

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Diseño e Implementación de un Sistema de
Calentamiento y Ahorro de Agua en Domicilios
Propuesta Tecnológica**

Diego Andrés Vizcaíno Moya

Ingeniería Electrónica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 18 de mayo de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Diseño e Implementación de un Sistema de Calentamiento y Ahorro de
Agua en Domicilios**

Diego Andrés Vizcaíno Moya

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Alberto Sánchez, PhD.

Firma del profesor

Quito, 18 de mayo de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Diego Andrés Vizcaíno Moya

Código:

00111230

Cédula de Identidad:

172062319-6

Lugar y fecha:

Quito, mayo de 2017

RESUMEN

El presente proyecto propone un sistema de calentamiento y ahorro de agua en domicilios para minimizar el consumo de energía eléctrica y agua. Se implementa un controlador de voltaje AC monofásico con carga resistiva de 3000 (W) como sistema para calentar el agua controlado por el micro controlador ATMEGA 328. Asimismo, se efectúa un lazo de control PID para una correcta regulación de la temperatura del agua. Para poder minimizar el consumo de agua y energía eléctrica durante la ducha se diseñó un sistema automático de detección de presencia del usuario. Este sistema permite el cierre del paso de agua cuando un individuo no requiere de una caída de la misma. Se obtuvo un prototipo de ducha inteligente con una alta eficiencia energética para calentar y fomentar al usuario el ahorro de consumo de agua. Se redujo el tiempo de respuesta del prototipo gracias a la acción de control PID minimizando aún más el desperdicio de agua.

Palabras clave: prototipo de ducha inteligente, controlador de voltaje AC, controlador PID, diseño, implementación, eficiencia energética, ahorro consumo agua y energía eléctrica.

ABSTRACT

This project presents a system for saving water consumption and energy in residences. An AC-AC converter was implemented to deliver energy to a 3000 W resistive load to heat water. Water temperature is controlled using a PID algorithm implemented in ATMEGA microcontroller. Water consumption can be minimized by detecting effectively when the user is having a bath using a presence sensor. If no one is under the shower then the system closes the water supply.

Key words: intelligent shower prototype, AC voltage controller, PID controller, design, implementation, energy efficiency, electrical energy and water consumption

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| DESARROLLO DEL TEMA | 11 |
| DISEÑO CONCEPTUAL..... | 11 |
| DISEÑO TEÓRICO-EXPERIMENTAL..... | 15 |
| RESULTADOS | 22 |
| <i>Mediciones experimentales.</i> | 22 |
| <i>Pruebas.</i> | 26 |
| Métodos de sintonía en lazo abierto. | 26 |
| Métodos de sintonía en lazo cerrado..... | 29 |
| Sintonización del controlador a partir de métodos en lazo cerrado | 32 |
| <i>Comparación entre métodos de calentamiento agua.</i> | 33 |
| CONCLUSIONES | 36 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 38 |
| ANEXO A: CODIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO | 39 |
| ANEXO B: PLACA IMPLEMENTADA | 45 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO ZIEGLER NICHOLS EN LAZO ABIERTO | 27 |
| TABLA 2: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO CHR 0%..... | 28 |
| TABLA 3: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO CHR 20%..... | 28 |
| TABLA 4: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO COHEN COON | 29 |
| TABLA 5: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO ZIEGLER NICHOLS LAZO CERRADO..... | 30 |
| TABLA 6: VALORES SINTONIZACIÓN MÉTODO THUMB..... | 31 |
| TABLA 7: VALORES SINTONIZACIÓN PID MÉTODO PRUEBA Y ERROR | 33 |
| TABLA 8: CUADRO COMPARATIVO SISTEMA PROTOTIPO Y TERMOSTATO | 35 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1: ESQUEMA DE UN CONTROLADOR DE VOLTAJE AC (HART, 2011) | 11 |
| FIGURA 2: FORMAS DE ONDA EN CARGA Y TRIAC (HART, 2011) | 12 |
| FIGURA 3: VOLTAJE NORMALIZADO EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE DISPARO PARA UN CONTROLADOR AC CON CARGA RESISTIVA (HART, 2011)..... | 13 |
| FIGURA 4: CONTENIDO ARMÓNICO NORMALIZADO EN FUNCIÓN DE ÁNGULO DE DISPARO DE UN CONTROLADOR AC CON CARGA RESISTIVA (HART, 2011) | 13 |
| FIGURA 5: ESQUEMA DE UN CONTROL AUTOMÁTICO DE PLANTA (OGATA, 2010)..... | 14 |
| FIGURA 6: ESQUEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA OPTO AISLADO | 16 |
| FIGURA 7: CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO..... | 17 |
| FIGURA 8: # DE CICLOS VS ÁNGULO DE DISPARO..... | 18 |
| FIGURA 9: CIRCUITO DE DETECCIÓN DE POSICIÓN SWITCH | 19 |
| FIGURA 10: CIRCUITO DETECCIÓN DE PRESENCIA DE USUARIO..... | 19 |
| FIGURA 11: CIRCUITO DE CONTROL Y ACCIÓN DE ELECTRO VÁLVULA | 20 |
| FIGURA 12: CIRCUITO DETECTOR DEL SETPOINT..... | 21 |
| FIGURA 13: CIRCUITO MEDICIÓN DE TEMPERATURA..... | 21 |
| FIGURA 14: CIRCUITO DE INTERFAZ AL USUARIO INDICACIÓN CONSUMO AGUA | 22 |
| FIGURA 15: # DE CICLOS VS ÁNGULO DE DISPARO REAL | 23 |
| FIGURA 16: VOLTAJE VS ÁNGULO DE DISPARO EXPERIMENTAL..... | 24 |
| FIGURA 17: TEMPERATURA VS ÁNGULO DE DISPARO..... | 25 |
| FIGURA 18: TEMPERATURA VS VOLTAJE SUMINISTRADO | 25 |
| FIGURA 19: RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE ENTRADA PASO | 26 |
| FIGURA 20: MÉTODO SINTONIZACIÓN ZIEGLER NICHOLS EN LAZO ABIERTO | 27 |
| FIGURA 21: MÉTODO SINTONIZACIÓN COHEN COON LAZO ABIERTO | 28 |
| FIGURA 22: DIAGRAMA DE NYQUIST EN LAZO ABIERTO DE LA PLANTA..... | 30 |
| FIGURA 23: RESPUESTA A UN ESCALÓN CONTROLADO POR MÉTODO ZIEGLER NICHOLS EN LAZO CERRADO | 31 |
| FIGURA 24: RESPUESTA A UN ESCALÓN CONTROLADO POR MÉTODO THUMB | 32 |
| FIGURA 25: RESPUESTA A UN ESCALÓN PID SINTONIZADO..... | 33 |
| FIGURA 26: RESPUESTA A UN ESCALÓN DE SISTEMAS PROTOTIPO Y TERMOSTATO | 34 |
| FIGURA 27: RESPUESTA A UN ESCALÓN SISTEMA PROTOTIPO Y TERMOSTATO..... | 35 |

INTRODUCCIÓN

El calentamiento de agua en domicilios es una demanda que debe ser satisfecha al usuario mediante un sistema que sea confiable y eficaz. Estas dos últimas características han socavado a una tercera que debe tener mucha relevancia, eficiencia energética y amigable con el ambiente. Si bien los sistemas de calentamiento de agua están regulados por especificaciones de eficiencia energética, su diseño y funcionamiento conceptual no son del todo ecológicos. Dichos sistemas en su mayoría son sistemas centralizados de calentamiento, tales como termostatos, calefones, y calentadores de flujo. El concepto de ser un sistema centralizado hace que se caliente siempre el mismo volumen de agua pese a que no siempre vaya a ser consumida. En otras palabras, lo más viable ambientalmente sería sólo calentar el agua que el usuario requiere en ese momento. A más de ello, se minimiza el consumo de energía eléctrica, pues sólo se calienta el agua necesaria. Existe un intervalo de tiempo durante la ducha que el usuario no requiere de una caída de flujo de agua. En dicho intervalo se desperdicia tanto agua como energía eléctrica. Fuese ideal que en el mencionado tiempo se cierre el paso de agua hasta que el usuario requiera nuevamente de una caída de agua. El presente trabajo de titulación pretende diseñar e implementar un sistema para el calentamiento y ahorro de agua en domicilios. Se tiene como enfoque minimizar el consumo de energía eléctrica calentando sólo el agua demandada por el usuario. Así se requiere un sistema que representa una menor carga eléctrica evitando así posibles desbalances en las fases del suministro eléctrico. Dicho sistema también pretende fomentar y reducir el consumo de agua durante la ducha. Para ello se cuenta con un sistema automático de detección de presencia humana que cierra automáticamente el paso de agua si el usuario no se encuentra

bajo la ducha. Asimismo, se muestra al usuario el consumo de agua en tiempo real con el fin de concientizar sobre el ahorro del recurso hídrico.

Resulta preocupante la creciente demanda energética y de consumo de agua en sociedades post modernas. Esta demanda viene acompañada de una falta de consciencia ambiental, sobre todo en países y sociedades sub desarrolladas. Sin embargo, el presente proyecto de titulación tiene como finalidad colateral ayudar y fomentar activamente a dicha consciencia ambiental haciendo uso del prototipo de ducha inteligente. Se diseña e implementa el prototipo en base a eficiencia energética y fomentar una responsabilidad ambiental. El diseño técnico del prototipo usa de bagajes en electrónica de potencia, termodinámica de fluidos, control automático y sistemas digitales y micro procesadores con el fin de obtener un prototipo confiable, eficaz y amigable con el ambiente.

DESARROLLO DEL TEMA

Diseño Conceptual

El sistema inteligente para el calentamiento y ahorro de agua en domicilios propuesto en el presente proyecto de titulación consiste en un controlador de voltaje AC monofásico que permita controlar la potencia suministrada a una carga resistiva. De esta manera controlando voltaje, corriente y potencia se puede regular a gusto del usuario la temperatura del agua durante el baño. La configuración de dos SCRs en anti paralelo es equivalente a usar un Triac.

