...
Al Ing. Carlos Meza B.	por su paciencia, por creer en mí y darme la oportunidad de aprender a su lado...

Índice general

Declaratoria de autenticidad	II
Resumen	III
Abstract	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
1. Introducción	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Síntesis del problema	2
1.3. Enfoque de la solución	2
1.3.1. Diseño del sistema prototipo de riego energéticamente autónomo	2
1.3.2. Diseño del sistema de captación y procesamiento de energía	3
1.3.3. Diseño del sistema de bombeo	3
1.3.4. Diseño del sistema de distribución de fluidos	4
1.3.5. Diseño del sistema de administración y control	4
1.3.5.1. Modos de operación	4
1.3.5.2. Patrón de riego	4
1.3.5.3. Modo de riego	5
1.3.6. Diseño de la interfaz de usuario	5
2. Meta y Objetivos	7
2.1. Meta	7
2.2. Objetivos	7
2.2.1. Objetivo General	7
2.2.2. Objetivos Específicos	7
3. Marco Teórico	9
3.1. Parámetros y variables físicas	9
3.2. Ventajas de un sistema de riego autónomo:	10
3.3. Métodos de riego	11
3.4. Métodos cultivo	12
3.5. Selección del método de cultivo para las estructuras verdes	15
3.6. Programación del MSP430	18
3.7. Etapas de programación del MSP430	18

4. Procedimiento Metodológico	21
5. Descripción detallada de la solución	25
5.1. Análisis de soluciones y selección final	25
5.1.1. Sistema de administración y control	25
5.1.2. Sistema de Bombeo	25
5.1.3. Sistema de distribución de fluidos	27
5.2. Descripción del hardware	29
5.2.1. Diseño del sistema de administración y control	30
5.2.1.1. Diseño de la interfase con el usuario	30
5.2.1.2. El microprocesador	31
5.2.2. Diseño del sistema de bombeo	33
5.2.2.1. El inversor controlado de corriente directa a corriente alterna	33
5.2.2.2. Bomba de aire	38
5.2.3. Diseño del sistema de distribución de fluidos	38
5.2.3.1. Componentes requeridos	38
5.2.3.2. Metodología de construcción	41
5.3. Descripción del software	42
5.3.1. Principio de funcionamiento	42
5.3.2. Estructura del programa	42
5.3.2.1. Definición de Variables	42
5.3.2.2. Inicialización del microprocesador	44
5.3.2.3. Rutina de atención de botón	45
5.3.2.4. Interrupciones	45
6. Análisis de resultados	49
6.1. Resultados	49
6.1.1. Profundidad de los aspersores	49
6.1.2. Señales en el inversor controlado de CD a CA	50
6.1.3. Eficiencia del inversor en modo continuo	53
6.2. Análisis	54
6.2.1. Profundidad de los aspersores	54
6.2.2. Señales en el inversor controlado de CD a CA	54
6.2.3. Eficiencia del inversor en modo continuo	56
7. Conclusiones y recomendaciones	57
7.1. Conclusiones	57
7.2. Recomendaciones	58

Índice general	IX
8. Anexos	59
Bibliografía	61

Índice de figuras

1.1. Entorno ambiental en el que estamos viviendo	1
1.2. Diagrama de primer nivel	2
1.3. Diagrama de segundo nivel	2
1.4. Potenciales fuentes de energía	3
1.5. Diagrama de la estructura verde	5
3.1. Diagrama de Riego	10
3.2. Riego por goteo	14
3.3. Hidroponía con riego subsuperficial	14
3.4. Aeroponía	15
3.5. Dynaponic	16
3.6. Estructura de un sistema Dynaponic	17
3.7. Diagrama de flujo de la técnica de programación	19
5.1. Diagrama de segundo nivel	29
5.2. Diagrama del sistema de administración y control	30
5.3. El microprocesador MSP430	32
5.4. Señal de salida del PWM	32
5.5. Diagrama del sistema de bombeo	33
5.6. Etapa de acondicionamiento y aislación	34
5.7. Señales de salida de los optoacopladores	34
5.8. Los drivers de los semipuentes	35
5.9. Señales de salida de los drivers	35
5.10. Puente H	36
5.11. Señal de salida del puente en H	36
5.12. Filtro de salida	37
5.13. Señal de salida del filtro	37
5.14. Bomba de aire	38
5.15. Circuito completo	39
5.16. Foto del circuito	39
5.17. Diagrama del sistema de distribución de fluidos	40
5.18. Sistema prototipo de riego	40
5.19. Diagrama de flujo del programa	43
5.20. Diagramas de flujo	46

5.21. Diagramas de flujo de las interrupciones	47
6.1. Señales de salida del microprocesador con diferentes PWM	50
6.2. Señales de salida del microprocesador	51
6.3. Señales de salida de los optoacopladores	51
6.4. Señales de salida de uno de los drivers	52
6.5. Señales de salida del puente H	52
6.6. Señales de salida del filtro de salida	53

Índice de cuadros

4.1. Primer Paquete de trabajo	21
4.2. Segundo Paquete de trabajo	22
4.3. Tercer Paquete de trabajo	22
4.4. Cuarto Paquete de trabajo	23
4.5. Quinto Paquete de trabajo	23
4.6. Sexto Paquete de trabajo	23
5.1. Resumen de parámetros del sistema	31
5.2. Parámetros del MSP430f2012	31
5.3. Componentes del prototipo de distribución de fluidos	41
6.1. Datos experimentales de la profundidad óptima de los aspersores	49
6.2. Condiciones de operación	50
6.3. Datos experimentales de la eficiencia del inversor en modo continuo	53

1.1. Generalidades

En medio de una crisis ecológica que afecta el medio ambiente, las personas ven afectado el desarrollo de sus actividades cotidianas, por las altas temperaturas, altos niveles de contaminación y excesivos niveles de ruido que imperan en el medio, tal y como se muestra en la figura 1.1, ante tal problemática existen soluciones no amigables con el ambiente que benefician al ser humano pero contribuyen al daño ecológico.



Figura 1.1: Entorno ambiental en el que estamos viviendo

La sociedad costarricense urge de soluciones ecológicas a estos inconvenientes, por lo que el SESLab ha asumido la responsabilidad de desarrollar propuestas versátiles, amigables con el ambiente y de bajo costo como las estructuras verdes. Sin embargo el laboratorio no posee un sistema de riego energéticamente autónomo para esas estructuras verdes, que a su vez sirvan de base generar conocimientos científicos propios que permitan investigar ¿Cuáles son los beneficios del uso de las estructuras verdes? y ¿En cuánto están ayudando a mejorar el uso de las estructuras verdes el nivel de confort de las personas?.

1.2. Síntesis del problema

El SESLab carece de un sistema de riego energéticamente autónomo para las estructuras verdes que permita desarrollar los conocimientos científicos propios necesarios para cuantificar los beneficios que perciben las personas al incorporarlas a las infraestructuras en Costa Rica.

1.3. Enfoque de la solución

1.3.1. Diseño del sistema prototipo de riego energéticamente autónomo

El sistema prototipo de riego energéticamente autónomo se encarga de generar diferentes patrones de riego para el suministro de nutrientes y fluidos a las plantas que se van a utilizar en la estructura verde a partir de un conjunto de parámetros definidos por el usuario, tal y como se muestra en la figura 1.2

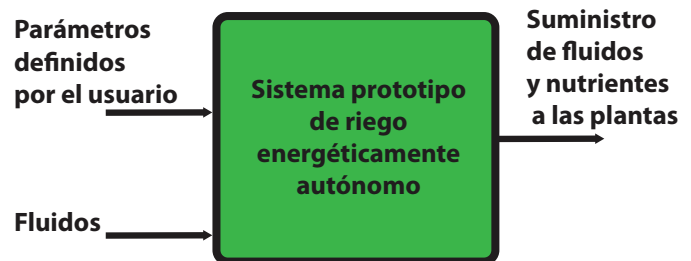


Figura 1.2: Diagrama de primer nivel

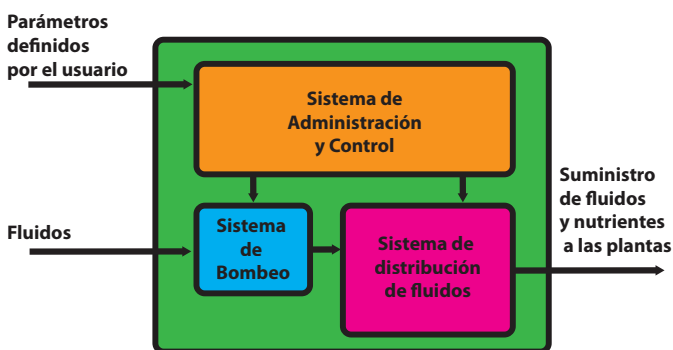


Figura 1.3: Diagrama de segundo nivel

Al detallar el diseño, el sistema prototipo de riego energéticamente autónomo está formado por tres subsistemas: El sistema de administración y control, el sistema de bombeo y el sistema de distribución de fluidos, (ver figura 1.3). El sistema de administración y control establece el modo de operación y los distintos patrones de riego, a partir de un conjunto de parámetros definidos por el usuario, este sistema genera una serie de señales que

controlan la energía y la suministra al sistema de bombeo para que este distribuya los fluidos por medio del sistema de distribución de fluidos.

1.3.2. Diseño del sistema de captación y procesamiento de energía

Este sistema es el responsable de suministrar al sistema de riego la energía necesaria para efectuar sus funciones, se ha propuesto el uso de fuentes de energía renovables como: paneles de energía solar, o aerogeneradores además de baterías para almacenar esa energía (ver figuras 1.4a y 1.4b), para evitar usar la energía eléctrica convencional (ver figuras 1.4c).

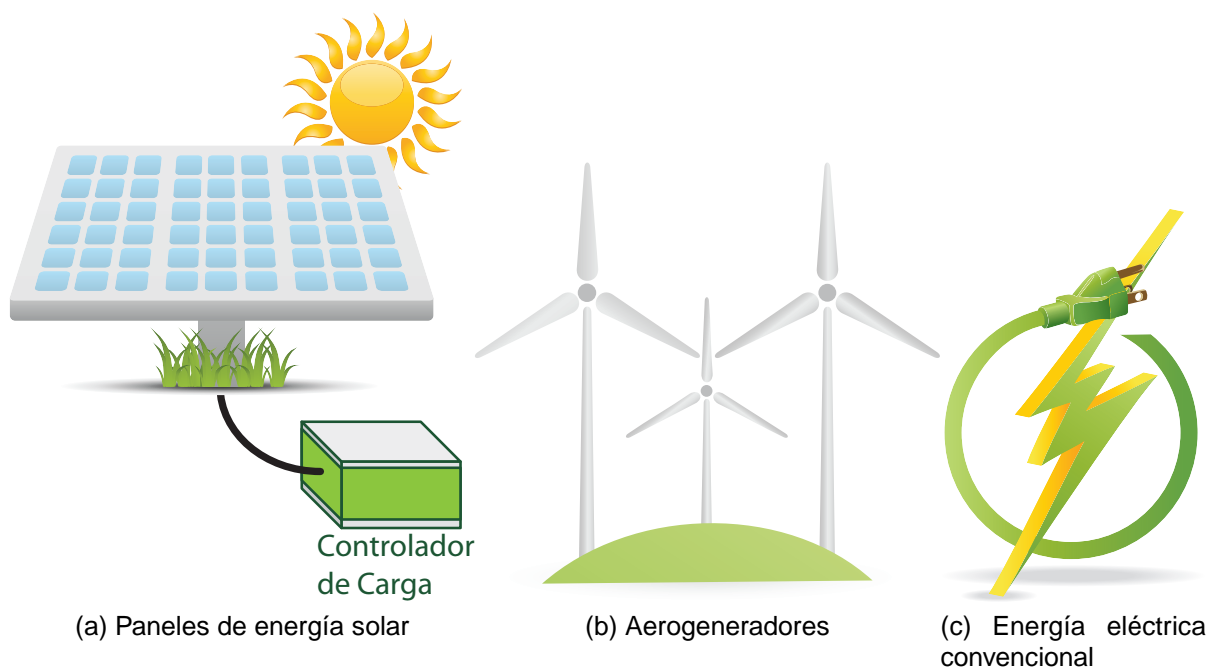


Figura 1.4: Potenciales fuentes de energía

1.3.3. Diseño del sistema de bombeo

Este sistema está conformado por una o más bombas de riego para impulsar los fluidos, estas deben cumplir con las especificaciones de consumo de potencia y de caudal requerido por el sistema de administración y control.

1.3.4. Diseño del sistema de distribución de fluidos

El sistema de tuberías está formado por un conjunto de tuberías de irrigación, los depósitos de agua y nutrientes que requiere la estructura verde. El sistema de bombeo impulsa los fluidos almacenados en el depósito de agua, con un patrón definido por el sistema de administración y control, por el sistema de tuberías que se encarga de distribuirlos por la estructura verde. Esta distribución debe realizarse de modo que cumpla con el requerimiento de volumen de agua y nutrientes por m^2 para suplir las necesidades hídricas medias de las plantas.

1.3.5. Diseño del sistema de administración y control

El sistema de administración y control se encarga de gobernar la operación del sistema de riego, a partir del conjunto de parámetros definidos por el usuario, establece los distintos patrones de riego a la estructura verde acorde con el modo de operación, está conformado por un microprocesador y los actuadores correspondientes.

1.3.5.1. Modos de operación

El sistema de control puede operar: en modo manual o en modo automático. En **modo manual** el usuario debe definir el patrón de riego que va a suministrar a la pared verde, mientras que en **modo automático** el sistema es totalmente autónomo, el sistema utiliza las magnitudes meteorológicas y mediante un algoritmo preestablecido determina el patrón de riego más adecuado.

