

1 Principio de funcionamiento

Control por ángulo de fase

El control de potencia en corriente alterna consiste en aplicar a la carga una porción de cada semicírculo de voltaje de línea de manera simétrica; mientras menor es la porción, menor es la potencia transferida a la carga (1). Esta porción está en relación al ángulo de fase.

El control de fase es el método más común para controlar potencia utilizando tiristores (2).

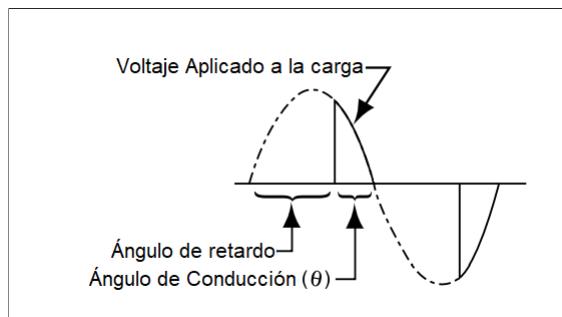


Fig. 1: Onda Senoidal Mostrando principios del control de fase

En la figura 1 se ilustra la forma de onda del voltaje de línea y se muestran términos comúnmente utilizados para describir la operación de los tiristores. El ángulo de retardo es el tiempo durante el cual el tiristor bloquea el flujo de corriente del voltaje de línea, el ángulo de conducción es el tiempo durante el cual el tiristor es activado y permite el flujo de corriente a través de la carga (2).

Después de un cruce por cero el tiristor es encendido a través de una señal de control recibida en la compuerta y automáticamente se apaga cuando su corriente llega al valor de 0. Mientras la señal de control no es recibida, el tiristor bloquea todo el flujo de corriente; este comportamiento es el mismo tanto para el semicírculo positivo como para el semicírculo negativo. Solo hay algunas limitaciones para encender el tiristor alrededor del cruce por cero, cuando la corriente no es suficiente, cuando dicha corriente es menor a la corriente de enganche del tiristor, provocando que la potencia de la carga no pueda ser regulada perfectamente de 0 a 100 % (3).

2 Ventilador

El sistema de ventilación tiene dos propósitos: enfriar y distribuir (forzar convección). Una solución muy simple puede ser un ventilador corriendo continuamente a toda velocidad. Aunque esta solución cumple con el propósito, tiene la desventaja de consumir mucha potencia y generar mucho ruido. Un uso más eficiente es ajustar la velocidad del ventilador de acuerdo a las condiciones del sistema. Resultando en un sistema de lazo cerrado, donde el ventilador intenta mantener estable las condiciones del sistema mediante el ajuste de su velocidad.

3 Diagrama a bloques del sistema

Control de fase

El elemento principal para realizar el control de fase es el microcontrolador MSP430G553 que controla al triac. La sincronización requerida para encender el triac al mismo tiempo para cada semicírculo es provista por la detección

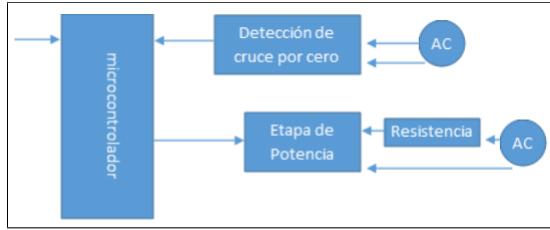


Fig. 2: Diagrama de bloques

del cruce por cero. El microcontrolador detecta el cruce por cero después del final de cada semiciclo de la señal de entrada y ajusta el tiempo de retardo para encender el triac en relación con el porcentaje de potencia requerida. De manera que la fase pueda ser manipulada externamente, se usa como referencia el valor de potencia requerido. La fuente de alimentación para este circuito no está integrada a este módulo.

Ajuste de velocidad del ventilador

El sistema es realizado utilizando el microcontrolador MSP430 para controlar la velocidad del ventilador usando una salida de pwm, según sea solicitado por el control principal.