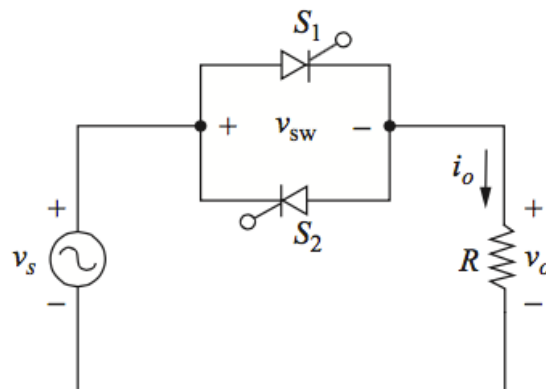


Figura 1: Esquema de un controlador de voltaje AC (Hart, 2011)

El usuario tiene un control sobre la temperatura de agua bastante lineal al poder seccionar la onda senoidal de forma directa. El control de fase usado es directo por lo que no es necesario circuito auxiliares para el encendido y apagado del Triac.

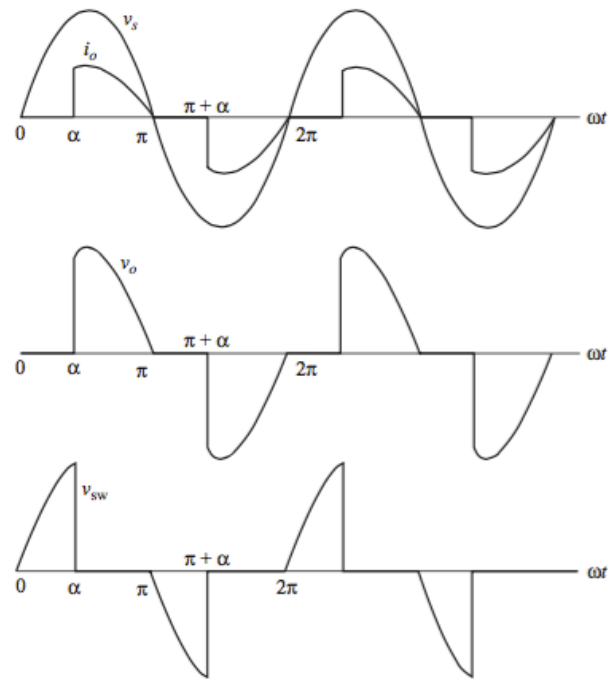


Figura 2: Formas de Onda en carga y Triac (Hart, 2011)

El circuito de control está conformado por un microprocesador junto con un circuito detector de cruce por cero. Así se logra sincronizar dicho circuito de control con la red de suministro eléctrico a 60 Hz.

Se muestran a continuación curvas normalizadas que indican el voltaje normalizado y contenido armónico en función del ángulo de disparo del Triac. Dichas curvas ayudan al análisis y comparación de la caracterización del prototipo.

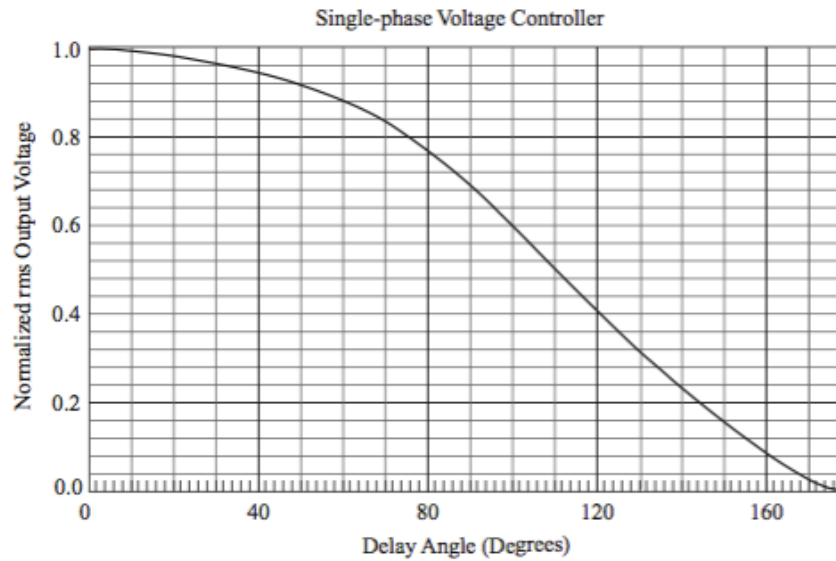


Figura 3: Voltaje normalizado en función de ángulo de disparo para un controlador AC con carga resistiva (Hart, 2011).

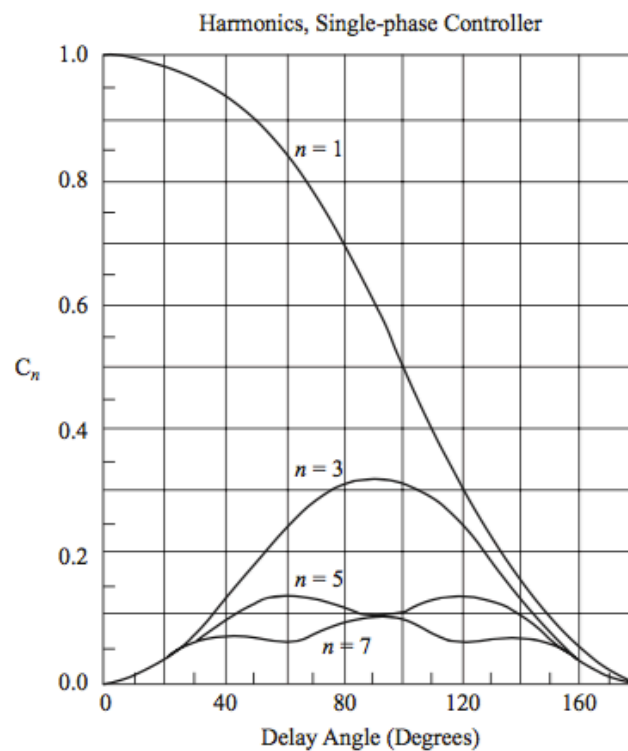


Figura 4: Contenido armónico normalizado en función de ángulo de disparo de un controlador AC con carga resistiva (Hart, 2011)

Para un correcto control de temperatura ante a perturbaciones externas se usa un controlador proporcional integral derivativo (PID) el cual regula de manera automática la temperatura deseada. La ventaja de usar un controlador PID es que puede ser sintonizado

empíricamente sin requerir modelos matemáticos de la planta y aun así obtener resultados óptimos. El controlador PID trata de reducir el error entre el Setpoint, en este caso la temperatura asignada por el usuario, y el Input, que es la lectura de la temperatura real del agua, modificando el Output que viene a ser el ángulo de disparo del Triac.

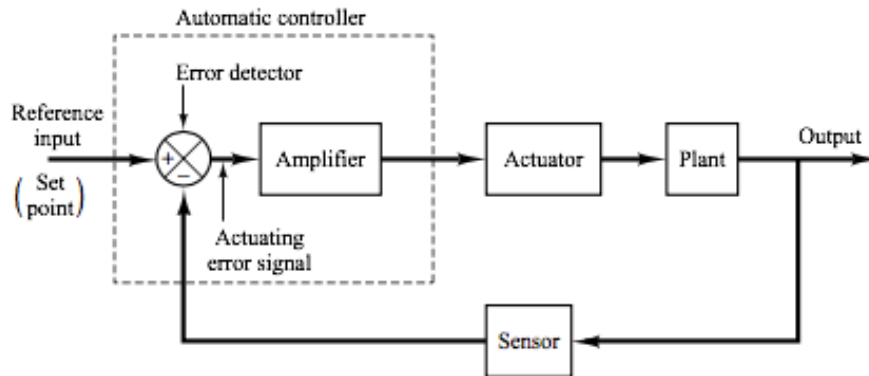


Figura 5: Esquema de un control automático de planta (Ogata, 2010)

El sistema propuesto pretende fomentar una consciencia ambiental al momento de tomar una ducha. El prototipo permite al usuario elegir entre dos modos de uso de la ducha inteligente mediante un interruptor. El primer modo consiste en *modo Normal* en el cual solo actúa el controlador de temperatura PID. El segundo modo consiste en un *modo ECO* que permite ahorrar el consumo eléctrico y de agua durante la ducha. Para ello el prototipo de ducha inteligente está conformado por un sistema de cierre de agua automático, compuesto por un sensor de presencia y una electroválvula normalmente abierta (N.O.), que funciona cuando el usuario no se encuentra debajo de la ducha y no requiere del uso de agua. Asimismo, se cuenta un sensor de caudal que mide en tiempo real el consumo de agua en litros mediante un interfaz. Finalmente, se cuenta con una comunicación inalámbrica, vía Bluetooth, entre el prototipo y una aplicación terminal Bluetooth en un Smartphone que facilita al usuario saber exactamente los detalles de temperatura del agua, litros totales usados y litros totales ahorrados. En base a los conceptos expuestos anteriormente, se diseñó el

prototipo de ducha inteligente.