1.3.5.2. Patrón de riego

El patrón de riego establece el método utilizado para llevar a cabo la irrigación, para ello requiere de un conjunto de parámetros entre los que tentativamente encontramos:

1. La amplitud de salida de la señal de tensión alterna [V]: entre $[0V_{RMS}$ y $120V_{RMS}]$
2. La duración del periodo de riego [s]: entre $[1s$ y $18horas - 12min]$
3. Ciclo de trabajo del patrón de riego []: entre $[0$ y $10]$

1.3.5.3. Modo de riego

El sistema de administración puede establecer dos modos de riego: continuo o discontinuo. En modo de riego **Continuo** el sistema de riego opera en forma permanente. En modo de riego **Discontinuo** el sistema de riego opera por periodos de tiempo denominados “ciclo de riego” (T_r) compuesto por periodos de tiempo denominados “intervalo de riego” (τ) con tiempos de inactividad denominados “Intervalo de espera” (I_n).

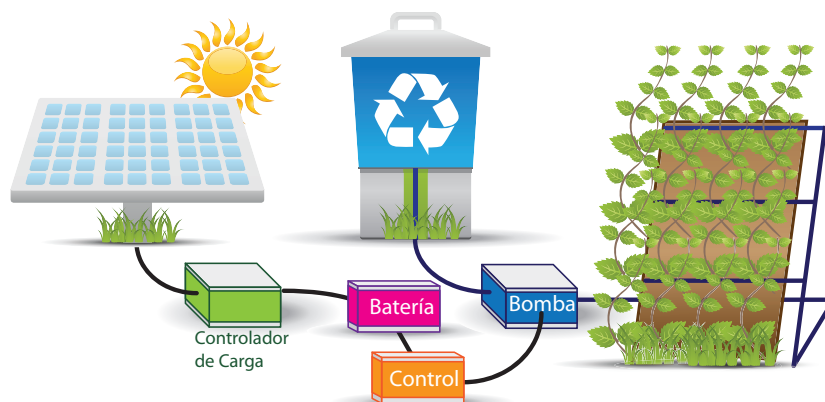


Figura 1.5: Diagrama de la estructura verde

1.3.6. Diseño de la interfaz de usuario

La interfaz de usuario es el medio que permite la interacción del sistema de riego con el usuario, debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Debe ser fácil de entender.
2. Debe ser fácil de accionar.
3. Debe brindar la información del patrón de riego.
4. Debe permitir encender y apagar el sistema de riego.

Meta y Objetivos

2.1. Meta

Generar nuevo conocimiento científico en el tema de sistemas de riego energéticamente autónomo para estructuras verdes que permita a ingenieros proponer soluciones mitigantes a los efectos de la crisis ambiental que utilicen esta tecnología.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de riego prototipo que permita satisfacer las necesidades de riego y suministro de nutrientes para una estructura verde.

- *Indicador:* La existencia de un sistema de riego que cumpla con los requerimientos de diseño establecidos en el capítulo 1.3.

2.2.2. Objetivos Específicos

1. Identificar los parámetros necesarios para generar un patrón de riego y suministro de nutrientes
 - *Indicador:* Un informe que lista los parámetros necesarios para generar un patrón de riego y suministro de nutrientes junto con su correspondiente explicación.
2. Diseñar y construir un sistema de distribución de fluidos.

- *Indicador:* Se dispone del sistema de distribución de fluidos que cumpla con las especificaciones de la sección 1.3.4

3. Diseñar el sistema de bombeo.

- *Indicador:* Se cuenta del sistema de bombeo que cumpla con las especificaciones de la sección 1.3.3

4. Diseñar el sistema de captación y procesamiento de energía.

- *Indicador:* Se dispone del sistema de captación y procesamiento de energía que cumpla con las especificaciones de la sección 1.3.2

5. Diseñar el sistema de administración y control.

- *Indicador:* Se dispone del sistema de administración y control que cumpla con las especificaciones de la sección 1.3.5

6. Diseñar la interfaz de usuario.

- *Indicador:* Se cuenta interfaz de usuario que cumpla con las especificaciones de la sección 1.3.6

3.1. Parámetros y variables físicas

Para diseñar un sistema de riego es necesario tener presente las variables físicas y los parámetros que se requieren sin importar el método, el modo de operación, o el patrón de riego que se vaya a utilizar, entre los que podemos citar:

1. **El consumo de potencia** (P) [**W**]: determina el consumo de energía que tendrá el sistema de riego en un periodo de tiempo.
2. **El caudal** (Q) [**m³/s**] o [**l/s**]: determina el volumen de fluidos por unidad de tiempo que proporciona el sistema de riego.
3. **Volumen de riego por intervalo** (V) [**l**]: volumen de fluidos por cada intervalo de riego.
4. **Periodo del ciclo de riego** (T_r) [**s**]: la duración de cada ciclo de riego.
5. **Intevalo de riego** (τ) [**s**]: la duración del intervalo de riego.
6. **Intervalo de espera** (I_n) [**s**]: la duración del intervalo de tiempo entre riegos.

De los parámetros anteriores podemos extraer el ciclo de trabajo D

$$D = \frac{\tau}{T_r} \quad (3.1)$$

por consiguiente podemos definir el Intervalo de riego (τ) en términos del ciclo de trabajo

$$\tau = DT_r \quad (3.2)$$

similarmente del Periodo del ciclo de riego (T_r) podemos despejar el Intervalo de espera (In)

$$\begin{aligned} T_r &= \tau + In \\ &= DT_r + In \end{aligned}$$

Reacomodando

$$\begin{aligned} In &= T_r - DT_r \\ &= T_r(1 - D) \end{aligned}$$

$$In = T_r(1 - D) \quad (3.3)$$

Con los cuales podemos realizar un diagrama del patrón de riego, como el que se muestra en la figura 3.1, donde se muestra, el intervalo de riego y el intervalo de espera.

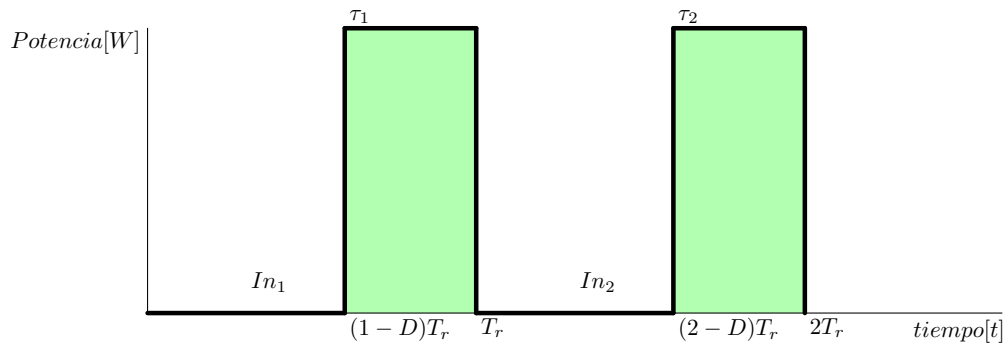


Figura 3.1: Diagrama de Riego

3.2. Ventajas de un sistema de riego autónomo:

Un sistema de riego autónomo tiene una serie de beneficios que van más allá que reducir el consumo de agua dedicado para riego, entre las ventajas encontramos:

1. Ahorro de agua
2. Mejora la salud de las plantas, por que se les proporciona la cantidad justa de fluidos.
3. Reduce el uso de pesticidas, lo ayuda a la salud del ecosistema
4. Reduce la evaporación de los fluidos, al ajustar el riego temprano en la mañana o durante la noche, para evitar la acción del viento y el calor.

3.3. Métodos de riego

Existen diversas clasificaciones para los métodos de riego entre ellas se encuentran:

1. Basado en los requerimientos de energía y presión

- a) Riego por gravedad
 - 1) Riego por surcos
 - 2) Riego por inundation
 - 3) Riego de franja
- b) Riego por el nivel de presión
 - 1) Riego por goteo o localizado
 - 2) Riego por aspersión

2. Basado en la colocación del sistema de riego

- a) Riego superficial
 - 1) Riego por surcos
 - 2) Riego por inundation
 - 3) Riego de franja
 - 4) Riego por goteo o localizado
- b) Riego subterráneo

- c) Riego por aspersión
 - 1) Riego manual
 - 2) Riego por aspersión
 - 3) Riego por spay

3. Basado en el área irrigada

- a) Riego por inundación
 - 1) Riego por surcos
 - 2) Riego por inundation
 - 3) Riego de franja
- b) Riego por goteo o localizado
- c) Riego por aspersión

3.4. Métodos cultivo

El método de riego depende del método de cultivo, los métodos de cultivo se clasifican dependiendo del medio en el que crecen las plantas.

1. **Geoponía:** En este método las plantas crecen sobre algún tipo de suelo. Para este método de cultivo se pueden utilizar cualquiera de todos los métodos de riego.
2. **Hidroponía:** La hidroponía “se define como la ciencia del cultivo de plantas sin uso de tierra, en un medio inerte... .. al que se le agrega una solución nutriente que contiene todos los elementos esenciales requeridos por la planta para su crecimiento normal”[Barbado, 2005], según el mismo autor la hidroponía presenta un conjunto de ventajas, entre las principales se encuentran
 - a) Reducción de costos de producción.
 - b) Independencia de los fenómenos meteorológicos.
 - c) Menos espacio y capital para una mayor producción.

- d) Ahorro de agua, que se puede reciclar.
- e) Ahorro de fertilizantes e insecticidas.
- f) Limpieza e higiene en el manejo del cultivo.
- g) Alto porcentaje de automatización.
- h) Balance ideal aire, agua y nutrientes.
- i) Humedad uniforme
- j) Excelente drenaje
- k) Permite una mayor densidad de población.
 - l) Se puede corregir fácil y rápidamente de la deficiencia o el exceso de un nutrimento.
- m) Mayor calidad de producto.
- n) Se requiere mucho menor cantidad de espacio para producir el mismo rendimiento del suelo.

Entre los medios inertes que se usan para en hidroponía están: la fibra de coco, la perlita agrícola, la arlita y la gravilla común, para este método de cultivo se puede utilizar riego por goteo o localizado o riego subsuperficial.

En el **riego por goteo** una bomba le proveen a las plantas en forma de gotas los nutrientes y fluidos, tal y como se muestra en la figura 3.2

En el **riego subsuperficial** Las plantas están cultivadas en algún medio como: Fibra de coco, perlita agrícola, arlita y gravilla común, este medio a su vez esta suspendido sobre un flujo de nutrientes y fluidos.

3. **Aeroponía:** En este método las plantas crecen suspendidas en el aire. Para este método de cultivo se puede utilizar riego por aspersión. Las plantas están suspendidas en el aire por un medio mecánico y por medio de aspersores, se les suministra los nutrientes y fluidos a las plantas. Según Ken Chien Yung, las plantas están suspendidas en el aire para tener la máxima circulación de aire, ya que si las plantas están sumergidas en la

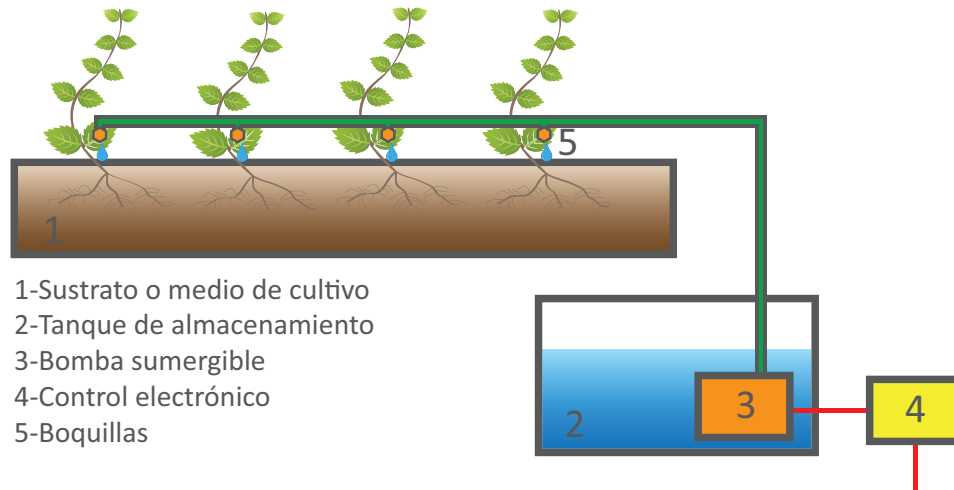


Figura 3.2: Riego por goteo

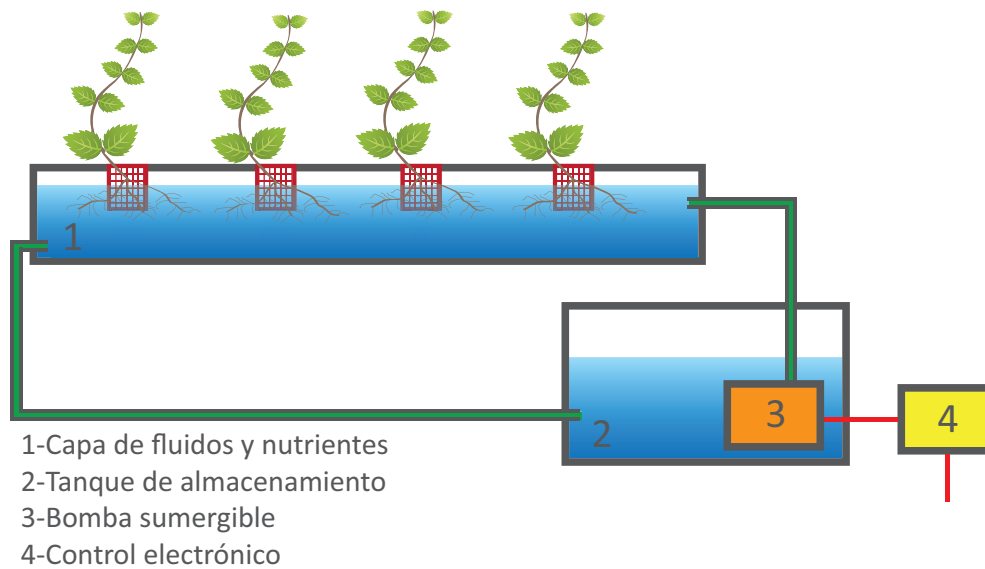


Figura 3.3: Hidroponía con riego subsuperficial

solución, las raíces agotan la cantidad de oxígeno presente en el fluido lo que causa un mal olor [Yung, 2003].