4 Descripción del circuito

Se usa un triac para poder controlar la potencia entregada al calefactor alimentado con el voltaje de línea de 120 VAC. El dispositivo a cargo para activar el triac es un MOC3011. Que tiene una corriente de activación para el LED $I_{FT} = 10\text{mA}$ y capaz de tolerar, en sus terminales de salida, hasta $V_{DRM} = 250\text{V}$. El triac utilizado, BTA16, tiene una corriente RMS en estado encendido $I_T(\text{RMS}) = 16\text{ amps}$ a $T_C = 25^\circ\text{C}$. La carga es un alambre de níquel-cromo cubierta con acero inoxidable y rellena con óxido de magnesio para tener un aislamiento eléctrico (industrialmente denominada resistencia tubular y ampliamente utilizados para la calefacción de aire), que produce temperaturas de hasta 650°C .

Aislamiento óptico

Para evitar sobretensiones y subidones de corriente, evitar transitorios que puedieran dañar al microcontrolador. Es también una interfaz entre el circuito de control y la carga de potencia

Alimentación

El microcontrolador y los dispositivos electrónicos de esta etapa son alimentados por la fuente principal. 3.3V para el microcontrolador y 5V para los periféricos.

Detector de cruce por cero

El optoacoplador H11AA1 está diseñado para el monitoreo de señales de corriente alterna. Cuando la corriente de entrada supera la $I_F = 10\text{mA}$, uno de los dos ledes infrarrojos enciende y permite la conducción de Colector a Emisor en el fototransistor. El fototransistor NPN está conectado en el colector a una resistencia de pullup para generar una señal invertida; esta señal de salida son los pulsos que indican al microcontrolador cuando un cruce por cero sucede.

Activación aislada del Triac

Desde el microcontrolador se envía una señal lógica al transistor que sirve como interfaz para el sistema alimentado a 5 V. Cuando se envía un uno lógico la corriente a través del led emisor del MOC3011 es suficiente para encenderlo, se permite el paso de corriente en la compuerta del triac BTA16, activando el estado de conducción.

Ajuste de velocidad del ventilador

La salida de pwm se aplica al ventilador a través de un transistor, que realiza la función de interfaz entre los 3.3V del microcontrolador y los 24V que alimentan el ventilador.

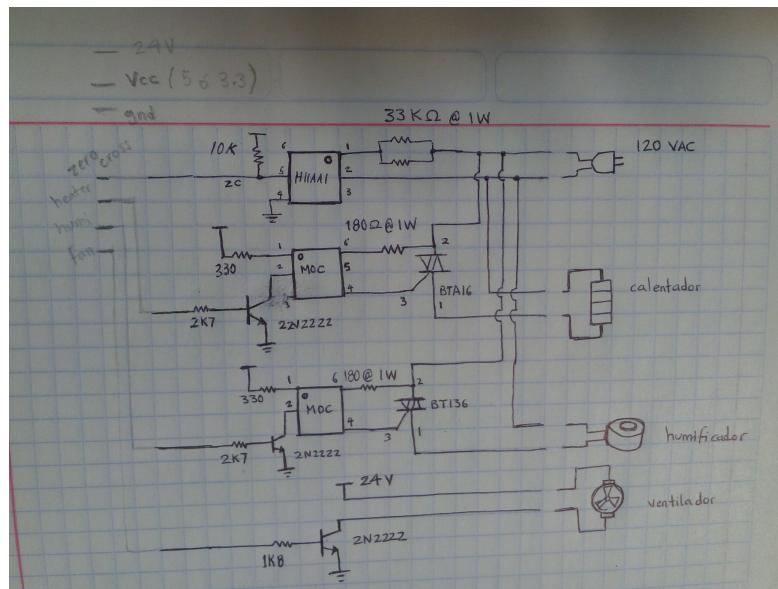


Fig. 3: Esquema del circuito

5 Software

CONTROL DE FASE

Una vez detectado el cruce por cero lo que se hace internamente por software mediante una conversión se calcula el tiempo de espera para activar el triac en modo de conducción.