Diseño teórico-experimental

El prototipo de ducha inteligente consiste en un circuito de potencia y circuitos de control y medición de datos. El convertor AC-AC regula la potencia efectiva entregada a LA carga resistiva. Se pretende calentar el agua a una temperatura ideal durante la ducha a 45°C (s/n, 2016). El prototipo entrega al usuario un caudal de $2 \left(\frac{L}{min} \right)$. Se calcula la potencia necesaria para calentar dicha masa de agua 60 segundos. Se asume que existe una eficiencia máxima de transferencia de calor por convección y conducción entre la energía eléctrica suministrada y la energía calorífica alcanzada por la masa de agua. Es decir:

$$E_{electrica} = E_{calorifica}$$

$$P_{Watts} * t = m * C * \Delta T$$

Se nota que la temperatura del agua en condiciones normales es de 25°C y el valor de la constante de calor específico del agua de bibliografía existente (Yunus & Boles, 2015).

$$P_{Watts} = 2790 \approx 3000(Watts)$$

Esto sugiere que se necesita una potencia de 3000 (Watts) suficiente para calentar el volumen de agua a la temperatura deseada (45°C). El suministro eléctrico es de 220(V) para reducir el amperaje.

$$P = V * I$$

$$I = 13.64(A)$$

$$V = I * R$$

$$R_{carga} = 16.13 \approx 16(\Omega)$$

Se propuso que cada punto de calentamiento de agua en un domicilio no supere los 15 A. ya que en promedio se instalarían de 2-3 duchas. Así no se tendría un consumo superior

a los 45 (A) nominales para el calentamiento del agua en un domicilio. Esto facilita minimizar el consumo eléctrico en comparación a otros métodos de calentamiento de agua.

Se muestra el esquemático del circuito de potencia opto aislado por un el opto Triac MOC 3020.

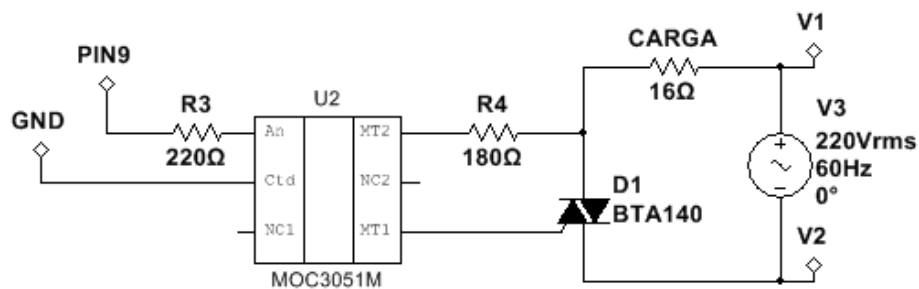


Figura 6: Esquema del circuito de potencia opto aislado

La resistencia R4 fue elegida de acuerdo al datasheet del MOC3020 como una resistencia que limite la corriente de 50 (mA.), suficiente para disparar el Triac. La resistencia R3 se seleccionó para limitar la corriente a 25 (mA.), ideal para activar el opto Triac.

$$R4 = \frac{V}{I} = 200 \approx 220(\Omega)$$

Para lograr sincronización con la onda senoidal del suministro eléctrico se requirió de un circuito detector de cruce por cero para generar una señal hacia el micro controlador y poder disparar de forma sincronizada el Triac.

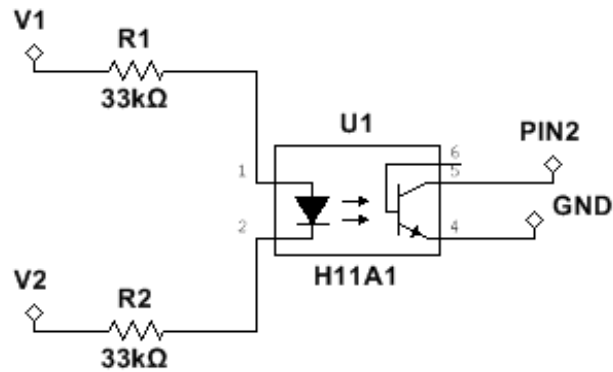


Figura 7: Circuito detector de cruce por cero

Dicho circuito detecta cuando la onda senoidal cruza por cero, generando así un pulso que es enviado como una interrupción al Pin 2 del Arduino. Para un correcto funcionamiento del opto acoplador H1AA1 se requiere una corriente de entrada de 10 (mA.). Se limitó aún más la corriente de entrada al opto acoplador a un valor de 6 (mA.).

$$R_{1,2} = \frac{V}{I} = 36.6 \approx 33(k\Omega)$$

En cuanto al código para poder disparar el Triac de manera sincrónica con el suministro eléctrico se usó el Timer 1 del microprocesador ATMEGA328P que funciona a 16 (MHz). Se dividió al Timer 1 para 256 con el fin de tener ciclos de 16 (us) de duración. Así medio ciclo de una onda senoidal de 60 (Hz) es 8.33 (ms) que cual equivale aproximadamente 520 ciclos de 16 (us). Se utiliza el comparador A con el fin de disparar el Triac cuando el valor elegido por el usuario alcanza el valor del comparador. Es importante mencionar que el Output del controlador PID es el valor del comparador A. Así se obtiene un ángulo de disparo mínimo en 0 ciclos y un ángulo máximo a 520 ciclos. Véase la figura a continuación.

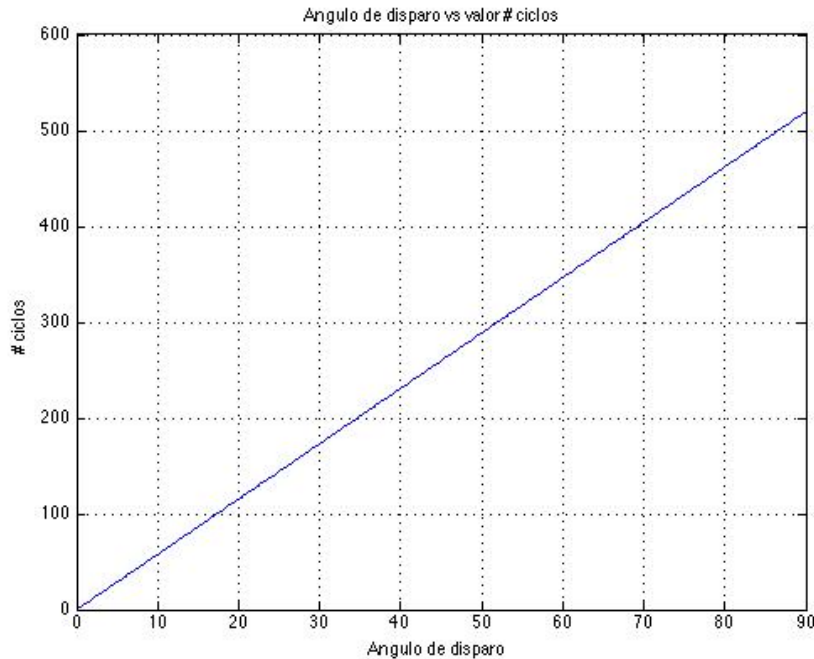


Figura 8: # de ciclos vs ángulo de disparo

Se toma en cuenta que el Triac al ser un elemento no ideal requiere de un voltaje de polarización haciendo que se reduzca el rango de ciclos efectivos. Asimismo, se tiene una caída de voltaje en el Triac de 1.3 (V). Dicha caída de voltaje genera pérdidas en forma de calor que debe ser disipado para un correcto funcionamiento del elemento semiconductor. A capacidad nominal, con una corriente nominal de 13.75 (A) se deben disipar alrededor de 18 (W):

$$P_{disipada} = V * I_{RMS} = 17.88(W)$$

Como método de enfriamiento del Triac se utilizó el flujo de agua. Es decir, el Triac se encuentra acoplado al tubo por el cual circula agua fría. Además, dichos 17.88 (W), ayudan, de cierta manera, al calentamiento del agua.

En cuanto al modo de funcionamiento del prototipo, sea en modo ECO o en modo Normal, se utilizó el circuito que detecte si la entrada en lógico 5 (V) (HIGH) para modo ECO o un lógico 0 (V) (LOW) para el modo Normal.

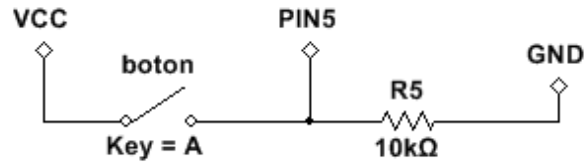


Figura 9: Circuito de detección de posición switch

En cuanto a R5 se elige un valor lo suficientemente alto (10 kohm) para no permitir que la corriente hacia Ground sea alta, pues es una corriente sin importancia, solo es necesario poder detectar un lógico HIGH o LOW.

Si el prototipo se encuentra en modo ECO entra en funcionamiento el sensor que detecta la presencia del usuario bajo la ducha. Se utiliza un sensor ultrasónico que mide la distancia hacia el piso de la ducha. Si la distancia es lo suficientemente grande significa que el usuario se ha retirado de abajo del prototipo. Si la distancia es menor, es el inverso.

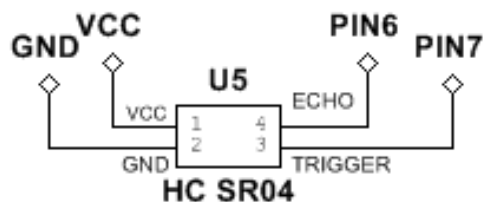


Figura 10: Circuito detección de presencia de usuario

Si la distancia es grande (> 90 cm.), se acciona el relay de control del electro válvula. Por su parte, si la distancia es corta (<90 cm.), se deja sin accionar la electroválvula.