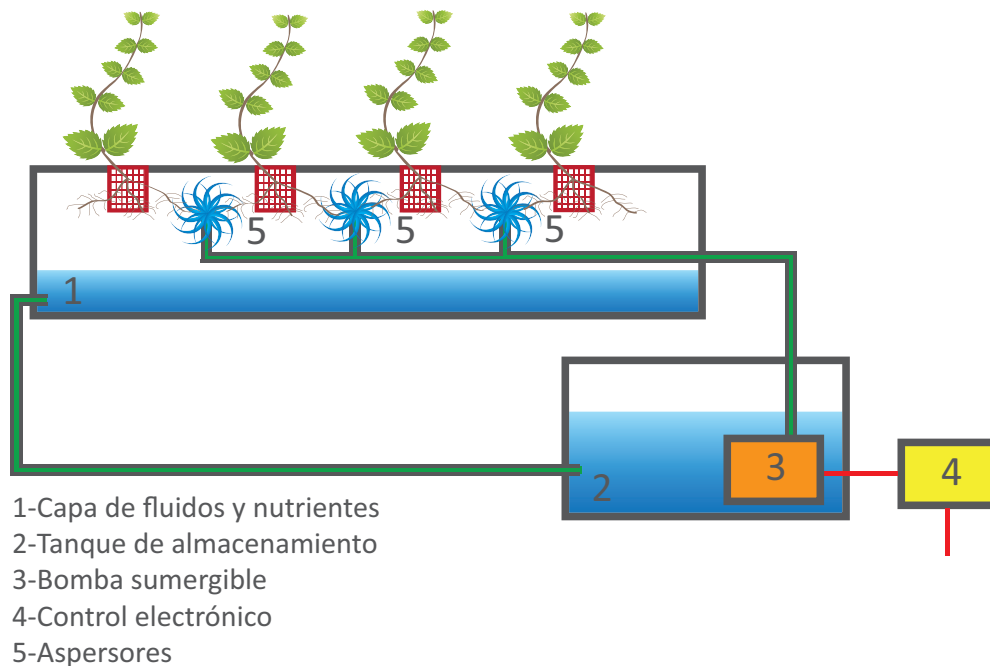


Figura 3.4: Aeroponía

4. **Dynaponic:** En este método es una modificación de la Aeroponía. Para este método de cultivo se colocan aspersores justo debajo de la superficie del agua para contraer la apertura de cada aspersor, esto fuerza al aire a salir a alta velocidad lo que genera un efecto spray que genera una capa de gotas en suspensión que irrigan las plantas.

3.5. Selección del método de cultivo para las estructuras verdes

Algunos aspectos importantes que hay que tener en cuenta cuando se selecciona el método de cultivo:

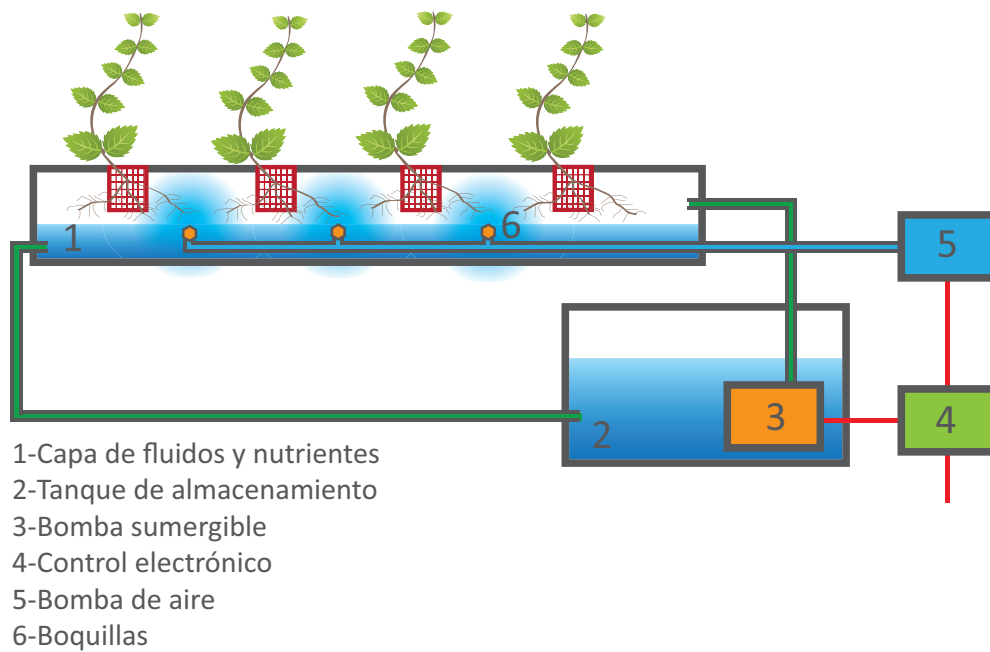


Figura 3.5: Dynaponic

1. **El peso:**
2. **Consumo energético:**
3. **Manejo del excedente de aguas grises:**
4. **El mantenimiento que requiera:**
5. **La temperatura:**
6. **El costo por metro:**
7. **La estética:**
8. **La durabilidad:**

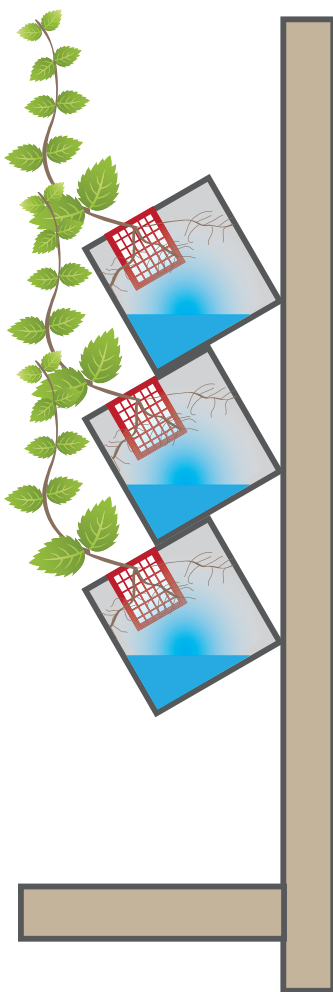


Figura 3.6: Estructura de un sistema Dynaponic

3.6. Programación del MSP430

3.7. Etapas de programación del MSP430

La programación del microprocesador Texas Instruments MSP430f2012 requiere de una serie de etapas[[Instruments, 2011](#)] que se describen a continuación:

1. **Edición del archivo fuente C:** Para programar el microprocesador se requiere de un editor de textos para crear un archivo fuente en lenguaje C, debe cumplir algunos requisitos que se establecen en los documentos: MSP430x2xx Family User's Guide de Texas Instruments y en la hoja de datos del MSP430f2012.
2. **Compilación archivo fuente C:** Esta etapa sirve para convertir el archivo fuente en lenguaje C, en un archivo que es interpretable por el microprocesador, para ello Texas Instruments recomienda diferentes entornos de desarrollo integrado [IDEs] según el sistema operativo:
 - a) **Windows®:** Existen dos entornos que contienen todo lo necesario para desarrollar un proyecto: [Code Composer Studio \(CCS\)](#), e [IAR Embedded Workbench Kickstart para MSP430](#)
 - b) **Linux y Mac OS X®:** Para compilar en sistemas operativos UNIX se necesita el compilador [GCC toolchain para los microprocesadores Texas Instruments MSP430](#) y un archivo en lenguaje script, llamado "Makefile" que contiene los parámetros que necesita el compilador. Para compilar un archivo fuente en lenguaje C, solo necesita abrir la Terminal y localizarse en la carpeta que contiene el archivo .C por medio del comando "**cd**" copiar en esa carpeta el archivo script, llamado "Makefile" y compilar este archivo con el comando "**make**", este comando va a crear un archivo *.elf*.
3. **Programador del Microprocesador:** En esta etapa se programa el archivo interpretable por el microprocesador y se programa en el microprocesador según sea el sistema operativo

- a) **Windows®**: Los dos entornos que sirven para programar también incluyen la herramienta para programar el microprocesador: **Code Composer Studio (CCS)**, e **IAR Embedded Workbench Kickstart para MSP430**
- b) **Linux y Mac OS X®**: Se necesita el programador y depurador **MSPDebug**, Para programar el microprocesador necesita abrir la Terminal y localizarse en la carpeta que contiene el archivo *.elf* por medio del comando **“cd”** y con el comando **sudo mspdebug rf2500 “prog main.elf”**
4. **Ejecutar**: Una vez programado el microprocesador, inicia a correr el programa que tiene almacenado en memoria.

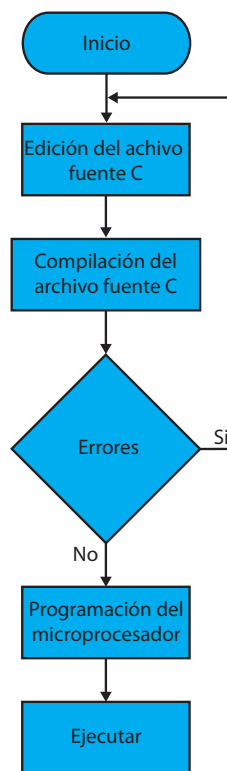


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la técnica de programación

Procedimiento Metodológico

El proceso solución conllevaría varias etapas para cumplir con los objetivos del proyecto para ello se han formulado los siguientes paquetes de trabajo:

Cuadro 4.1: Primer Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Identificación de parámetros	
<i>Objetivo:</i> Identificar los parámetros necesarios para generar un patrón de riego y suministro de nutrientes	
1-	Realizar investigaciones bibliográficas para explorar diversos documentos y artículos que la comunidad científica ha escrito con respecto a los temas de patrones de riego y suministro de nutrientes
2-	Formular entrevistas a profesionales y a expertos en asuntos referentes a patrones de riego

Cuadro 4.2: Segundo Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Sistema de distribución de fluidos	
<i>Objetivo:</i> Diseñar y construir un sistema de distribución de fluidos	
1-	Realizar investigaciones bibliográficas para explorar diversos documentos y artículos que la comunidad científica ha escrito con respecto a los sistemas de distribución de fluidos
2-	Hacer una lista de los diversos sistemas de distribución de fluidos
3-	Comparar las fortalezas y debilidades de cada uno de los sistemas de distribución de fluidos
4-	Diseñar el sistema de distribución de fluidos
5-	Producir una serie de experimentos que ayuden a caracterizar el sistema de distribución de fluidos

Cuadro 4.3: Tercer Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Sistema de Bombeo	
<i>Objetivo:</i> Diseñar el sistema de bombeo	
1-	Realizar un estudio de las necesidades de irrigación para determinar las especificaciones de consumo de potencia y de caudal requerido.
2-	Determinar el modelo de bomba de riego más adecuada

Cuadro 4.4: Cuarto Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Sistema de captación de energía	
<i>Objetivo:</i> Diseñar el sistema de captación y procesamiento de energía.	
1-	Determinar los requerimientos energéticos del sistema de riego.
2-	Realizar investigaciones bibliográficas para explorar diversas fuentes de energía que se tienen disponibles.
3-	Escoger la fuente de energía más adecuada.

Cuadro 4.5: Quinto Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Sistema de administración y control	
<i>Objetivo:</i> Diseñar el sistema de administración y control	
1-	Caracterizar los modos de operación del sistema de riego
2-	Listar todas las variables que determinan los patrones de riego
3-	Producir una serie de experimentos que permitan probar el sistema de control

Cuadro 4.6: Sexto Paquete de trabajo

<i>Paquete de trabajo:</i> Interfaz de usuario	
<i>Objetivo:</i> Diseñar la interfaz de usuario	
1-	Realizar el arte de la interfaz con base en las variables que se necesitan modificar
2-	Determinar la plataforma de desarrollo para realizar el diseño
3-	Producir una serie de experimentos que ayuden a probar la interfaz de usuario

Descripción detallada de la solución

5.1. Análisis de soluciones y selección final

5.1.1. Sistema de administración y control

El sistema de administración y control se encarga de generar una señal que controla el sistema de bombeo a partir de los parámetros que introduce el usuario. Se seleccionó la tarjeta de desarrollo Texas Instruments MSP430 launchpad, por se de bajo costo, y contar con los requerimientos, tales como: contadores de 16 bits, timers, un puerto de salida de 8 bits, diversas fuentes de reloj, y un sistema de programación de C que simplifica el diseño del software.

5.1.2. Sistema de Bombeo

Este sistema está conformado por un inversor controlado de tensión alterna y una bomba de aire. El inversor controlado se requiere para modificar la potencia que se le suministraba a la bomba de aire, y la bomba de aire genera un flujo de aire que se envía al sistema de distribución de fluidos. Existen diversas posibilidades para diseñar el inversor de corriente alterna, entre las que tenemos:

1. **Controlador CA con tiristores:** Este sistema utiliza un conjunto de señales que le permite a tiristores modificar el valor RMS de una señal de potencia que se aplica a una carga, este sistema presenta una serie de ventajas y desventajas.

Ventajas

- a) Fácil manejo del ancho de pulso igual a cero.

Desventajas

- a) Requiere de una señal alterna de potencia para operar
- b) La frecuencia del PWM está limitada al ancho de banda de los tiristores.
- c) Los tiristores requieren en algunos casos de circuito de apagado

2. **Inversor controlado de corriente directa a corriente alterna:** Este sistema utiliza un inversor monofásico para generar una señal de corriente alterna a partir de una señal de corriente directa, cuyo valor RMS puede ser modificado, el circuito se presenta en la figura:

Ventajas

- a) Opera a partir de una señal de corriente directa.
- b) Sistema aislado del ruido de la red eléctrica comercial.
- c) Se requieren pocos componentes.
- d) Gran ancho de banda.

Desventajas

- a) Complejas señales de control.
- b) Difícil manejo del ancho de pulso igual a cero.
- c) Ancho de banda limitado.