El software está escrito en lenguaje C. Este está compuesto de varias funciones, pero las funciones principales necesarias para la operación apropiada del control de fase reside en: `main()`, `Zero_Cross_Interruption()`, `TA0_ISR()`

El principio de funcionamiento del TRIAC descrito en la sección 1 para controlar la resistencia calefactora es ENCENDER el TRIAC exactamente en el mismo tiempo en ambos semicírculos de la onda senoidal. El TRIAC se cierra automáticamente cuando ocurre la detección del cruce por cero.

La idea principal del software es sincronizar el temporizador interno del microcontrolador MSP430G2553 con los eventos de cruce por cero generados a partir de la onda senoidal del voltaje de red. El pulso que indica la ocurrencia de el cruce por cero es aplicado en el pin P1.3 el cual está configurado como entrada de interrupción en una configuración de pull-up.

AJUSTE DE VELOCIDAD DEL VENTILADOR

El software tiene 4 niveles de velocidad definidas por el sistema (estoy incluyendo: apagado). Cada nivel es representado por un valor hexadecimal asignados por conveniencia. Cada nivel de velocidad es solicitado por el control principal mediante un dato recibido por comunicación serial. Por ejemplo, si el valor 0x82 es recibido, indica que el sistema debe estar al nivel de velocidad 2.

Main

Después de que el microcontrolador es encendido o reiniciado, todos los perifericos utilizados (Puertos, Temporizador y UART) son configurados en este función. Después todas las variables son inicializadas y el microcontrolador queda en un modo de bajo consumo.

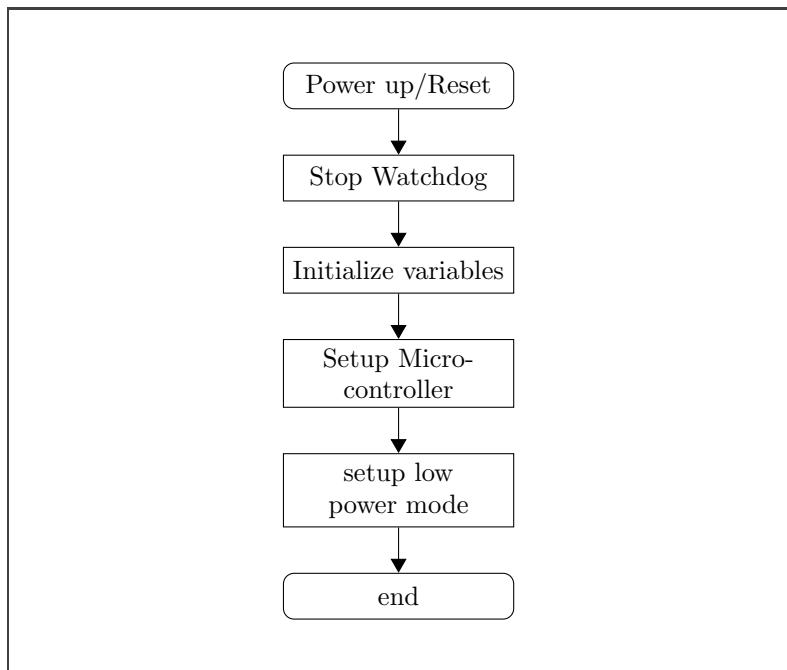


Fig. 4: Diagrama de flujo principal

Interrupción por puertos

Cuando el evento de cruce por cero ocurre se genera una interrupción. El funcionamiento de esta interrupción es controlado en este módulo por la rutina de interrupción `_interrupt void Zero_Cross_Interruption(void)` la cual comprueba que suceda una transición de estado alto a estado bajo, en el pin 3 del puerto 1 (P1.3). Este pin es configurado como entrada de interrupción que está configurado como pull up. Al ocurrir la interrupción la variable `ZeroCross_occurred` es encendida.

La función de comparación es entonces sincronizada con el evento de cruce por cero.