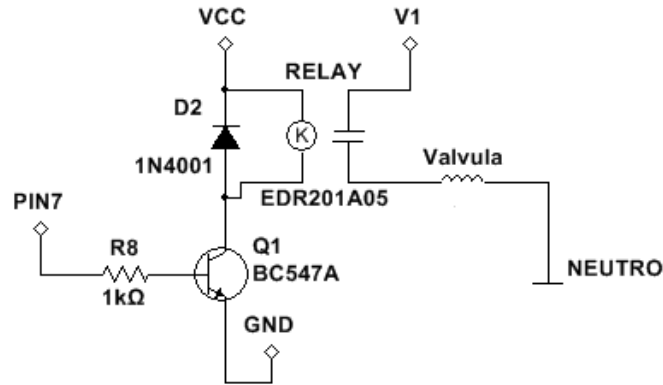


Figura 11: Circuito de control y acción de electro válvula

Para que el transistor opere en modo de saturación se requiere la corriente de base sea de aproximadamente 5 (mA.) por lo que R8 toma un valor correspondiente.

$$R8 = \frac{V}{I} = 1(k\Omega)$$

En cuanto al diodo en anti paralelo a la bobina del relay mecánico funciona para que la corriente de reversa de la bobina no queme a la misma. Si en el Pin 7 del Arduino se coloca un HIGH, medido por el sensor de distancia HC SR04, se acciona la electroválvula normalmente abierta, cortando así el suministro de agua. Mientras la electroválvula esté encendida, el valor del comparador A para accionar el Triac se mantiene en su valor máximo (505 ciclos) para obtener un ángulo de disparo máximo y así el mínimo suministro de potencia a la carga.

En cuanto al Setpoint (temperatura deseada por el usuario), se realiza la medición de un valor analógico de 0 a 1023 y mapeándolo a valores de temperatura con un máximo de 45°C.

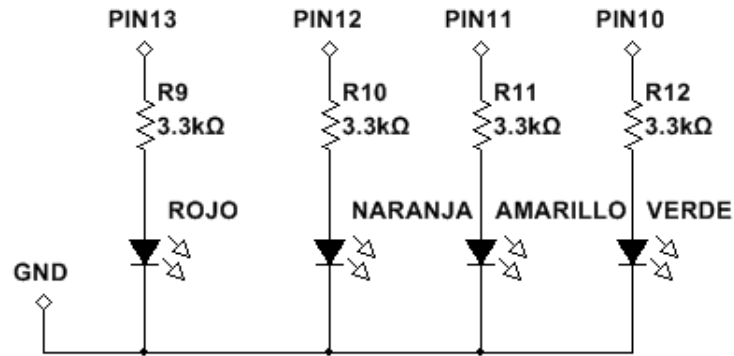


Figura 14: Circuito de Interfaz al usuario indicación consumo Agua

Asumiendo que en el LED caen 0.7 (V) y se desea una corriente limitada para no tener una disminución del voltaje de suministro del Arduino (5 V) se requiere que R9, R10, R11, y R12 tengan un valor de 3.3 (kohm).

NOTA: Para un mejor entendimiento de los esquemáticos expuestos anteriormente, véase el anexo A que expone el código implementado en Arduino.

Resultados

Mediciones experimentales.

Una vez construido el prototipo se procedió a caracterizar el comportamiento dinámico de la ducha inteligente. Debido a que el dispositivo semiconductor utilizado para seccionar la onda senoidal no es ideal, se debe tomar en consideración las pérdidas que existen por el mismo y el rango de operación.

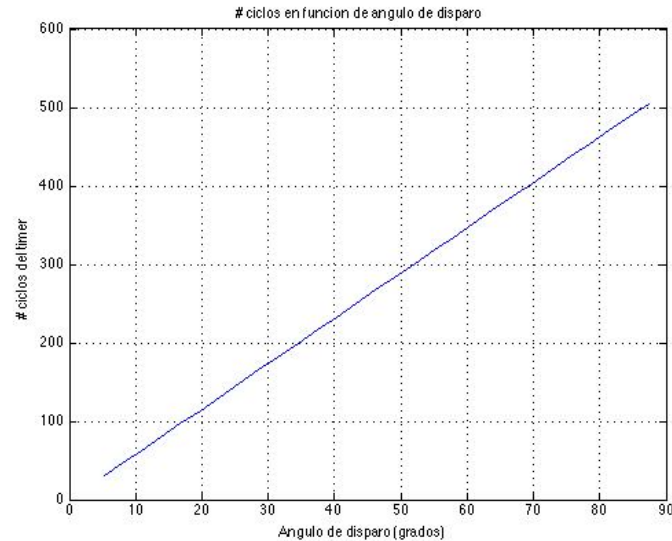


Figura 15: # de ciclos vs ángulo de disparo real

El ángulo de disparo efectivo que se posee sobre el seccionamiento de la onda es menor. El rango de número de ciclos que se posee es de 30 – 505 ciclos del Timer 1. Teóricamente 520 ciclos del Timer disparan al Triac en 90 grados, cada medio ciclo de la onda senoidal. Por ende, los ángulos de disparo máximo y mínimo α_1 y α_2 respectivamente son:

$$\alpha_1 = \frac{2 * 505 * 90^\circ}{520} = 174.82^\circ$$

$$\alpha_2 = \frac{30 * 90^\circ}{520} = 5.19^\circ$$

Dichos valores fueron encontrados experimentalmente usando un osciloscopio. Fuera de este rango, el Triac exhibía un comportamiento erróneo. Una vez hallado el rango de correcto funcionamiento del Triac se procedió a caracterizar las curvas de respuesta del prototipo.

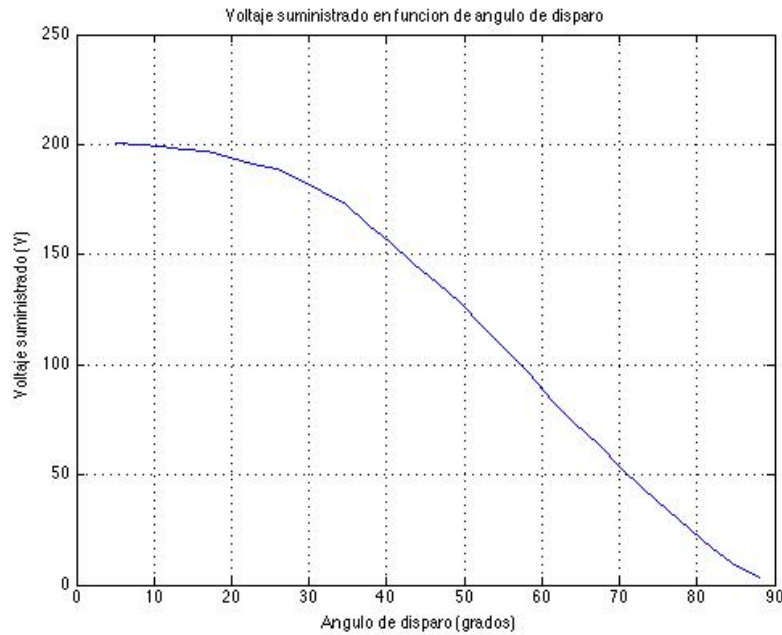


Figura 16: Voltaje vs ángulo de disparo experimental

Comparando la figura 16 con la figura 3, que muestra la curva teórica normalizada del voltaje en la carga resistiva en función del ángulo de disparo para un controlador de voltaje AC, son similares. Los rangos de operación de voltaje suministrado a la carga mínimo y máximo, V_{min} y V_{max} respectivamente, del prototipo son:

$$V_{min} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha_1}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha_1)}{2\pi}} = 2.81(V)$$

$$V_{max} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha_2}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha_2)}{2\pi}} = 209.86(V)$$

donde V_m es la amplitud máxima del voltaje suministrado. Como puede observarse los valores teóricos (Hart, 2011), se asemejan a la curva experimental encontrada. Es así que el prototipo tiene un consumo de potencia mínima y máximo, P_{min} y P_{max} respectivamente, de:

$$P_{min} = \frac{V_{min}^2}{R_{carga}} = 0.49(W)$$

$$P_{max} = \frac{V_{max}^2}{R_{carga}} = 2752.58(W)$$

Véase a continuación la curva experimental que describe la temperatura alcanzada del agua en función del ángulo de disparo.

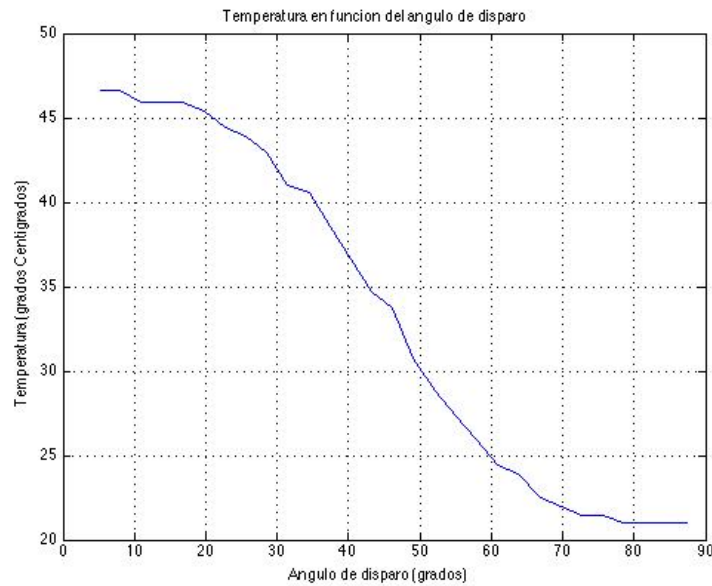


Figura 17: Temperatura vs ángulo de disparo

Finalmente se puede obtener la relación entre el voltaje suministrado a la carga resistiva en función de la temperatura del agua alcanzada. Como es de esperarse, la relación entre la variable de entrada al sistema (Voltaje) es lineal con un retraso la variable de salida del sistema (Temperatura).