El proyecto está concebido para tener como fuente un panel solar o algún otro tipo de fuente de energía renovable, por lo que es necesario tener como origen una fuente de corriente directa, sumado a esto se tiene la necesidad de tener un ancho de banda mínimo de $48kHz$, de ahí se ha decidido utilizar el inversor controlado de corriente alterna para implementar el sistema de bombeo. Por otro lado se escogió la bomba de aire modelo Maxima-R de $4,5W$, por ser la bomba de aire para pecera en el mercado, con el fin de tener un amplio rango de potencia.

5.1.3. Sistema de distribución de fluidos

Este sistema se encarga de distribuir los fluidos y nutrientes a las plantas, se exploraron diversas posibilidades para cumplir con tal labor, entre las que encontramos:

1. **Goteo con bomba:** Es un sistema de distribución que fluidos utilizado en geonía e hidroponía, que utiliza un sistema de tuberías y una o más bombas de agua para suministrar y distribuir los fluidos almacenados a las plantas, tal y como se muestra en la imagen de la figura 3.2.

Ventajas

- a) Es fácil de construir.
- b) Fácil mantenimiento.
- c) El sistema de control se limita a la bomba de fluidos.

Desventajas

- a) Tiene problemas de mecánica de fluidos.
 - b) Requiere una bomba de fluidos que satisfaga las necesidades del sistema de distribución.
2. **Goteo por gravedad:** Es un sistema de distribución que fluidos utilizado en geonía e hidroponía, que utiliza un sistema de tuberías y una o más válvulas para suministrar y distribuir los fluidos almacenados a las plantas.

Ventajas

- a) Es fácil de construir.
- b) Fácil mantenimiento.
- c) Bajo consumo de potencia.
- d) El sistema de control se limita a las válvulas.

Desventajas

- a) La inversión inicial es costosa.
 - b) Tiene problemas de mecánica de fluidos.
 - c) Requiere que el tanque de almacenamiento este en la parte superior, lo que desemboca en un problema estético.
3. **Aspersión con agua:** Es un sistema de distribución que fluidos utilizado en aeroponía, que utiliza bombas de agua, tuberías y aspersores para generar un chorro de de nutrientes y fluidos que irriga las raíces de las plantas, como se muestra en la figura 3.4

Ventajas

- a) Fácil mantenimiento.
- b) El sistema de control se limita a la bomba de fluidos.

Desventajas

- a) La inversión inicial es costosa.
 - b) Requiere de una bomba de agua con potencia necesaria para generar el chorro.
 - c) El patrón de riego no es uniforme.
 - d) Requiere de un tanque de almacenamiento que le brinde sostén a las plantas y al sistema de distribución.
4. **Aspersión con aire:** Es un sistema de distribución que fluidos utilizado en dynaponics, que utiliza bombas de aire, tuberías y aspersores para generar un flujo de aire subsuperficial al nivel de los nutrientes que al cambiar al aire, cambian de presión y acorde con efecto Venturi aumenta su velocidad, generando una dispersión de los nutrientes que irriga las raíces de las plantas, como se muestra en la figura 3.5

Ventajas

- a) Fácil mantenimiento.
- b) Disminución de la temperatura de las raíces.

- c) Bajo consumo de potencia.
- d) El patrón de riego es uniforme.
- e) Oxigena los nutrientes, lo que previene la descomposición de los mismos!
- f) El sistema de control se limita a las bombas de aire.

Desventajas

- a) La inversión inicial es costosa.
- b) Diseño es complejo.
- c) Requiere de un tanque que le brinde sostén a las plantas y al sistema de distribución.

Con las descripciones anteriores, se decidió investigar el sistema de aspersión con aire porque presenta nuevas ventajas y porque los otros métodos ya han sido explorados e investigado.

5.2. Descripción del hardware

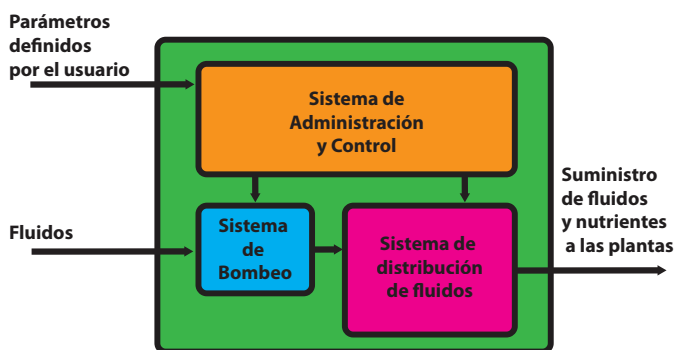


Figura 5.1: Diagrama de segundo nivel

Al detallar el diseño, el sistema prototipo de riego energéticamente autónomo está formado por tres subsistemas: El sistema de administración y control, el sistema de bombeo y el sistema de distribución de fluidos, (ver figura 1.3). El sistema de administración y control establece el modo de operación y los distintos patrones de riego, a partir de un conjunto de parámetros definidos por el usuario, este sistema genera una señal que suministra al sistema de bombeo que genera un flujo de aire que se distribuye por medio del sistema de distribución de fluidos.

Al detallar el diseño, el sistema prototipo de riego energéticamente autónomo está formado por tres subsistemas: El sistema de administración y control, el sistema de bombeo y el sistema de distribución de fluidos, (ver figura 1.3). El sistema de administración y control establece el modo de operación y los distintos patrones de riego, a partir de un conjunto de parámetros definidos por el usuario, este sistema genera una señal que suministra al sistema de bombeo que genera un flujo de aire que se distribuye por medio del sistema de distribución de fluidos.

5.2.1. Diseño del sistema de administración y control

El sistema de administración y control se encarga de generar una señal que administra el sistema de bombeo a partir de los parámetros que introduce el usuario, está conformado por la interfase con el usuario y el microprocesador, ver figura 5.2

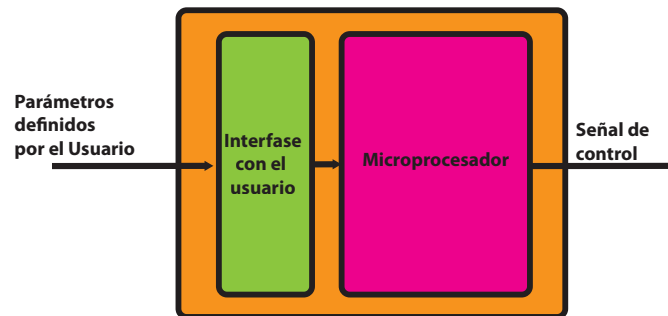


Figura 5.2: Diagrama del sistema de administración y control

5.2.1.1. Diseño de la interfase con el usuario

Es el medio que tiene el usuario para administrar el sistema, fue implementado por medio de un archivo *C* que luego el usuario compila y programa en el microprocesador, este archivo está conformado por una serie de variables que modifican el funcionamiento del microprocesador, entre los parámetros están:

1. **pwm_ajust_num.** Esta variable modifica la amplitud de salida de la señal de tensión alterna entre $0V_{RMS}$ y $120V_{RMS}$
2. **Time.** Representa la duración total de un periodo de trabajo del sistema de riego, varía entre $1s$ y $18horas - 12min$
3. **Duty.** Representa el ciclo de trabajo de un periodo de trabajo del sistema de riego, varía entre 0 y 10

Cuadro 5.1: Resumen de parámetros del sistema

Parámetro	Mínimo	Máximo
pwm_ajust_num	0	20
Time	1s	18 horas y 12 min
Duty	0	10

5.2.1.2. El microprocesador

Es el dispositivo que transforma los parámetros introducidos por el usuario en un archivo y genera una señal eléctrica interpretable por el sistema de bombeo, los parámetros de operación seleccionados para el MSP430f2012 se detallan en la tabla 5.2

Cuadro 5.2: Parámetros del MSP430f2012

Parámetro	Valor
Master clock	12 MHz
Frecuencia del PWM	24 kHz
Frecuencia moduladora	60 Hz

Los microprocesadores Texas Instruments®MSP430, son procesadores de bajo consumo de potencia y de una tensión de operación entre 1,8V y 3,6V, se pueden programar de dos modos: 4-wire JTAG connection (Utiliza los pines TEST, RST, P1.6 y P1.7) y 2-wire JTAG connection (Utiliza los pines TEST, RST), depende del modelo específico que se esté utilizando, el MSP430f2012 admite programarse en ambos modos. En nuestro caso al programar el microprocesador con la herramienta de programación para sistemas operativos UNIX “mspdebug” se utiliza el modo 2-wire JTAG connection. Las entradas son los puertos TEST, RST, y el puerto P1.3 que está conectado a un push-button que sirve para cambiar el modo de operación del micro del modo permanente al modo de riego por periodos. Las salidas son los puertos P1.2 y P1.6, que son las salidas del Timer_A2.TA1. Como se muestran en la figura 5.3, el software implementado para este microprocesador se explica y analiza en la sección 5.3. La figura 5.4 muestra las señales de salida del PWM, en los puertos P1.2 y P1.6.

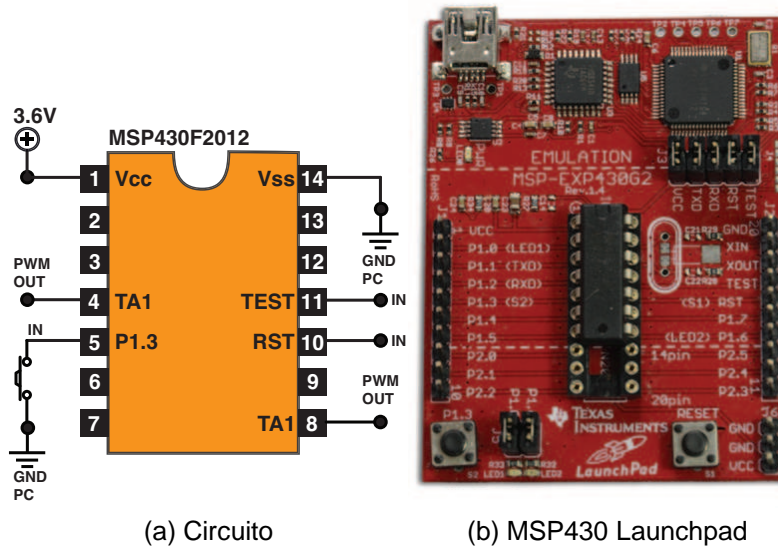


Figura 5.3: El microprocesador MSP430

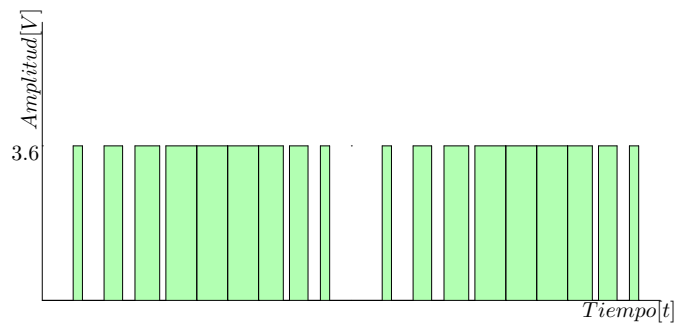


Figura 5.4: Señal de salida del PWM

5.2.2. Diseño del sistema de bombeo

Este sistema está conformado por inversor controlado de tensión alterna y una bomba de aire. Tiene como entradas la señal proveniente del sistema de administración y control y como salida tiene un patrón de flujo de aire que se conecta con el sistema de distribución de fluidos, tal y como se muestra en la figura: 5.5.

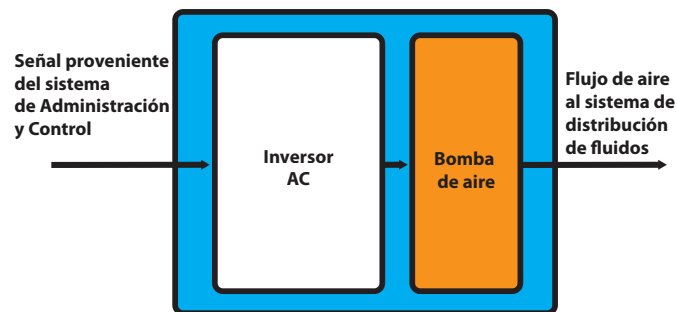


Figura 5.5: Diagrama del sistema de bombeo

5.2.2.1. El inversor controlado de corriente directa a corriente alterna

El inversor controlado de corriente directa a corriente alterna transforma una señal de una tensión continua de $12V$ en una señal alterna de amplitud variable entre: $0V_{RMS} - 120V_{RMS}$ según la señal proveniente del sistema de administración y control, este sistema genera una señal de potencia para una bomba de aire. Su parte estructural está conformada por un inversor de tensión continua. Está compuesto por cuatro etapas de procesamiento:

Etapas de acondicionamiento y aislación: Esta etapa está conformada por dos optoacopladores que se encargan de aislar la etapa de administración y control de la etapa de potencia, por razones de diseño uno de los optoacopladores debe operar como inversor, se utilizó el chip NTE3090, un optoacoplador con salida tipo Schmitt Trigger, por su ancho de banda de 1 MHz, y su rango de tensiones de operación $[3V - 16V]$. Cada uno de los optoacopladores recibe la señal de salida del PWM o señal de control proveniente del sistema

de administración y control con una tensión máxima de $3,6V$, uno de los optoacopladores la transforma en una señal igual a la señal de la entrada pero con una amplitud de $12V$ que se dirige a uno de los drivers como se muestra en la figura 5.7a) y el otro optoacoplador la transforma en una señal igual a la señal de la entrada con una amplitud de $12V$ pero desfasada 180° que se dirige al otro driver como lo muestra la figura 5.7b. La figura 5.6 muestra los circuitos de ambos optoacopladores.