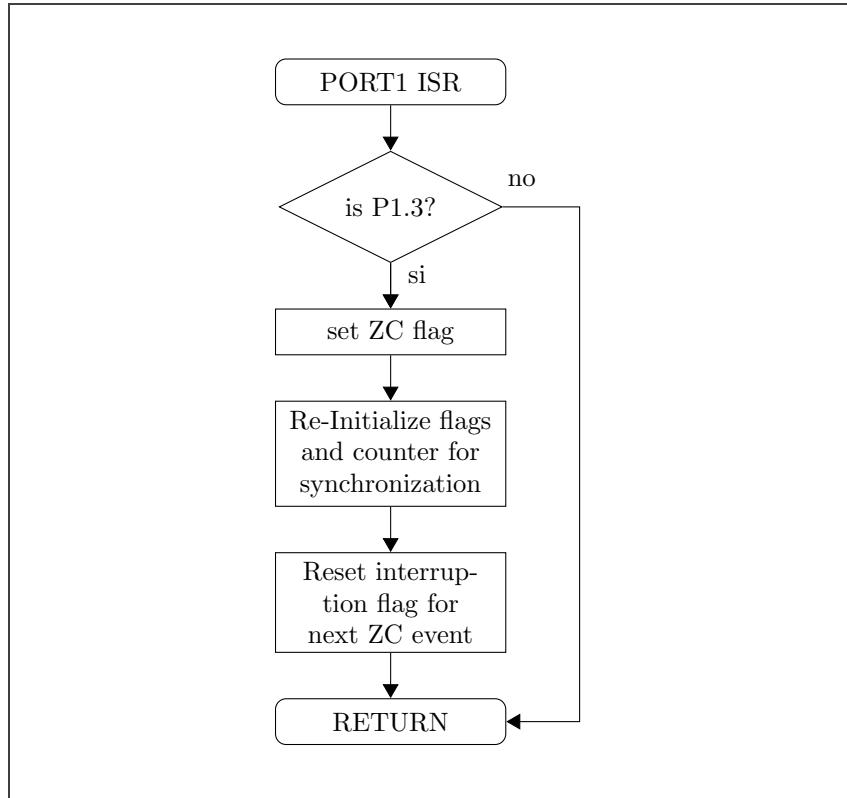


Fig. 5: flujo int puertos

Interrupción del temporizador

El temporizador timerA0 es configurado en modo continuo y realiza la función de ser el contador principal de tiempo. Esta interrupción es manejada en la rutina de interrupción TAO_ISR(void). Esta rutina genera la base de tiempo de 0.2ms, la activación del TRIAC. la rutina de verificación para reiniciar el contador.

La rutina de interrupción TAO_ISR(void) es ejecutada cada 0.2 ms.