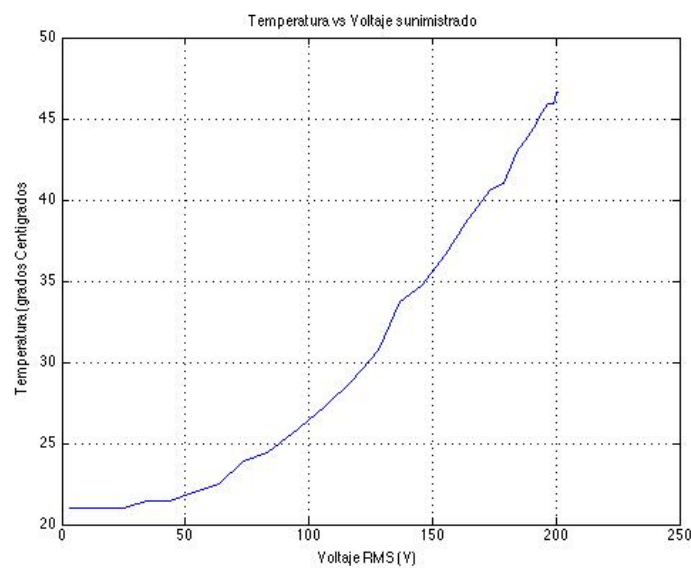


Figura 18: Temperatura vs Voltaje suministrado

Pruebas.

Una vez caracterizado el prototipo, se procedió a realizar pruebas experimentales para observar la respuesta dinámica del sistema ante entradas escalón, que se asume el usuario hará. Véase a continuación la respuesta dinámica del sistema ante una entrada escalón.

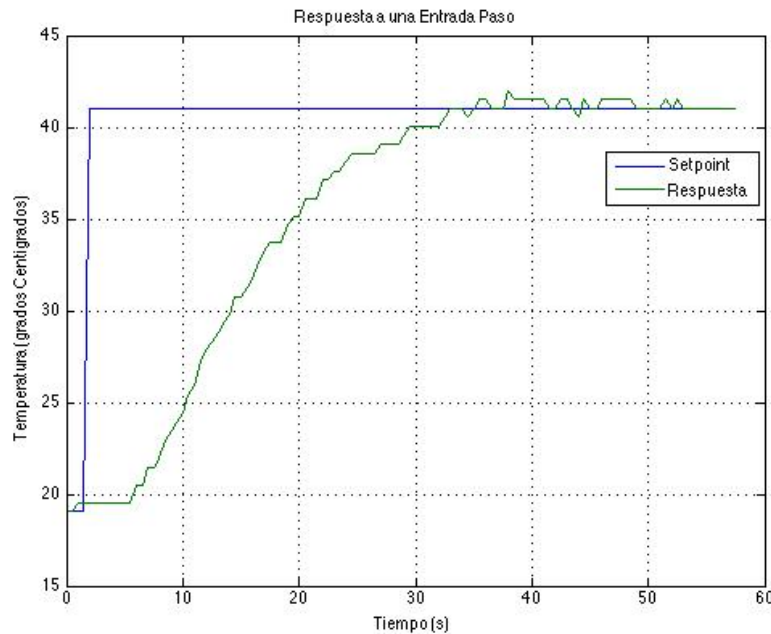


Figura 19: Respuesta del sistema ante entrada paso

El sistema alcanza una temperatura estable en un tiempo de 30 segundo aproximadamente. Este tiempo se intenta minimizar con el fin de obtener una respuesta rápida y así disminuir el desperdicio de agua cuando el usuario espera que la temperatura del agua se estabilice. Para ello se utiliza un control de la temperatura en lazo cerrado mediante un control PID. A continuación, se muestran distintos métodos de sintonización del controlador PID para mejorar la respuesta del sistema.

Métodos de sintonía en lazo abierto.

Este método empírico desarrollado por Ziegler- Nichols se basa en la respuesta

dinámica del sistema ante una entrada paso. Caracterizado por los parámetros T y L se puede sintonizar plantas lineales.

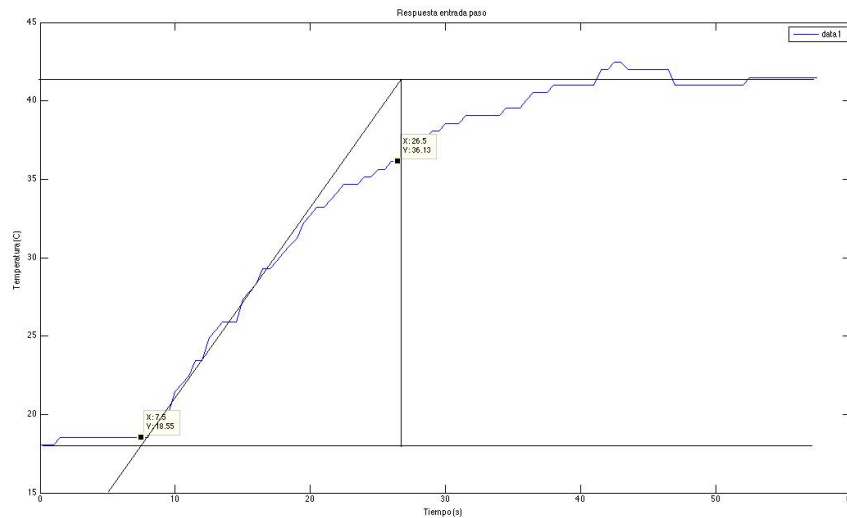


Figura 20: Método sintonización Ziegler Nichols en lazo abierto

Para la planta estudiada se obtuvo los siguientes valores de los parámetros T y L .

$$T = 19$$

$$L = 3$$

Existen varios métodos de sintonía en lazo abierto, de los cuales se estudian Ziegler Nichols y el método de Chien, Hrones y Reswick. Éste último consiste en una mejora del método de Ziegler Nichols para obtener una respuesta más rápida sin presentar sobre elongación (Youney, 2007). Véase a continuación las tablas las cuales resumen los valores de sintonía encontrados para el controlador PID de la planta.

Tabla 1: Valores sintonización PID método Ziegler Nichols en lazo abierto

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|-----|-------|------|
| PI | 5.7 | 0.63 | 0 |
| PID | 7.6 | 1.267 | 8.55 |

En cuanto al método de sintonización de Chien, Hrones y Reswick (CHR) se encuentran los siguientes valores de sintonización para una sobre elongación del 0% y el 20 % respectivamente resumidos en las siguientes tablas.

Tabla 2: Valores sintonización PID METODO CHR 0%

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|------|-------|-------|
| PI | 2.22 | 0.097 | 0 |
| PID | 3.8 | 0.2 | 0.633 |

Tabla 3: Valores sintonización PID método CHR 20%

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|-------|-------|-------|
| PI | 3.79 | 0.2 | 0 |
| PID | 6.013 | 0.226 | 0.942 |

Finalmente se presenta el método de sintonía de Cohen Coon basado en la respuesta en lazo abierto ante una entrada paso (Astrom & Hagglund, 1995). Se muestra la respuesta paso para obtener los parámetros de sintonización del PID.

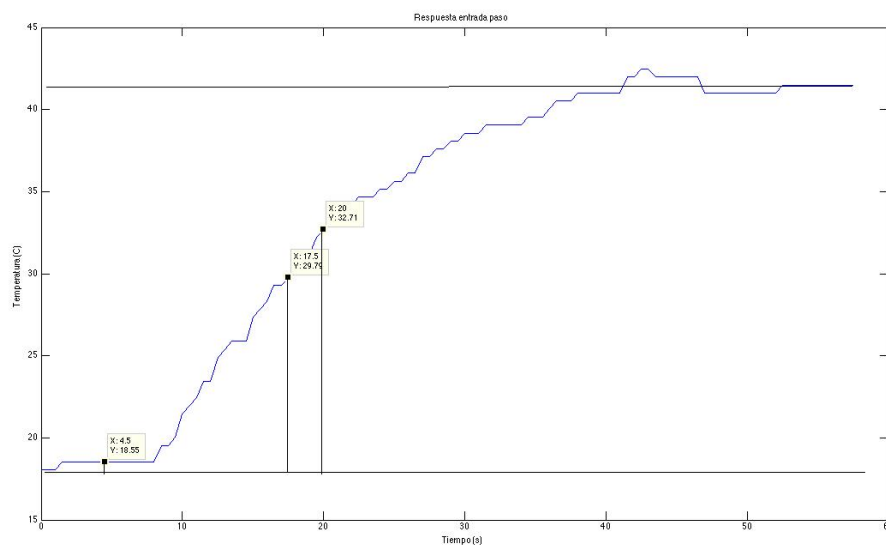


Figura 21: Método sintonización Cohen Coon lazo abierto

Se resumen los valores de sintonización del controlador PID para el método de Cohen Coon.

Tabla 4: Valores sintonización PID método Cohen Coon

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|------|------|------|
| PI | 3.61 | 0.44 | 0 |
| PID | 6.87 | 0.38 | 1.62 |

De todos los métodos de sintonización expuestos anteriormente en lazo abierto, Ziegler Nichols, Chien, Hrones y Reswick, Y Cohen Coon, se observa que los parámetros de sintonización son relativamente similares. Dichos métodos no dieron respuestas deseadas, pues la planta reaccionaba sumamente lento

Métodos de sintonía en lazo cerrado.

En cuanto a los métodos de sintonización en lazo cerrado, se basan en determinar el punto el cual la curva de el diagrama de Nyquist corta el eje real negativo. Este punto representa el límite que el sistema es críticamente estable (Youney, 2007). Con ello se determinan los parámetros para sintonizar el controlador PID. Como primera parte se debe encontrar un modelo matemático que describa al sistema estudiado. Se utiliza el modelo de estimación por mínimos cuadrados de la estructura ARX (modelo de la caja negra), mediante MATLAB (Becerra et al., 2014). Se encuentra la siguiente función de transferencia en el dominio Z:

$$G(z) = \frac{0.0216}{z - 0.9808}$$

Con dicha descripción matemática de la planta se procede a realizar el diagrama de Nyquist en lazo abierto con el fin de encontrar los polos inestables del sistema.