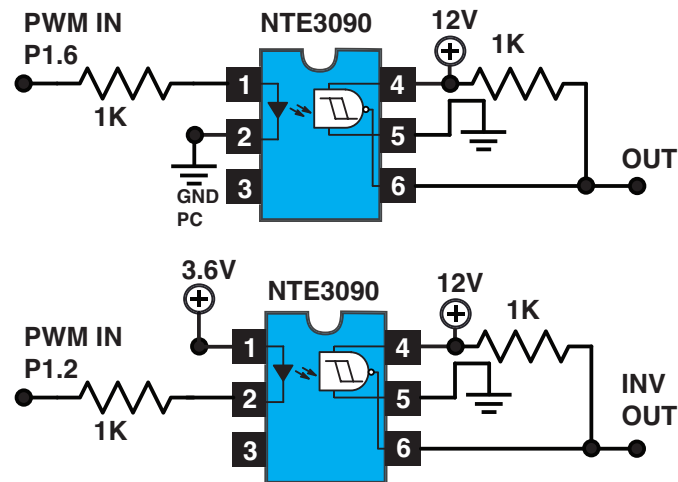


Figura 5.6: Etapa de acondicionamiento y aislación

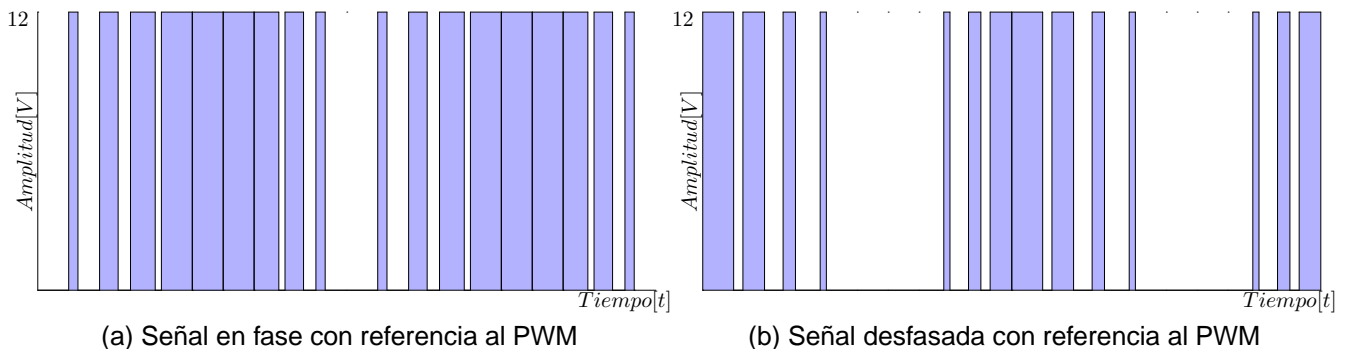


Figura 5.7: Señales de salida de los optoacopladores

Los drivers de los semipuentes: Esta etapa se encarga de administrar los dos semipuentes que conforman el puente H, se utilizó el chip IR21084, un driver de alta velocidad que asegura que los MOSFETs de un mismo semipuerto no conmuten simultáneamente, tiene como entradas la señal provenientes del optoacoplador y el retorno flotante de alimentación del lado alto del semipuerto [Vs] que sirve de referencia para el driver. Cada driver posee dos salidas: una salida con una señal igual a la señal de entrada [HO] (figura: 5.9a), y otra salida con una señal igual a la señal de entrada pero desfasada un poco más de 180° [LO] (figura: 5.9b), para tener un margen de seguridad en la operación de los MOSFETs.

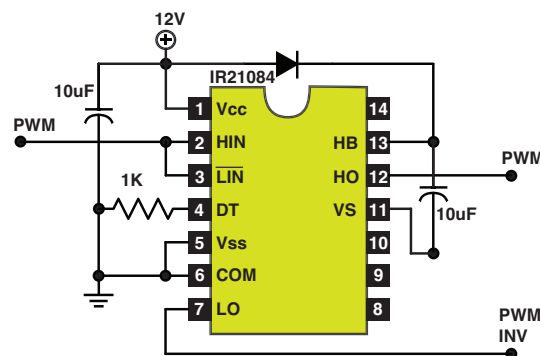


Figura 5.8: Los drivers de los semipuentes

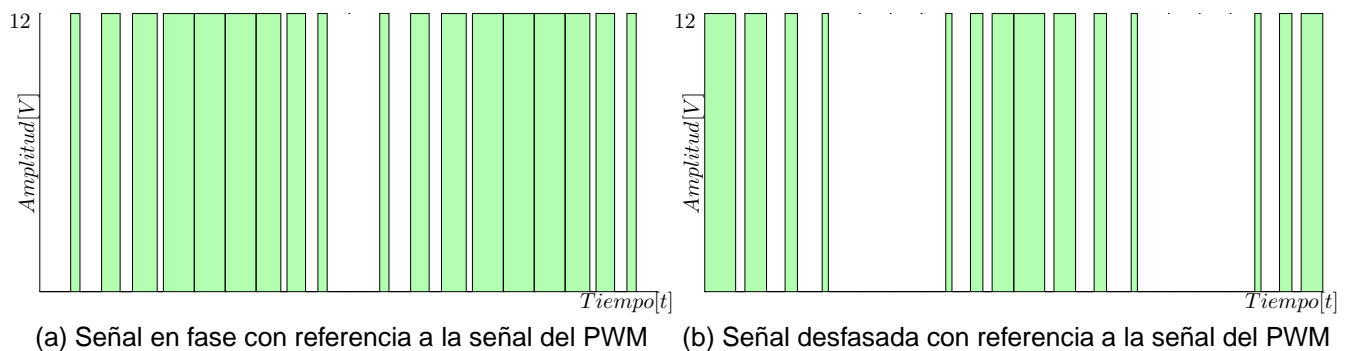


Figura 5.9: Señales de salida de los drivers

El puente en H: Es una configuración de MOSFETs que le permite a la carga operar en los cuatro cuadrantes (PWM entre -1 y 1), creando de este modo el semiciclo negativo de la señal de tensión alterna. El puente recibe cuatro señales de entrada, una señal para cada uno de los MOSFETs, un par de estas señales está en fase con el PWM y el otro par está en desfase. Por otro lado el puente H tiene dos salidas que se conectan al transformador.

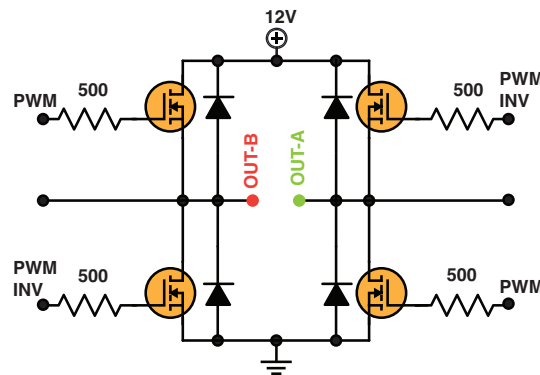


Figura 5.10: Puente H

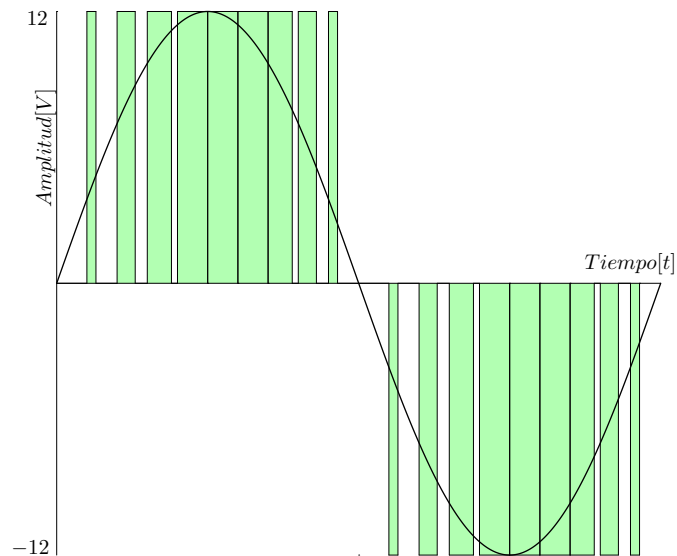


Figura 5.11: Señal de salida del puente en H

El filtro Se utilizó un transformador abierto de 12V a 240V, este dispositivo recibe la señal del PWM que sale del puente en H y que varía entre $+6V$ a $-6V$ y realiza dos funciones primero la eleva la señal de $6V_{RMS}$ a $120V_{RMS}$ y segundo se desempeña como filtro pasa bajos junto con un capacitor de $0,3\mu F$ que está conectado a la salida del transformador, que elimina la señal moduladora de $24kHz$ y otras espúreas, dando como resultado una señal de $60Hz$, con una amplitud de $120V$

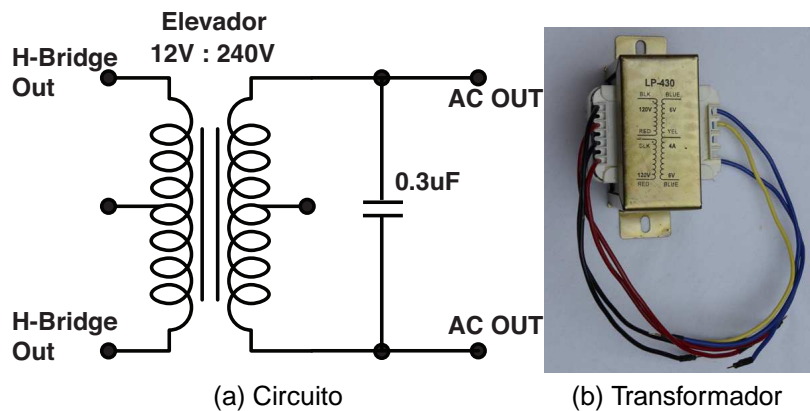


Figura 5.12: Filtro de salida

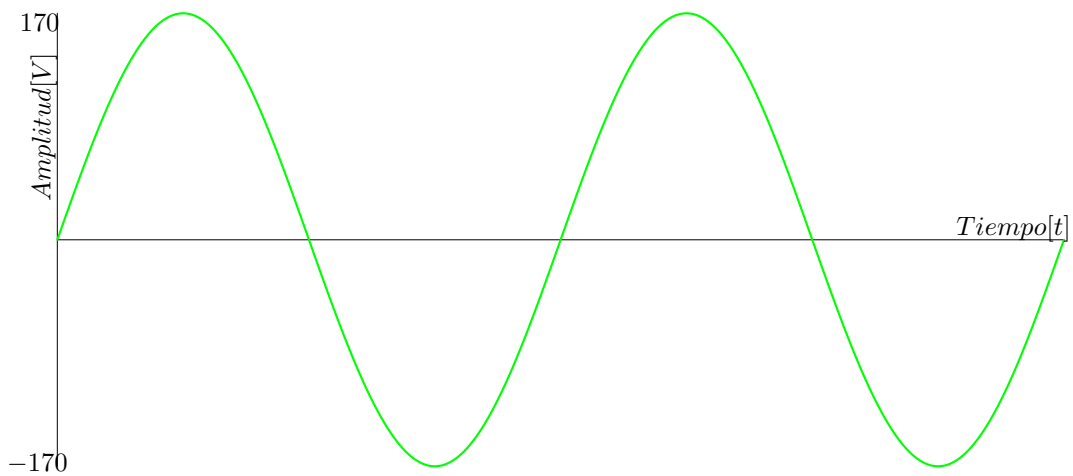


Figura 5.13: Señal de salida del filtro

5.2.2.2. Bomba de aire

La bomba de aire transforma la señal alterna proveniente del controlador CA en un flujo de aire. Se optó por al bomba de aire para pecera de *30gal* modelo Maxima-R de *4,5W* tal y como lo muestra la figura 5.14



Figura 5.14: Bomba de aire

5.2.3. Diseño del sistema de distribución de fluidos

5.2.3.1. Componentes requeridos

Este sistema prototipo del sistema de distribución de fluidos está conformado por el sistema de aspersión con aire, como se muestra en la figura: 5.17 . Este sistema recibe un patrón de flujo de aire del sistema de bombeo y crea una dispersión en las raíces de las plantas, para su diseño se requirió los componentes listados en la tabla: 5.3