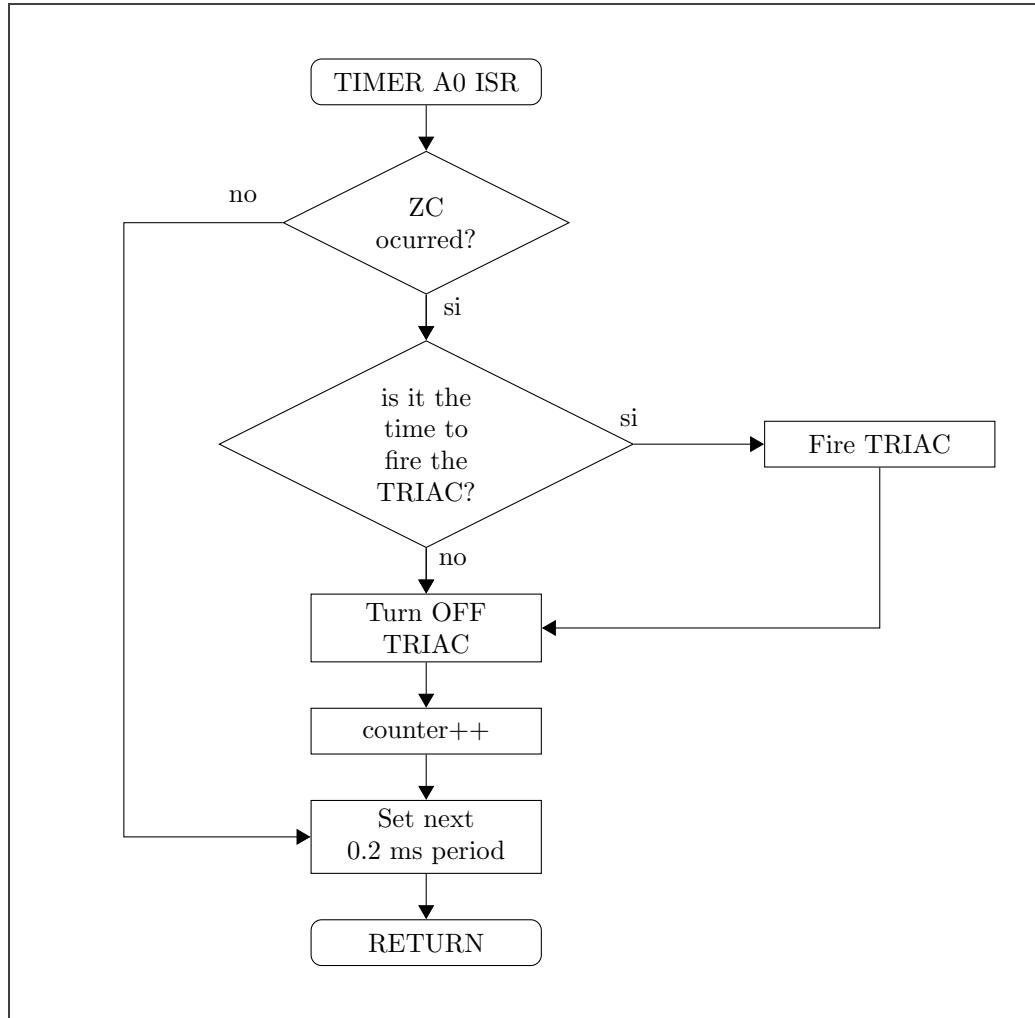


Fig. 6: flujo int timer

6 Cálculos

6.1 Cruce por cero

Para encender los ledes infrarrojos del H11AA1 hay que satisfacer los requisitos especificados en su hoja de datos. Para superar el valor mínimo de $I_F\text{min} = 10\text{mA}$.

$$R_{zc\max} = \frac{V_{R_{zc}}}{I_{F\min}} = \frac{V_p - V_F}{I_{F\min}} = \frac{120\sqrt{2}V - 1.2V}{10mA} = 16.8505k\Omega \quad (1)$$

$$R_{zc\min} = \frac{V_{R_{zc}}}{I_{F\max}} = \frac{V_p - V_F}{I_{F\max}} = \frac{120\sqrt{2}V - 1.2V}{50mA} = 3.3k\Omega \quad (2)$$

Se elige un valor cercano al valor máximo de resistencia para optimizar protección y vida útil del Led emisor.

La potencia disipada por la resistencia limitadora está dada por:

$$P_{R_{zc}} = (R_{zc})(I_F)^2 = (16.5K\Omega)(10mA) = 1.65W \quad (3)$$

En valores éstandar, 16kΩ para 2 W, sería lo ideal. Pero la variedad de valores de resistencia de potencia es restringida, como solución se propone un arreglo de resistencias. Con un arreglo paralelo de dos resistencias con valor éstandar de 33k se obtiene un valor resultante de 16.5kΩ; disipando cada una 0.8425W.

6.2 Disparo del Triac y el optoacoplador que le controla

La interfaz para el triac de potencia BTA16 es el MOC3011. Tiene una corriente de activación para el LED I_{FT} de 10 mA y un voltaje de estado apagado en las terminales de salida V_{DRM} de 250 V.

Se elige un valor para I_{FT} suficiente para activar y mandar la señal de activación al triac BTA16 correctamente, se eligió un valor de 15 mA.