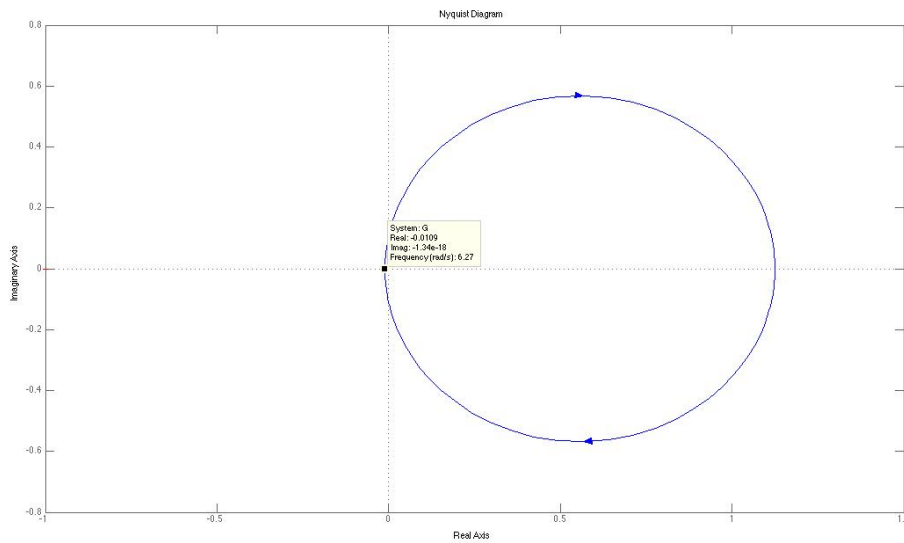


Figura 22: Diagrama de Nyquist en lazo abierto de la planta

Se puede extraer de la ilustración anterior los parámetros K_u y T_u que permites sintonizar al PID. El corte con el eje real negativo es en 0.0109 a una frecuencia de 6.27(rad/s). Se puede obtener el margen de ganancia en dB:

$$|Gm_{dB}| = |20 \log(0.0109)| = 39.25(dB)$$

Con el margen de ganancia y la frecuencia de corte correspondiente se pueden determinar los parámetros de sintonización K_u y T_u para sintonizar el controlador mediante cualquier método en lazo cerrado, en este caso Ziegler Nichols (respuesta en frecuencia) y el método de sintonización *Thumb* (Youney, 2007).

$$K_u = 10^{\frac{Gm_{dB}}{20}} = 91.75$$

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega_n} = 1.005$$

Véase a continuación las tablas que resumen los parámetros de sintonización en lazo cerrado.

Tabla 5: Valores sintonización PID método Ziegler Nichols lazo cerrado

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|----|----|----|
| | | | |

| | | | |
|-----|--------|--------|-------|
| PI | 36.7 | 45.67 | 0 |
| PID | 55.046 | 109.87 | 6.895 |

Tabla 6: Valores sintonización Método Thumb

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|-------|-------|------|
| PID | 45.87 | 57.22 | 3.68 |

De los dos métodos de sintonización en lazo cerrado, respuesta en frecuencia de mediante Ziegler Nichols y método Thumb, se obtuvieron mejores resultados que los métodos en lazo abierto. Se muestran a continuación las respuestas de la planta usando un controlador PID ante una entrada escalón.

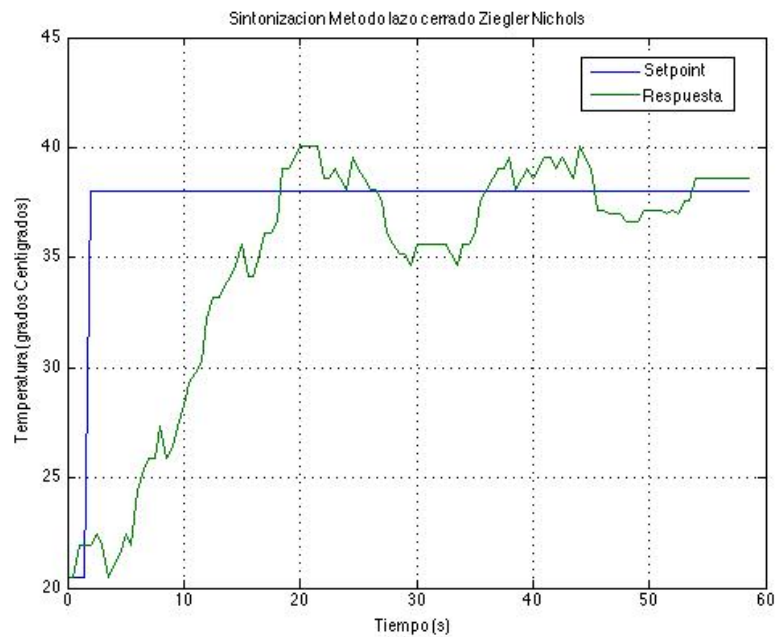


Figura 23: Respuesta a un escalón controlado por método Ziegler Nichols en lazo cerrado

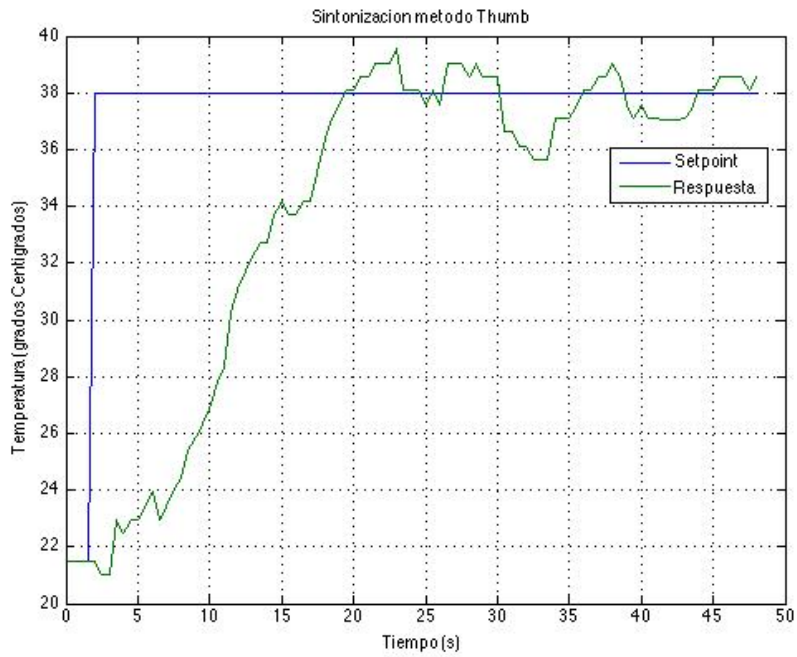


Figura 24: Respuesta a un escalón controlado por método Thumb

Sintonización del controlador a partir de métodos en lazo cerrado

Finalmente, sintonizando a partir de los métodos en lazo cerrado, se encontraron parámetros del controlador PID. Se obtuvo una respuesta suficientemente rápida y sin sobreelongación. Debido a limitaciones físicas, la planta responde en un tiempo de 20 segundos a una temperatura estable del agua.

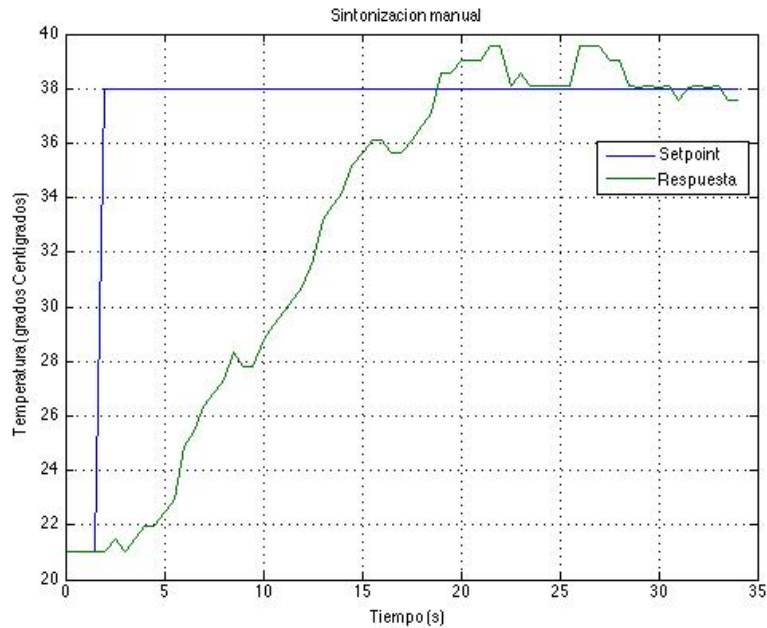


Figura 25: Respuesta a un escalón PID sintonizado

Se resumen los parámetros de sintonía encontrados del controlador PID.

Tabla 7: Valores sintonización PID método prueba y error

| Controlador | KP | KI | KD |
|-------------|----|----|----|
| PID | 20 | 4 | 0 |

Comparación entre métodos de calentamiento agua.

El sistema propuesto como prototipo en el presente proyecto para el calentamiento y ahorro en el consumo de agua en domicilios difiere en su funcionamiento más no en el método de calentamiento de agua. Es decir, el calentamiento del agua se hace a través de un sistema ya conocido de aplicar un voltaje a una niquelina sumergida en agua, para que, a través del efecto Joule, se transmita la energía eléctrica en energía térmica directo al volumen de agua que circula. La diferencia recae en que el prototipo sólo calienta el agua utilizada por el usuario. Los termostatos actuales calientan un cierto volumen de agua a una temperatura selecta. Pese a que la eficiencia de dichos termostatos está sobre el 90%, muchas veces se

calienta agua que no se consume, asumiendo, el mejor escenario, que el termostato sólo se enciende una vez al día. Resulta difícil poder comparar dos sistemas de calentamiento de agua totalmente distintos, pues el calefón y termostato son dos sistemas centralizados que calientan un gran volumen de agua para posteriormente almacenarlo. El prototipo de ducha inteligente sólo calienta el agua necesaria mejorando así el consumo de energía eléctrica. Se muestra la respuesta a una entrada escalón del prototipo y un termostato.