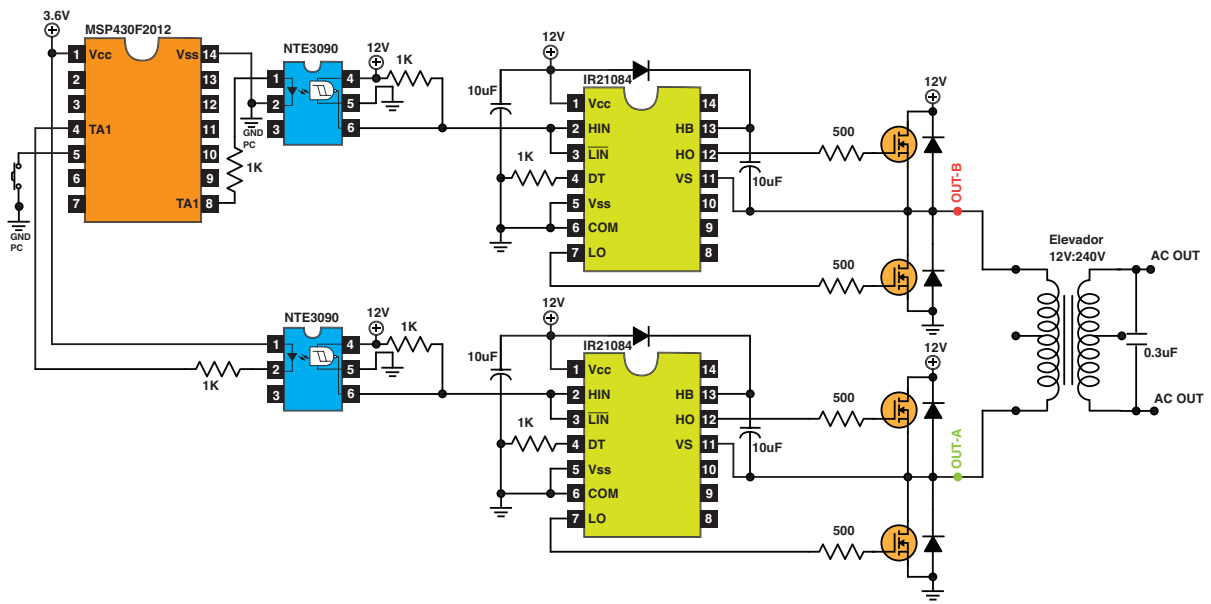


Figura 5.15: Circuito completo

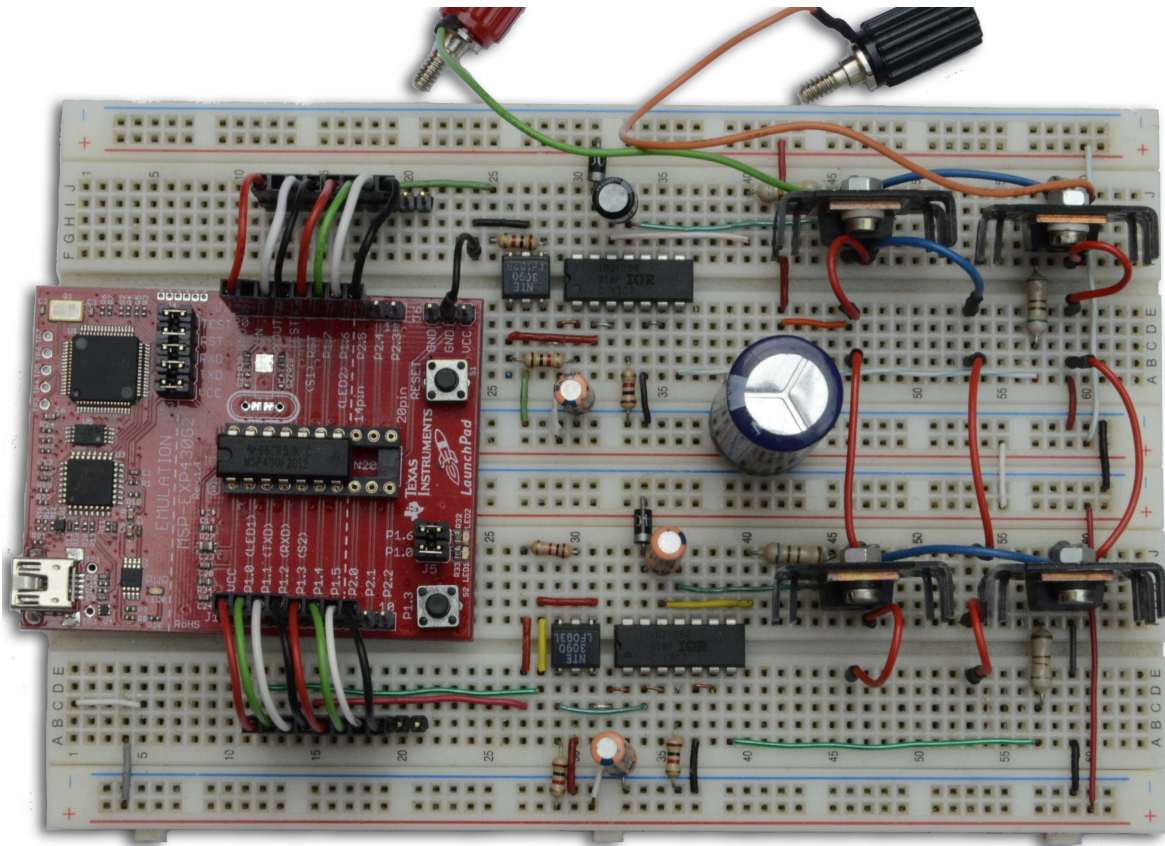


Figura 5.16: Foto del circuito

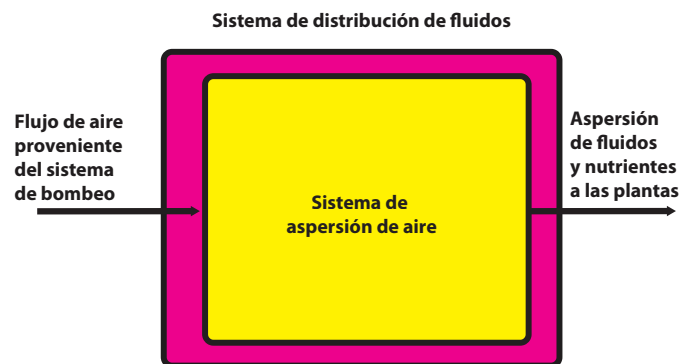


Figura 5.17: Diagrama del sistema de distribución de fluidos

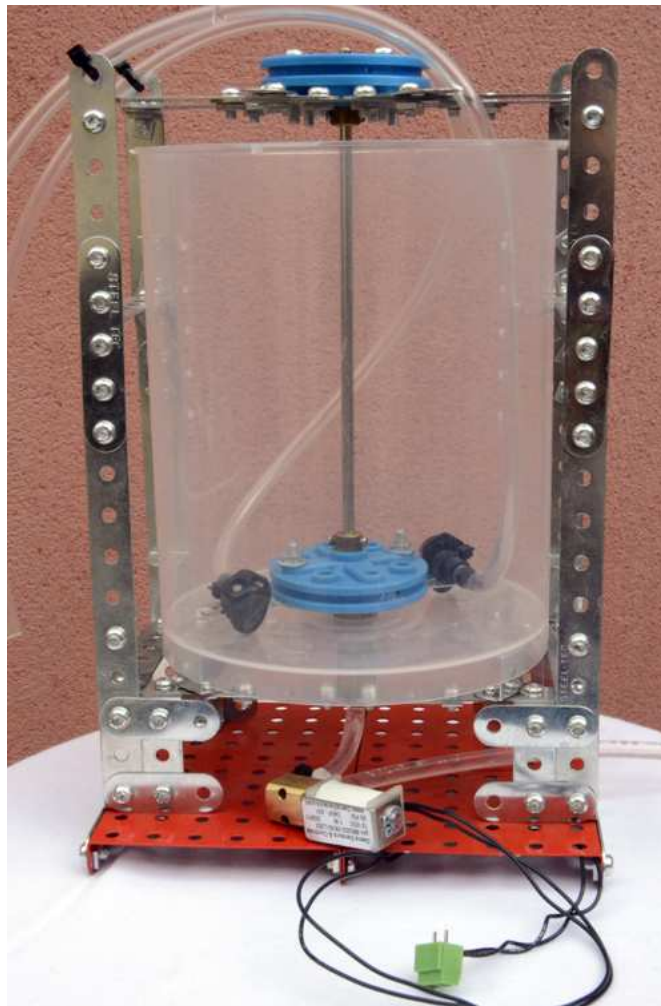


Figura 5.18: Sistema prototipo de riego

Cuadro 5.3: Componentes del prototipo de distribución de fluidos

Componente
1- Dos recipientes para CDs
2- Una caja de Steel Tecs
3- Una bomba de aire de 4.5W
4- Una bomba de agua de 5W
5- Un metro de manguera plástica de 1/8"
6- Un metro de manguera plástica de 1/4"
7- Dos aspersores
8- Una válvula de 12V
9- Un fitting para unión de cobre

5.2.3.2. Metodología de construcción

1. Se debe perforar un orificio en la parte inferior del recipiente para CDs.
2. Utilizar el fitting para unir un segmento de 15cm de manguera de 1/8" al recipiente para CDs.
3. Armar con los Steel Tecs, una estructura metálica que sirva para estabilizar el recipiente para CDs, y para fijar los aspersores dentro del recipiente.
4. Montar los aspersores con 25 cm de manguera de 1/8" en la estructura correspondiente.
5. Fijar la válvula en el extremo opuesto de la manguera que está unida al recipiente para CDs.

5.3. Descripción del software

Para la administración del sistema de riego se desarrollo un programa que carga en el microprocesador Texas Instruments MSP430f2012, que tiene como el control CA del inversor.

5.3.1. Principio de funcionamiento

Se requiere de un PWM que varíe su ciclo de trabajo acorde con un vector preestablecido con una forma senoidal, el programa debe tener dos modos de operación:

1. **Modo continuo:** Es el modo por defecto de operación del microprocesador, este genera el PWM dinámico permanentemente cada vez que existe la interrupción de RESET.
2. **Modo discontinuo:** Es el modo operación donde el microprocesador opera por “Periodo del ciclo de riego” (T_r) donde genera el PWM dinámico por periodos de tiempo denominado “intervalo de riego” (τ) con tiempos de inactividad denominados “Intervalo de espera” (I_n) cada vez que se oprime el boton del puerto P1.3.

5.3.2. Estructura del programa

El programa está estructurado en las siguientes secciones: definición de variables, inicialización del microprocesador, Rutina de atención de botón y definición de interrupciones, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 5.19

5.3.2.1. Definición de Variables

Esta subsección del programa define las variables que representan los parámetros que controlan el sistema de riego e e incluye archivos con definiciones requeridas en la ejecución del programa, entre las variables encontramos:

1. **curve[n]:** Es un vector de 400 elementos, contiene la evaluación de la ecuación de $n = 0 \rightarrow n = 399$ de la ecuación 5.1, este vector va a definir la forma de la señal moduladora, que en ultima instancia da brinda la forma senoidal al PWM del Timer.

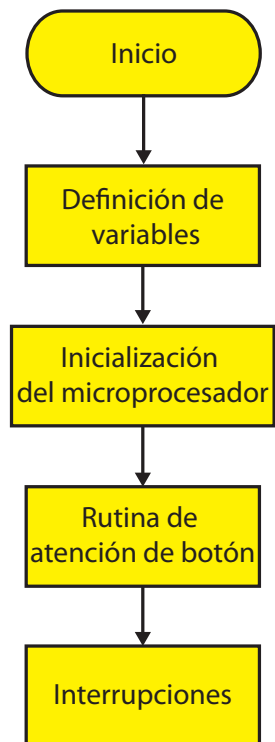


Figura 5.19: Diagrama de flujo del programa

$$curve(n) = 238 \sin\left(\frac{2\pi n}{400}\right) + 238 \quad (5.1)$$

2. **pwm_ajust_num:** Esta variable modifica la amplitud de salida de la señal de tensión alterna entre $0V_{RMS}$ y $120V_{RMS}$ acorde con un rango que varía entre 0 y 20
3. **Time:** Representa la duración total del “Periodo del ciclo de riego” (T_r), varía entre 1s y 18horas – 12min
4. **Duty:** Representa el ciclo de trabajo de un periodo de trabajo D del sistema de riego, varía entre 0 y 10

5.3.2.2. Inicialización del microprocesador

Incluye todos los comandos requeridos para inicializar el microprocesador, la figura 5.20a describe las rutinas que se deben cumplir.

1. **Detener el watchdog:** Se detiene el watchdog para evitar que este medio de seguridad reinicie el sistema en algún momento dado de la ejecución del programa.
2. **Configuración del clock:** Se configura los registros que controla el clock para que este trabaje a 12 MHz.
3. **Configuración de puertos:** Se configura los registros de los puertos con el fin de asignar a las salidas P1.2 y P1.6 el Timer_A2.TA1 y en el puerto P1.3 como entrada para el botón que llama una interrupción que controla el modo de riego.
4. **Configuración del Timer_A:** Se configura el clock que sirve de fuente para el Timer_A, luego el registro que controla el Timer_A para cuente ascendentemente hasta un valor denominado TACCR1, después se configura el tipo de PWM que se requiere, y se habilita una interrupción cada vez que el contador llega a TACCR1.
5. **Habilitación de interrupciones:** Se habilita las interrupciones y se debe configurar el registro que controla la operación del microprocesador para que entre en reposo mientras atiende una interrupción, con el fin de ahorrar energía.

5.3.2.3. Rutina de atención de botón

Detalla las operaciones de debe llevar a cabo el microprocesador cuando se origina una interrupción en el Puerto 1, tal y como lo muestra la figura 5.21b. El principio de esta rutina es crear el modo de operación discontinuo del sistema de riego.

5.3.2.4. Interrupciones

Establece los procedimientos que debe cumplir el microprocesador cada vez que existe cierto tipo de interrupción. El programa tiene dos interrupciones que atender, la interrupción generada por el Timer_A cuando el contador llega a TACCR1, y la interrupción que surge cuando el usuario presiona el botón, los diagramas de flujo se muestran en la figura 5.21