Un transistor NPN 2N2222 es la interfaz entre el pin de salida del microcontrolador y la entrada del optoacoplador MOC3011; en base a su hoja de datos:

$V_F = 1.5V$, $I_{FT} = 15mA$ del MOC3011; $V_{CE(sat)} = 0.3V$ del NPN 2N2222

$$R_Cmin = \frac{V_{CC} - V_F - V_{CE(sat)}}{I_{FT}} = \frac{5V - 1.5V - 0.3V}{15mA} = 213.33\Omega \quad (4)$$

$$P_{R_C} = R_C \cdot I_F^2 = (213.33\Omega) \cdot (15mA)^2 = 47.9992mW \quad (5)$$

Un valor éstandar de 330 ohm con tolerancia de 10%, a 1/4 W es suficiente.

$$I_B = \frac{I_C}{hFE} = \frac{15mA}{10} = 1.5mA \quad (6)$$

$$R_Bmin = \frac{V_{out} - V_{BE(sat)}}{I_B} = \frac{3.3V - 0.6V}{1.5mA} = 1.8k\Omega \quad (7)$$

$$P_{R_B} = R_B \cdot I_B^2 = (1.4k\Omega) \cdot (1.5mA)^2 = 3.15mW \quad (8)$$

Se eligió valor de 2.7K ohm con una tolerancia de 10%, a 1/4 W.

Resistencia Limitadora de corriente para la compuerta

Esta resistencia limita la corriente pico que circula a través de la salida del optoacoplador. Su valor mínimo se calcula así:

$$R_{min} = \frac{V_{pkmax}}{I_{max}} = \frac{170V}{1.2A} \approx 150\Omega \quad (9)$$

Por lo que se elige una resistencia, con valor estándar, de 180 ohm para la resistencia limitadora.

Disipación de potencia del TRIAC

Calcular la máxima salida de potencia (carga máxima) es una de las tareas más importantes en este diseño, y la capacidad de potencia depende principalmente del TRIAC que se usa. La capacidad actual del TRIAC limita la máxima salida de potencia.

El BTA16-600V es un triac de 16 A. El triac es de tipo snubberless, por tanto no se necesitara ningún circuito de amortiguación como protección. Además de que la carga es resistiva.

Córriente en la carga

La potencia máxima de salida en la aplicación (800W), por lo que el flujo de corriente RMS a través del TRIAC para un 800 W es 6.66 A.

$$I = \frac{P_{LOAD}}{V_{IN}} = \frac{800}{120} = 6.6666A \quad (10)$$

6.3 Ventilador

El ventilador se alimenta a 24 Vdc. Un simple transistor BJT sirve de interfaz entre la salida del microcontrolador a 3.3 V y los 24 V. Se eligió un 2N2222, cuyas características son: $V_{CE(sat)} = 0.3$ V del NPN 2N2222; y teniendo en cuenta que $I_C = I_{fan}max = 0.25$ Amps.

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{fan} - V_{CE(sat)}}{I_{fan}} = \frac{24V - 24V - 0.3V}{250mA} \approx 0\Omega \quad (11)$$

La caída de voltaje en el ventilador es aproximadamente el total de la fuente de alimentación y la caída de voltaje colector-emisor es despreciable, por tanto no es necesario utilizar una resistencia limitadora de corriente para la carga.

$$I_B = \frac{I_C}{hFE} = \frac{250mA}{10} = 25mA \quad (12)$$

$$R_B = \frac{V_{out} - V_{BE(sat)}}{I_B} = \frac{3.3V - 0.6V}{25mA} = 1.8k\Omega \quad (13)$$

$$P_{R_B} = R_B \cdot I_B^2 = (1.4k\Omega) \cdot (1.5mA)^2 = 3.15mW \quad (14)$$

Se elige un valor de 2.7K ohm con una tolerancia de 10%, a 1/4 W.

References

- [1] J. U. Oscar Núñez, “Un controlador de potencia para corriente alterna.”
- [2] “Phase control using thyristors (littelfuse application note an1003).”
- [3] “Universal motor speed control and light dimmer with triac and st7lite microcontroller (application note an2263).”