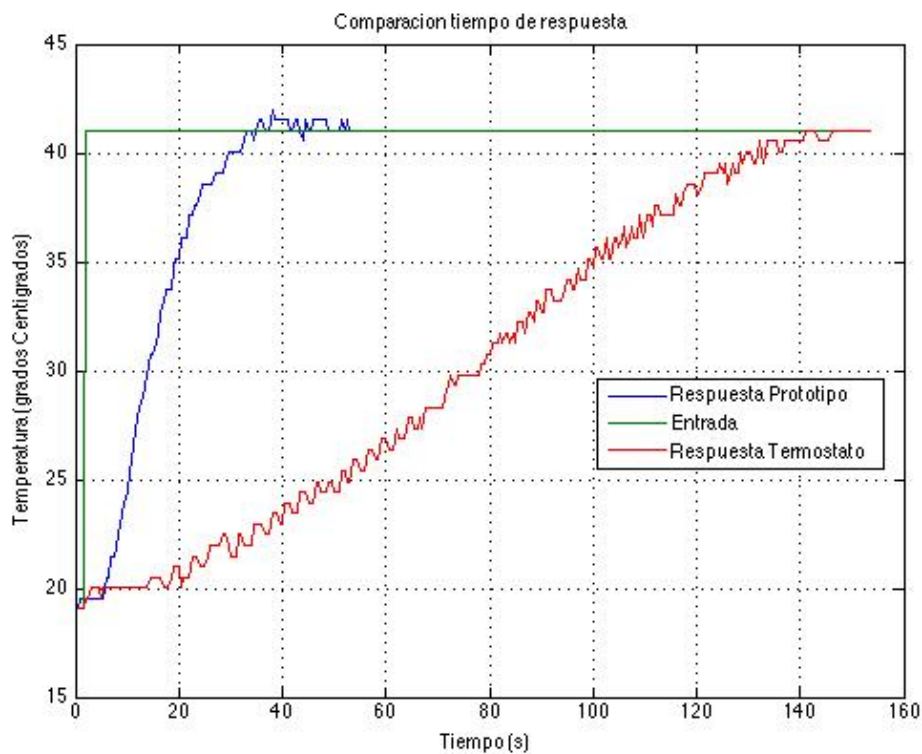


Figura 26: Respuesta a un escalón de sistemas prototipo y termostato

Véase que la temperatura deseada con el termostato se alcanza en 140 segundos, mientras que, en el prototipo, sin implementar el control PID, en 30 segundos. Ahora véase la respuesta del prototipo implementando el lazo de control PID, con el cual se ganan 10 segundos de mejora en la rapidez de respuesta.

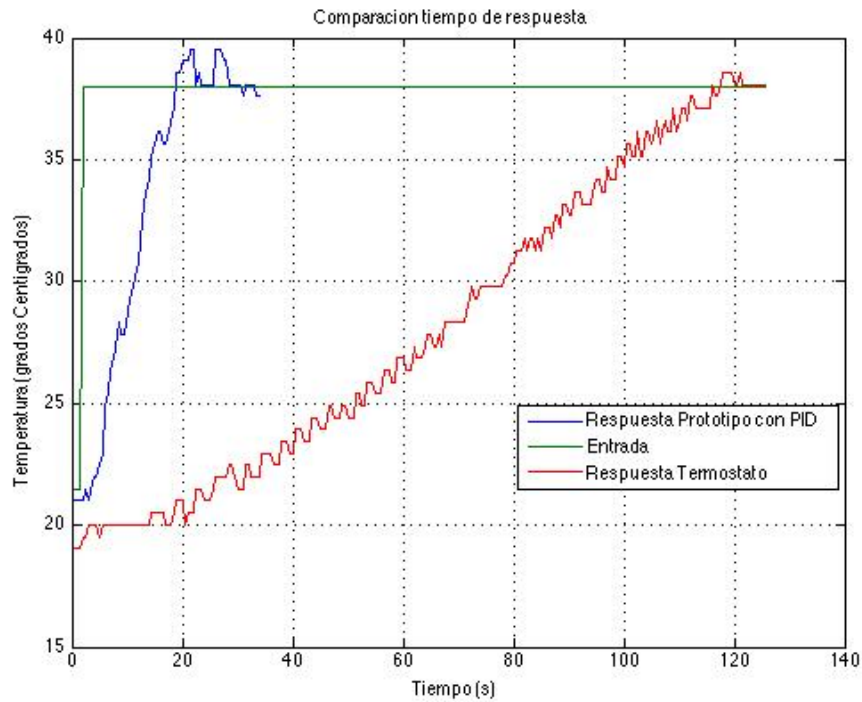


Figura 27: Respuesta a un escalón sistema prototipo y termostato

El intervalo donde el usuario espera que el agua alcance la temperatura deseada, se trata de minimizar el desperdicio de agua mediante una respuesta lo más rápida posible. El caudal de agua es de 2 (l/min). Véase la tabla a continuación que resume el desperdicio de agua durante el tiempo de asentamiento de un termostato y el prototipo.

Tabla 8: Cuadro comparativo sistema prototipo y termostato

| Sistema | Prototipo | Termostato |
|------------------------|-----------|------------|
| Tiempo de asentamiento | 20 (s) | 120 (s) |
| Agua sin uso | 0.66 (L) | 3.99 (L) |

CONCLUSIONES

Del presente trabajo, se pueden resaltar varias conclusiones claras del diseño e implementación del prototipo de ducha eléctrica, como sistema para el calentamiento y ahorro de agua en domicilios. El prototipo fue diseñado en base a tratar de minimizar el consumo de energía eléctrica. Es bien entendido que en la planilla de consumo eléctrico entre los rubros más altos se encuentra el calentamiento de agua. Los sistemas de calentamiento de agua implementados en domicilios, la gran mayoría, son sistemas centralizados. Es decir, se tiene un solo punto de calentamiento para el abastecimiento de todo el domicilio. Esto a su vez implica que se calienta un volumen de agua sin la necesidad de ser utilizada inmediatamente. Por su parte, el prototipo de ducha inteligente solo calienta el agua consumida en el preciso instante por el usuario, haciendo así al sistema más eficaz, si bien usa el mismo sistema para calentar el agua (a través de una niquelina). Se diseñó el prototipo para que no supere un consumo máximo de 3000 (W), a 13.75 (A) a capacidad nominal. Con ello se gana que no exista un desbalance entre fases ya que la carga es mucho menor, en comparación a un calentador de flujo. El sistema construido es una opción viable para sustituir sistemas centralizados de calentamiento de agua.

En cuanto a la rapidez de respuesta del prototipo, se obtuvo una respuesta dinámica ante una entrada paso un tiempo de asentamiento de 20 segundos. Es decir, en 20 segundos de alcanza la temperatura deseada gracias a la acción de control en lazo cerrado del controlador PID. Así se minimiza el desperdicio de agua mientras el usuario espera que el agua alcance la temperatura deseada. Dicho desperdicio de agua es mucho menor (0.66 L)

comparando con el tiempo de asentamiento de sistemas centralizados (3.99 L).

Para una correcta acción de control y una adecuada sintonización del controlador PID, se analizó varios métodos de sintonización. Los métodos de sintonización en lazo abierto no dieron resultados deseados, su respuesta fue sumamente lenta. En cuanto a los métodos de sintonización en lazo cerrado se obtuvieron respuestas aceptables con tiempos de asentamientos menores a los 30 segundos. Los métodos de sintonización mencionados anteriormente, Ziegler Nichols, Chien, Hrones y Reswick, Y Cohen Coon, y el método de Thumb asumen que la planta es lineal. La relación entre el voltaje suministrado y la temperatura que alcanza el agua es lineal con un retraso. Esto llevó a que por medio de sintonización en base a métodos en lazo cerrado se lograra la mejor respuesta del sistema ante una entrada paso.

Resulta alarmante saber el promedio de consumo de agua por persona durante la ducha. En el Ecuador, existe una falta de educación y responsabilidad ambiental. Es por ello que el prototipo pretende ser un método alternativo para minimizar el consumo de energía eléctrica y el ahorro de agua. Debido a la suficiencia de recursos hídricos, no existe una conciencia ambiental. El prototipo diseñado muestra ser un sistema viable para el calentamiento y ahorro del agua gracias a su diseño conceptual y a que fomenta al usuario, por medio de su interfaz, a minimizar su consumo de agua durante la ducha.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astrom, K. & Hagglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. New York: Instrument Society of America
- Becerra, J., Moreno, F., Quiroz, J. & Bautista, D. (2014). *Estimación de Parámetros y Modelo de Caja Negra en un Motor CD sin Escobillas*. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v17n33/v17n33a06.pdf>
- Boylestad, R. & Nashelsky, L. (2003) *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. México: Pearson Educación
- Cengel, Yunus & Boles, Michael. (2015). *Thermodynamics: an Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Doicin, D., Popescu, M. & Patrascioiu, C. (2016). *PID Controller Optimal Tuning*. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7861175>
- Hambali, N., Masngut, A., Aziz, A. & Janin, Z. (2014). *Process Controllability for Flow Control System Using Ziegler Nichols (ZN), Cohen Coon (CC) and Chien Hrones Reswick (CHR) Tuning Methods*. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7047432>
- Hart, Daniel (2011). *Power electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Hartwell, Frederick & Richter, Herbert. (2014). *Practical Electrical Wiring*. Minneapolis: Park Publishing INC.
- Ogata, Katsuhiko. (2010). *Modern Control Engineering*. Boston: Prentice Hall
- s/n. (2016, 5 de Enero). What is the best water temperature for your bath or shower. *Fox News*. Recuperado de <http://www.foxnews.com/health/2016/01/05/what-is-best-water-temperature-for-your-bath-or-shower.html>
- Youney, Justin. (2007). *A comparison and evaluation of common PID tuning methods*. (Tesis de maestría, Central Florida University). Recuperado de <http://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4423&context=etd>