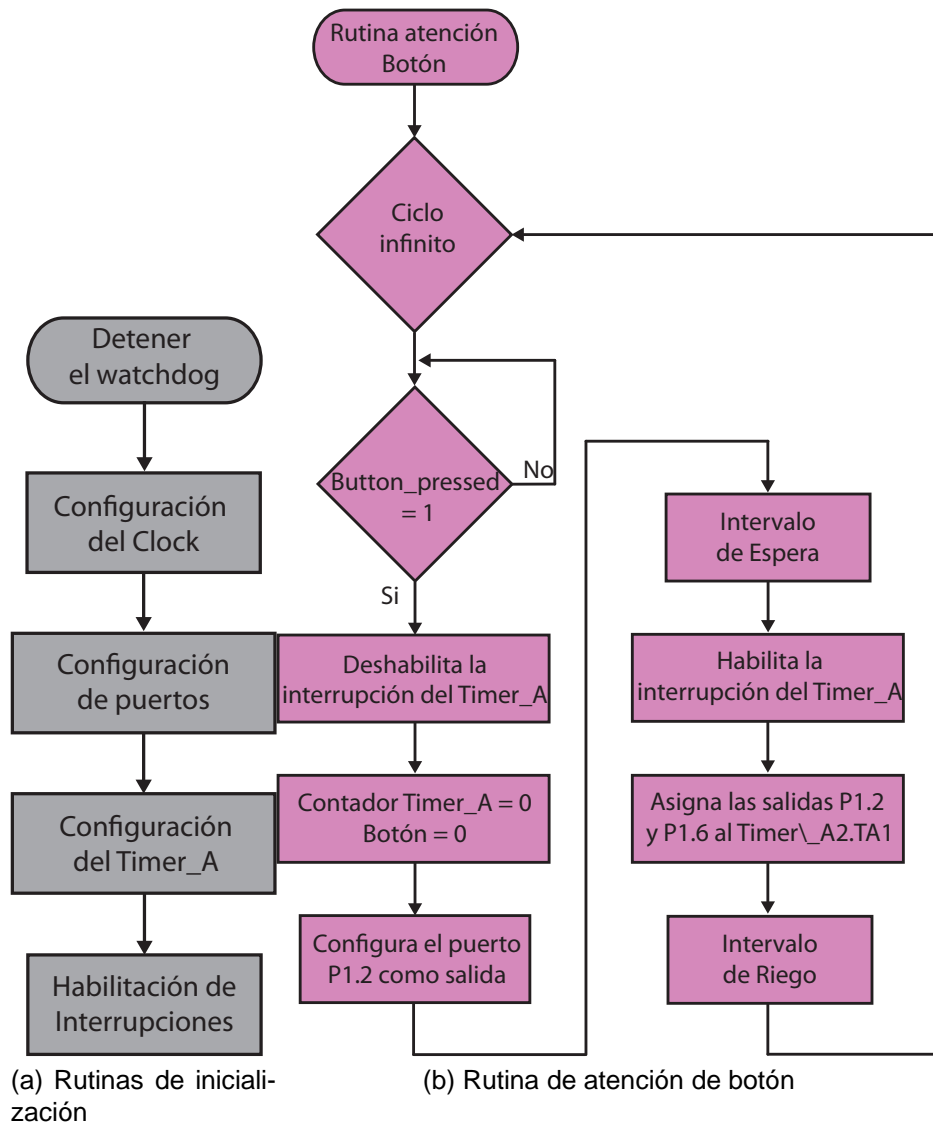


Figura 5.20: Diagramas de flujo

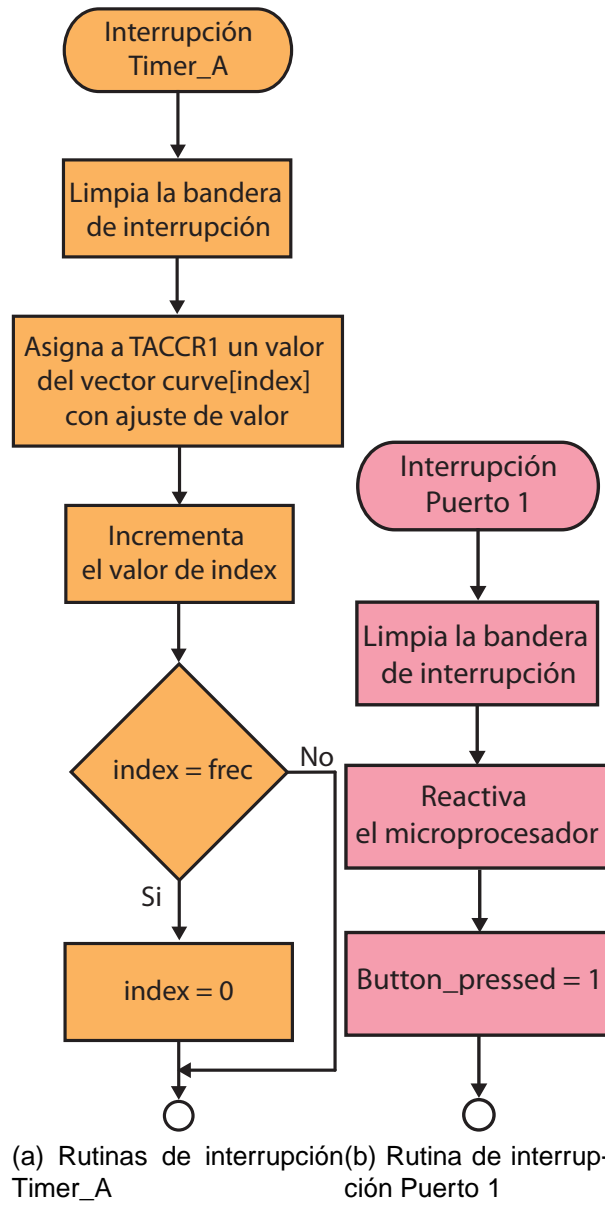


Figura 5.21: Diagramas de flujo de las interrupciones

Análisis de resultados

6.1. Resultados

El diseño y el desarrollo del proyecto se fundamenta en los resultados de diversos experimentos y mediciones que caracterizan el comportamiento de los diversos sub-sistemas.

6.1.1. Profundidad de los aspersores

Uno de los aspectos críticos en la operación del sistema prototipo que utiliza el método de riego “Dynaponics” es la profundidad de los aspersores, ya que esta determina el alcance máximo y la cantidad de gotas que se crean con la dispersión. Para este experimento se hizo operar el sistema de riego por $1min$, con un PWM de 20 ($CA_{out} = 120V$), el sistema de riego en modo continuo y se ubicó una lámina de papel sensible al agua a $15cm$ de altura para que las gotas dejaran una impresión que pudiese ser cuantificada.

Cuadro 6.1: Datos experimentales de la profundidad óptima de los aspersores

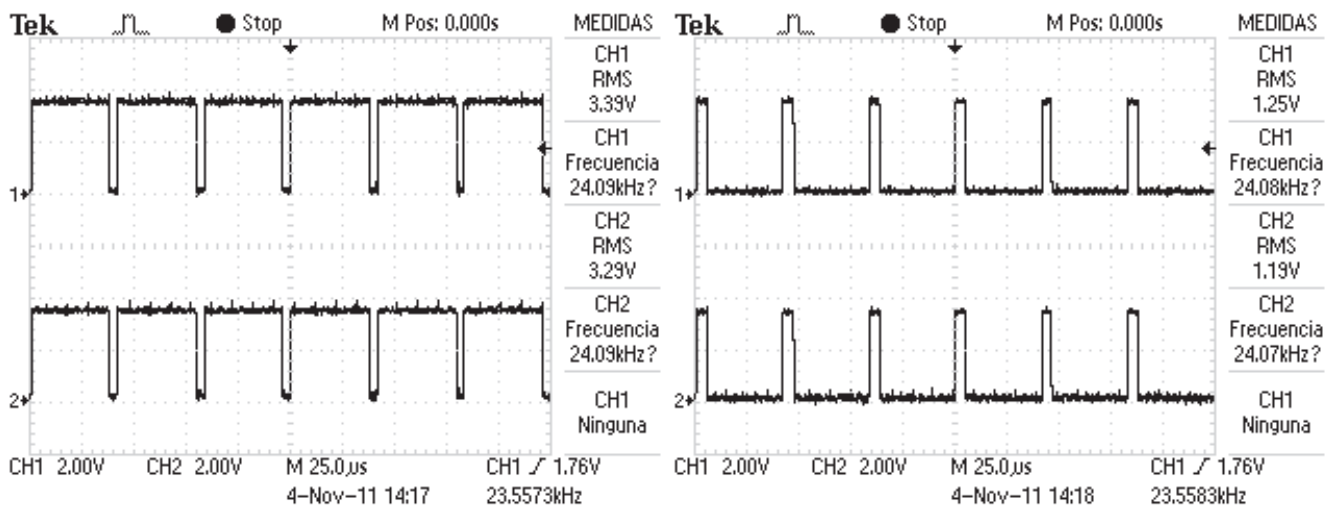
Profundidad [mm]	Cantidad de gotas
5	66
4	118
3	134
2	250
1	99

6.1.2. Señales en el inversor controlado de CD a CA

Con el fin de verificar el funcionamiento del inversor se capturaron las señales en diversos puntos del circuito, bajo las condiciones que se listan en la tabla 6.2. En cada punto se obtuvo una imagen de la señal con el sistema de riego operando en modo continuo y con el sistema de riego operando en modo discontinuo.

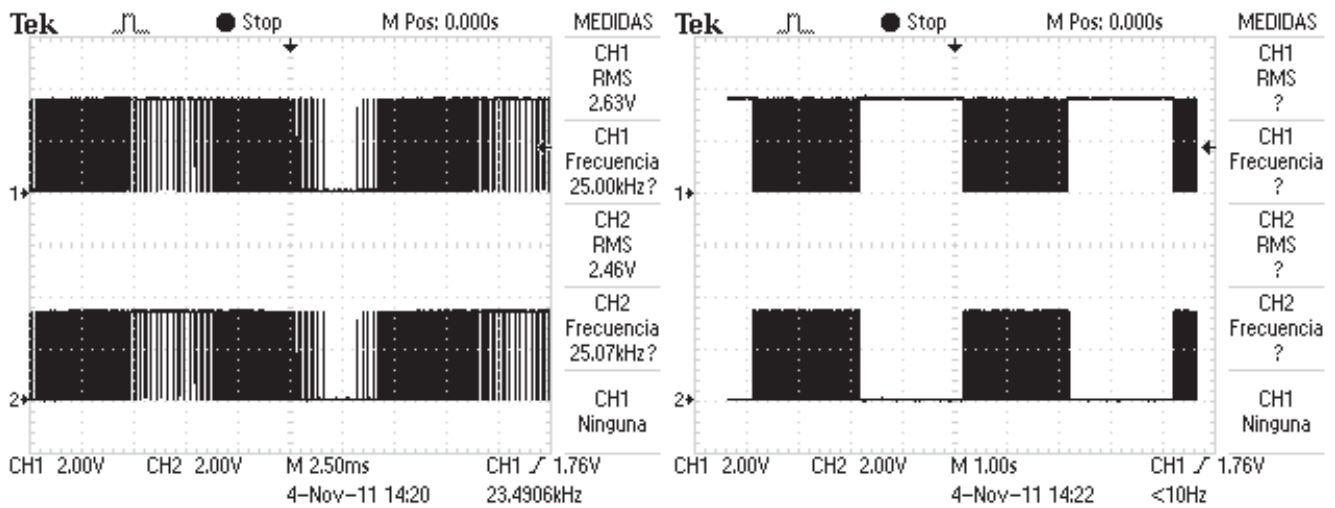
Cuadro 6.2: Condiciones de operación

Parámetro	Valor	Nota
pwm_ajust_num	20	Con el fin de que la amplitud de la tensión alterna de salida fuera de 120V
Time	2s	Periodo de riego
Duty	5	Un ciclo de trabajo de 50 %



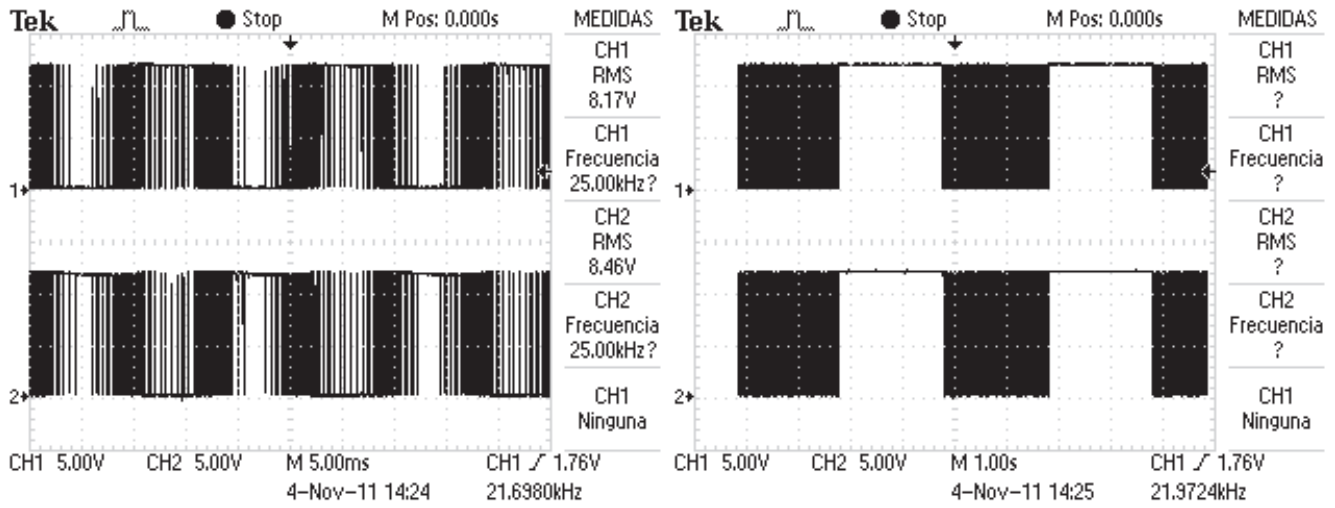
(a) Señal de salida del microprocesador en modo continuo con un PWM del 95 %
 (b) Señal de salida del microprocesador en modo continuo con un PWM del 35 %

Figura 6.1: Señales de salida del microprocesador con diferentes PWM



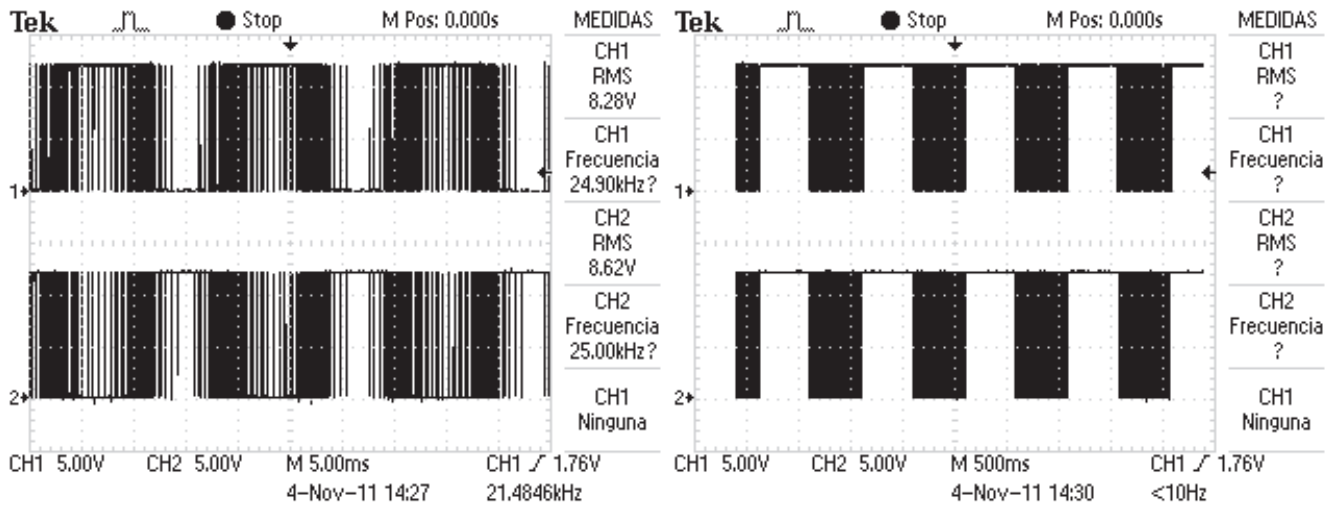
(a) Señal de salida del microprocesador en modo continuo (b) Señal de salida del microprocesador en modo discontinuo