ANEXO A: CODIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO

```

//Universidad San Francisco de Quito
//Departamento de Ingenieria Electrica Electronica
//Diego Vizcaino
//Codigo implementado para realizacion de ducha inteligente para ahorro y mejora del
consumo de agua y energia electrica en domicilios
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <PID_v1.h>

const int sensor = A1; // cable de transmision de datos en PIN A1
int value = 0;
//defino variables del PID
double Setpoint; //valor del potenciómetro que seteo la temperatura deseada
double Input; //valor de la temperatura adquirida
double Output; // variable que cambia OCR1A

//Parametros de Tuneo del PID mediante el metodo de Ziegler-Nichols
double Kp=20, Ki=5, Kd=3.677;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

#define DETECT 2 //se detecta el cruce por cero EN PIN 2 (INTERRUPCION # 1)
#define GATE 9 //salida PWM que dispara el TRIAC en PIN 9
#define PULSE 4 //Ancho del pulso que activa el TRIAC
#define pot A0 //potenciómetro que regula angulo de disparo en PIN A0

long t; // Tiempo de retorno de la senal del sensor HC SR04
int trigger = 6; // disparador en PIN 6
int echo = 7; //receptor en PIN 7
int valvula = 8; // comando de cierre de valvula de agua en PIN 8
float dist; // variable de distancia medida por el sensor HC SR04

const int boton = 5; // Detecta estado ECO o Normal del modo de operacion de la ducha en
PIN 5
int estado_boton = 0; // estado del boton sea HIGH (MODO ECO) o LOW (MODO
NORMAL)

volatile int pulsos; // variable designada a cotar en # de pulsos (Hz) del sensor FL 408
unsigned char sensor_flujo = 3; //Datos sensor FL 408 en PIN 3 (INTERRUPCION # 2)
unsigned long t1; //variable de tiempo de cierre de valvula (ahorro de agua)
unsigned long ta; //variable de tiempo de medir cada seg el caudal

```

```

unsigned long pultotal; // variable que guarda el total de pulsos para calcular el consumo de
agua
double litros; // variable que muestra litros totales consumidos
double litros1; // variable que muestra litros totales ahorrados
double lmin; // variable que muestra el caudal en L/min actual
int verde = 10; //led verde indica consumo agua bajo
int amarillo = 11; //led amarillo indica consumo agua moderado
int naranja = 12; //led naranja indica consumo agua alto
int rojo = 13; // led rojo indica consumo agua muy alto

void setup(){

    // inicializo la configuracion de pines
    pinMode(trigger,OUTPUT);
    pinMode(echo,INPUT);
    pinMode(DETECT, INPUT);
    digitalWrite(DETECT, HIGH);
    pinMode(GATE, OUTPUT);
    pinMode(boton,INPUT);
    pinMode(valvula,OUTPUT);
    pinMode(sensor_flujo, INPUT);
    pinMode(verde, OUTPUT);
    pinMode(amarillo, OUTPUT);
    pinMode(naranja, OUTPUT);
    pinMode(rojo, OUTPUT);
    attachInterrupt(1, caudal, RISING);
    ta = millis();
    interrupts();

    //Inicio COMUNICACION SERIAL
    Serial.begin(9600);

    OCR1A = 505; //Valor que inicializa el comparador para disparar el TRIAC
    TIMSK1 = 0x03; //habilitacion del comparador A
    TCCR1A = 0x00; // registros del comparador en configuracion normal
    TCCR1B = 0x00; //se deshabilita al timer

    // Interrupcion del cruce por cero de la onda senoidal del suministro electrico en PIN 2
    attachInterrupt(0,zeroCrossingInterrupt, RISING);

    //se inicializa control PID en estado ON
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);

}

//funcion y rutina que es llamada cuando existe una interrupcion en PIN 2
void zeroCrossingInterrupt(){

```



```

TCCR1B=0x04; //se inicia el timer dividiendo la entrada en 256 para poder compararla
TCNT1 = 0; //se resetea el timer
}

//si cuadra la comparacion del contador se dispara el TRIAC
ISR(TIMER1_COMPA_vect){
  digitalWrite(GATE,HIGH); //se dispara l TRIAC
  TCNT1 = 65536-PULSE; //Se setea el ancho del pulso
}

//
ISR(TIMER1_OVF_vect){
  digitalWrite(GATE,LOW); //se apaga (LOW) el pin de disparo
  TCCR1B = 0x00; //se desabilita el timer por posibles acciones de disparo hasta nueva
deteccion de cruce por cero
}

// se declara la funcion de interrupcion para el conteo de # de pulsos generados por caudal
void caudal (){
  pulsos++;
}

void loop(){

  //se detecta el modo de operacion de la Ducha
  estado_boton = digitalRead(boton);
  // si se encuentra en estado ECO
  if (estado_boton == HIGH){

//se cuenta los litros consumidos
  if (pulsos > 0){
    pultotal += pulsos; //almacena el numero de pulsos totales
    lmin = pulsos/7; // mido cada segundo el caudal (l/min)
    pulsos = 0; //reseteo la variable para seguir contabilizando los pulsos
    litros = pultotal*1.0/400; // 1 Litro equivale a 450 pulsos segun datasheet de FL 408

    // Secuencia para indicar el consumo de agua al usuario mientras se baña
    if (litros < 10){
      digitalWrite(verde, HIGH);
    }
    else if (litros > 10 && litros < 20){
      digitalWrite(verde, LOW);
      digitalWrite(amarillo, HIGH);
    }
    else if (litros > 20 && litros < 30){
      digitalWrite(amarillo,LOW);
      digitalWrite(naranja, HIGH);
    }
    else if(litros > 30){

```

```

    digitalWrite(naranja, LOW);
    digitalWrite(rojo, HIGH);
  }
}

if(millis() - ta >460){

//actualizo el tiempo
ta = millis();

// INICIALIZO OPERACIONES PARA LECTURA DEL SENSOR DE DISTANCIA
    digitalWrite(trigger,HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigger,LOW);
    t = (pulseIn(echo,HIGH)/2);
    dist = float(t*0.0342);

    //si el usuario sale del choro del agua se cierra el flujo del agua
    if(dist >= 90){
        digitalWrite(valvula, HIGH);
        OCR1A = 505; // para evitar quemar la niquelina se apaga la misma
        t1 = millis();
        litros1 = 1.2*(t1/60000); //litros ahorrados
    }

    //si el usuario esta abajo del chorro de agua
    else if(dist < 90){
        digitalWrite(valvula,LOW);
    }

//adquiero temperatura
    value = analogRead(sensor);
    delay(10);
    value = analogRead(sensor);
    delay(10);

    Input = ((value/1024.0)*5000)/10; //factor de conversion del lm35 segun datasheet

// se lee el setpoint deseado del usuario
    Setpoint = analogRead(pot);
    delay(10);
    Setpoint = analogRead(pot);
    delay(10);

    Setpoint = map(Setpoint, 0, 1023, 15, 35);

//se acciona el algoritmo del PID
    myPID.Compute();
    Output = map(Output, 0, 255, 505, 30);
    OCR1A = Output;// a la variable del comparador se asigna el valor calculado de

```

```

compensacion por el PID
}

// Muestro datos procesados
Serial.print("Temperatura actual es: ");
Serial.print(Input);
Serial.print(" SETPOINT: ");
Serial.print(Setpoint);
Serial.print(" Pulsos totales: ");
Serial.print(pultotal);
Serial.print(" Litros/min: ");
Serial.print(lmin);
Serial.print(" Litros Consumidos: ");
Serial.print(litros);
Serial.print(" Litros Ahorrados: ");
Serial.println(litros1);
}
}

//Si se encuentra en estado normal (no eco)
else if(estado_boton == LOW){

//se cuenta los litros consumidos
  if (pulsos > 0){
    pultotal += pulsos; //
    lmin = pulsos/7; // mido cada segundo el caudal
    pulsos = 0;
    litros = pultotal*1.0/400;// 1 Litro equivale a 450 pulsos

// Secuencia para indicar el consumo de agua al usuario mientras se baña
    if (litros < 10){
      digitalWrite(verde, HIGH);
    }
    else if (litros > 10 && litros < 20){
      digitalWrite(verde, LOW);
      digitalWrite(amarillo, HIGH);
    }
    else if (litros > 20 && litros < 30){
      digitalWrite(amarillo,LOW);
      digitalWrite(naranja, HIGH);
    }
    else if(litros > 30){
      digitalWrite(naranja, LOW);
      digitalWrite(rojo, HIGH);
    }
  }
}

if(millis() - ta > 460){

```

```
//actualizo el tiempo
ta = millis();

//adquiero temperatura
value = analogRead(sensor);
delay(10);
value = analogRead(sensor);
delay(10);

Input = ((value/1024.0)*5000)/10; //factor de conversion del lm35 segun datasheet

// se lee el setpoint deseado del usuario
Setpoint = analogRead(pot);
delay(10);
Setpoint = analogRead(pot);
delay(10);

Setpoint = map(Setpoint, 0, 1023, 38, 15);

//se acciona el algoritmo del PID
myPID.Compute();
Output = map(Output, 0, 255, 505, 30);
OCR1A = Output;

//MUESTRO datos procesados
Serial.print("Temperatura actual es: ");
Serial.println("Input");
Serial.print(" SETPOINT: ");
Serial.print(Setpoint);
Serial.print(" ANG DISP: ");
Serial.print(" Pulsos totales: ");
Serial.print(pultotal);
Serial.print(" Litros/min: ");
Serial.print(lmin);
Serial.print(" Litros Consumidos: ");
Serial.println(litros);

}
}
}
```

ANEXO B: PLACA IMPLEMENTADA