Figura 6.2: Señales de salida del microprocesador



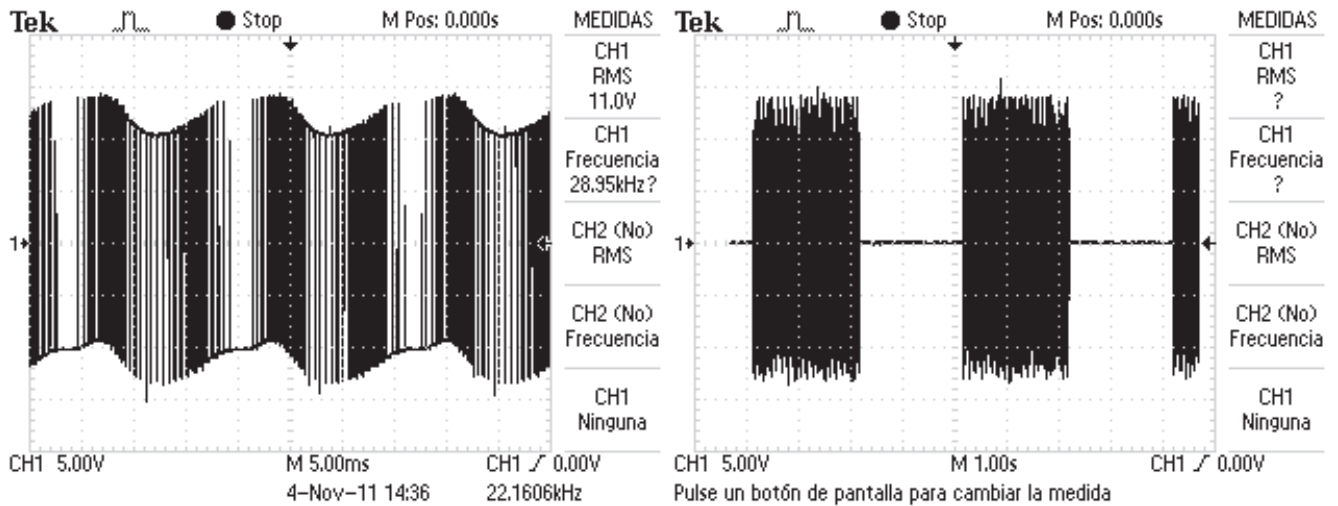
(a) Señales de salida de los optoacopladores en modo continuo (b) Señales de salida de los optoacopladores en modo discontinuo

Figura 6.3: Señales de salida de los optoacopladores



(a) Señales de salida de los drivers en modo continuo (b) Señales de salida de los drivers en modo discontinuo

Figura 6.4: Señales de salida de uno de los drivers



(a) Señal de salida del puente H en modo continuo (b) Señal de salida del puente H en modo discontinuo

Figura 6.5: Señales de salida del puente H

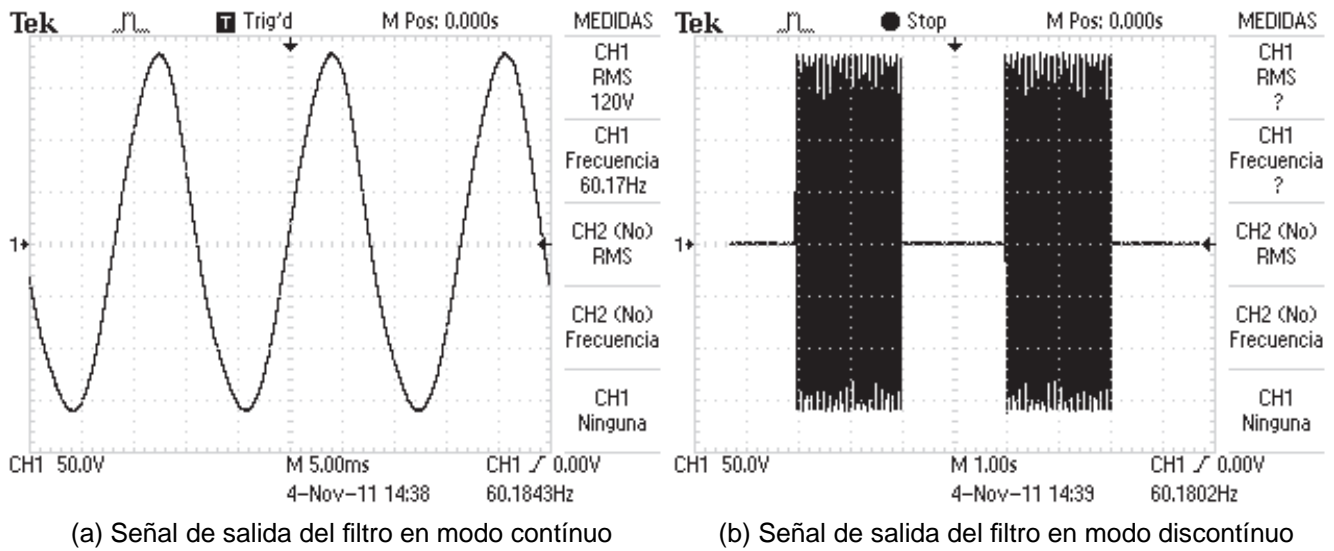


Figura 6.6: Señales de salida del filtro de salida

6.1.3. Eficiencia del inversor en modo continuo

Para determinar la eficiencia del inversor tensión alterna, se utilizó como carga la bomba de aire, y se varió el PWM para obtener diferentes niveles de tensión alterna a la salida

Cuadro 6.3: Datos experimentales de la eficiencia del inversor en modo continuo

PWM	V_{out} [V]	I_{out} [mA]	P_{out} [W]	V_{in} [V]	I_{in} [A]	P_{in} [W]	P_{out}/P_{in}
1	120	46.6	5.59	12	0.582	6.98	0.80
0.95	110	42.5	4.68	12	0.643	7.72	0.61
0.90	100	39.85	3.99	12	0.705	8.46	0.47
0.85	91	34.89	3.17	12	0.780	9.36	0.34
0.80	82.7	31.02	2.57	12	0.984	11.81	0.22
0.75	73.5	26.77	1.97	12	1.082	12.98	0.15

6.2. Análisis

6.2.1. Profundidad de los aspersores

De los diferentes métodos de cultivo se optó por investigar la tecnología denominada “Dy-naponic”, de ahí que fuese fundamental verificar su principio básico de funcionamiento, que el flujo de aire tuviese la fuerza para crear una capa gotas en suspensión que pudiesen irrigar las raíces de las plantas, El experimento descrito en la sección 6.1.1 permite corroborar que el sistema prototipo de riego puede suplir los fluidos a las raíces de las plantas a una altura de 15cm , sin embargo en un montaje real que permita utilizar esta tecnología, las plantas deberían ir ubicadas a unos 5cm de altura a partir del nivel de los nutrientes, lo que permitiría disminuir la potencia requerida por la bomba de aire para crear la dispersión de gotas requerida por las plantas por medio del controlador de tensión alterna.

6.2.2. Señales en el inversor controlado de CD a CA

El sistema electrónico que administra el sistema de riego es el inversor controlado de CD a CA, razón por la que su funcionamiento debe ser verificado en cada una de sus etapas, para ello se formuló el proceso de medición descrito en la sección 6.1.2.

La figura 6.1 nos brinda la posibilidad de verificar los parámetros de funcionamiento programados al microprocesador: la frecuencia del PWM de 24kHz , y como este puede variar el valor RMS de las señales de salida del microprocesador, lo que finalmente va a permitir controlar la amplitud de la señal de tensión alterna del controlador, por otro lado la figura 6.2a, muestra las señales de salida del microprocesador con el sistema de riego operando en modo continuo, nos permite verificar la forma senoidal (60Hz), de la señal de salida del PWM, la figura 6.2b, muestra las señales de salida del microprocesador con el sistema de riego operando en modo discontinuo, nos permite comprobar que el microprocesador opere con las condiciones programadas de la tabla 6.2 y como cada una de las señales adquiere un valor distinto en los tiempos de inactividad del sistema de riego denominados “Intervalo de espera” (I_n).

La figura 6.3a, muestra las señales de salida de los optoacopladores con el sistema de

riego operando en modo continuo, nos permite verificar la amplitud que adquiere la señal del PWM con en esta etapa, y como una de las señales se desfasa 180° , la figura 6.3b, muestra las señales de salida de los optoacopladores con el sistema de riego operando en modo discontinuo, nos permite comprobar como cada una de las señales adquiere una misma magnitud durante los tiempos de inactividad del sistema de riego denominados “Intervalo de espera” (I_n).

La figura 6.4a, muestra las señales de salida de uno de los drivers de los semipunte, con el sistema de riego operando en modo continuo, nos permite verificar el pequeño desfase que genera esta etapa, con el fin de tener un tiempo muerto de sirve de seguridad de que los MOSFETs de un mismo semipunte no estén en conducción un un mismo instante de tiempo, la figura 6.4b, muestra las señales de salida de uno de los drivers de los semipunte, con el sistema de riego operando en modo discontinuo, nos permite comprobar como cada una de las señales adquiere una misma magnitud durante los tiempos de inactividad del sistema de riego denominados “Intervalo de espera” (I_n).

La figura 6.5a, muestra la señal de salida del puente H, con el sistema de riego operando en modo continuo, nos permite verificar como el puente permite que durante el semiciclo negativo de la señal senoidal programada en el microprocesador el PWM adquiera un valores que varían entre $[-1$ y $0]$ y como esta señal se modula con la señal del PWM de $24kHz$, de conforme se carga la salida del puente H por la carencia de una etapa de control, la figura 6.5b, muestra la señal de salida de salida del puente H, con el sistema de riego operando en modo discontinuo, nos permite comprobar que el sistema de riego opera con las condiciones programadas de la tabla 6.2.

Finalmente la figura 6.6a, muestra la señal de salida del filtro de salida del controlador de tensión alterna, con el sistema de riego operando en modo continuo, nos permite verificar el transformador amplifica la señal a $120V$ y la filtra para darle la forma senoidal que requiere la bomba de aire, y como el capacitor de $0,3\mu F$ filtra la señal del PWM de $24kHz$, la figura 6.6b, muestra la señal de salida del filtro de salida del controlador de tensión alterna, con el sistema de riego operando en modo discontinuo, nos permite comprobar que el sistema de riego opera

con las condiciones programadas de la tabla 6.2.

6.2.3. Eficiencia del inversor en modo continuo

Un parámetro que determina la viabilidad de un sistema electrónico para hacerlo de uso cotidiano es contar con una alta eficiencia, de ahí que se requiera analizar la eficiencia del controlador para diferentes valores de PWM, al observar los datos obtenidos en la tabla 6.3, se hace notar como el sistema disminuye su eficiencia al disminuir el PWM, esto se debe al uso de un transformador abierto con núcleo laminado, ya que este tipo de transformador presenta inconvenientes con las pérdidas en su núcleo.

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

1. El sistema prototipo de riego requiere de un nivel de amplitud de la señal de salida de tensión alterna, un periodo del ciclo de riego y de ciclo de trabajo de un periodo del ciclo de riego.
2. El sistema de distribución de fluidos tiene la capacidad de generar una dispersión de 250 gotas a una lámina de papel a $15cm$ de altura con los aspersores a $2mm$ de profundidad.
3. El PWM del Timer_A opera a una frecuencia de $24kHz$ y por medio de un vector que lo modula a una frecuencia de $60Hz$ para generar la señal senoidal.
4. Un uso de un transformador abierto con núcleo laminado genera que el controlador de tensión alterna pierda eficiencia conforme aumenta la demanda la carga.
5. El "Periodo del ciclo de riego" (T_r), puede variar entre $1s$ y $18horas - 12min$, con un ciclo de trabajo que varía entre 0 y 10

7.2. Recomendaciones

1. Integrar un flyback al diseño del sistema de riego para evitar el uso de un transformador abierto con núcleo laminado, ya que este tipo de transformador presenta inconvenientes con las pérdidas en su núcleo y su peso, lo que ayudaría a hacer el inversor más eficiente.
2. Estudiar la posibilidad de formular un proyecto que diseñe un sistema de cuantificación de beneficios de las estructuras verdes aplicadas a la arquitectura moderna.
3. Estudiar la posibilidad de formular un proyecto junto con la Escuela de Ingeniería Agrícola, que estudie la posibilidad de utilizar la tecnología de riego “Dynaponics” como un método eficiente de cultivo.
4. Formular un proyecto que adicione al controlador de tensión alterna con un inversor, una etapa de control en lazo cerrado para evitar las deformaciones al incrementar la demanda de potencia.
5. Formular un proyecto que adicione una interfaz gráfica independiente al computador que permita al usuario la administración del sistema de riego.

CAPÍTULO 8

Anexos

Bibliografía

Jose Luis Barbado. *Hidroponía*. Editorial Albatros, Argentina, 2005. URL <http://books.google.co.cr/books?id=aa4A0GakMRsC>. (Citado en la página. 12.)

Texas Instruments, November 2011. URL http://processors.wiki.ti.com/index.php/MSP430_LaunchPa
(Citado en la página. 18.)

Ken Chien Yung. Invention paves way for cheaper vegetables, 2003. URL http://www.wlass.user.icpnet.pl/AIR_dynaponics.html. (Citado en la página. 15.)