

Estrategia de control para un sistema por absorción activado con energía solar-biomasa

Adolfo Ruelas, Nicolás Velázquez, Carlos Villa, Mydory Nakasima, Aníbal Luna

Centro de estudios de las Energías renovables, Instituto de Ingeniería

Universidad Autónoma de Baja California

Mexicali, B. C., México

[ruelasa, nicolas.velazquez, villac, mydory.nakasima, anibal]@uabc.edu.mx

Abstract— In this paper proposing a hydraulic circuit and automation that allows the cooling unit to operate in three different ways. With solar energy, with the system cold storage and a direct fire. The theoretical study was performed using the dynamic simulation of the cooling system in the TRNSYS environment v.16, which allowed us to evaluate the performance of the air conditioning system operated with the proposed control algorithm. The results showed that the use of hydraulic configuration and the control system helped only 30% using the direct fire operation with respect to a conventional configuration. Concluding that the control strategy and the hydraulic circuit or system configuration, can operate in modes of operation proposed, in addition to reducing the use of direct fire.

Keyword— *Simulation, Absorption, Solar, TRNSYS.*

Resumen— En este documento se contempla la propuesta de un circuito hidráulico y su automatización que permite operar la unidad de enfriamiento en tres diferentes formas: Con energía solar, con el sistema de almacenamiento de frío y a fuego directo. El estudio teórico fue realizado mediante la simulación dinámica del sistema de enfriamiento en el entorno de TRNSYS v.16, que permitió evaluar el comportamiento del sistema de climatización operado con el algoritmo de control propuesto. Los resultados arrojaron que el uso de la configuración hidráulica y el sistema de control ayudo a utilizar solo un 30% la operación de fuego directo con respecto a una configuración convencional. Concluyendo que la estrategia de control y el circuito hidráulico o configuración del sistema, puede operar en los modos de operación planteados, además de disminuir el uso de fuego directo.

Palabras claves— Simulación, Absorción, Solar, TRNSYS.

I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones de temperatura extremas que podemos encontrar en algunas localidades, como lo es en el caso Mexicali. B.C., y la exigencia del confort humano para realizar actividades cotidianas, impulsaron el desarrollo de tecnologías de climatización de espacios. La demanda de energía eléctrica con tarifas elevadas y además la contaminación del medio ambiente que provoca el aumento del calentamiento global, son provocados en gran medida por la utilización de tecnologías convencionales, comúnmente conocidos como aire acondicionado ó refrigeración. Desde hace algún tiempo y fundamentalmente tras la crisis energética, se ha visto un creciente interés por el aprovechamiento de fuentes energéticas no explotadas hasta ahora, uno de los casos es la energía solar[1]. La producción de frío ha ocupado para la conservación de alimentos perecederos y la climatización de espacios, representan una demanda importante de energía para los diferentes países[2]. La tecnología de sistemas de absorción puede ser utilizada en aire acondicionado y refrigeración para los sectores residencial, comercial e industrial[3]. El acoplamiento entre el campo solar y la máquina de absorción presentan serias deficiencias que las invalidan para valorar el comportamiento real de la instalación, por un lado, la ausencia de un sistema de control que modifique las condiciones de operación para funcionar continuamente en el máximo Coeficiente de Operación (COP, iniciales de las palabras Coeficient Of Performance), hacen que el valor de este parámetro se aparte del óptimo[4]. En la Escuela Superior de Almería de Ingenieros de Sevilla, España instalaron un sistema de climatización solar, donde se empleó un controlador tipo PID (Proporcional Integral y Derivativo) que, en general dio buenos resultados,

aunque se presentaron dificultades debido a la inercia de la temperatura ocasionada por la naturaleza del sistema[5]. El control de una planta de enfriamiento solar es un problema complejo, en el que interviene un número significativo de variables cuyo entorno de operación esta sujeto a condiciones climatológicas. Zambrano y Camacho [6] plantean y simulan un algoritmo de optimización multi-objetivo donde se selecciona el modo de funcionamiento de una planta para la minimización de costos, el algoritmo es una herramienta útil para el manejo de procesos, sin embargo su uso fue limitado debido a que toma mucho tiempo para el cálculo y el número de iteraciones que se realizan. Tres años más tarde, Corchero et al.[7] aplicaron técnicas de control robusto (H_{∞}) en una planta solar para producir frío, el control se basa en la regulación de la temperatura de salida de los colectores solares, con la cual es alimentado un equipo por absorción para la climatización de espacios, la implementación del controlador se realizó mediante una computadora y el software Simulink de Matlab. En Puerto Rico desarrolló un sistema de control de temperatura, aplicado en un sistema de aire acondicionado solar, para regular la temperatura se utilizó un controlador clásico Proporcional e Integral (PI), el cual fue implementado mediante una computadora, un sistema de adquisición de datos y el conocido software de Labview, el autor comenta que al reducir el flujo de agua entre las líneas de el equipo de absorción y el tanque de almacenamiento térmico, es posible extender el tiempo de operación de la unidad de enfriamiento operado con almacenamiento térmico mientras se mantiene el confort establecido, demás, para fines comerciales, la estrategia de control puede ser implementada en un microcontrolador[8]. Al siguiente año Núñez et al. [9] presentan la aplicación de un modelo de control predictivo para controlar la temperatura de una planta solar. La sintonización del sistema fue simple y se buscó un compromiso entre la robustez y el rendimiento. Lygouras et al.[10], implementaron la combinación de un controlador en lógica difusa y un convencional PID para sistemas de aire acondicionado solar, donde controlan la bomba del fluido caloportador entrante al generador y la bomba de la solución de trabajo, la implementación en hardware fue en un microcontrolador de 16 bits, aclarando que este dispositivo no contaba con habilidades especiales para la lógica difusa. En el siguiente año Lygouras et al.[11], trabajaron en el mismo sistema de aire acondicionado solar, solo que en esta ocasión desarrolla un sistema Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, iniciales de las palabras en inglés Multiple In Multiple Out) en un sistema difuso, la implementación del algoritmo se realizó en un microcontrolador de 16 bits. En el mismo año Zetzsche et al.[12], controló un sistema de enfriamiento mediante un Programa Almacenado de Control (SPC, iniciales de las palabras Stored Program Control), el cual conmuta válvulas y bombas para regular flujo y mantener el COP en su máxima eficiencia.

Debido a esto, una de las tendencias de la investigación en el área de climatización en estos últimos años, se ha enfocado en el desarrollo de sistemas de enfriamiento termosolares sustentables. Por esta causa a surgido una propuesta del Centro de Estudios de las Energías Renovables (CEENER) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma Baja California (UABC) para desarrollar una unidad de enfriamiento activada con una fuente de energía híbrida solar-biogás aplicada en la climatización de espacios y consecuentemente el desarrollo de una tecnología innovadora para el remplazo de las tecnologías convencionales. El sistema de climatización solar se compone de una maquina por absorción impulsada a fuego directo, la cual se modifico para trabajar de forma directa con un campo de colectores solares, sin embargo, la configuración hidráulica y el sistema de control propuesto pierde solides, ya que el sistema demanda una mejor gestión para aprovechar al máximo la energía renovable de menor costo. En este documento se presenta la simulación de una estrategia de control para un sistema de aire acondicionado solar, tomando en cuenta que el sistema utiliza energía solar para proveer climatización, capacidad de almacenamiento de frio para utilizarla en climatización y operar el sistema a fuego directo.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de climatización solar se compone de tres subsistemas principales, el primero (1) de ellos genera energía térmica a través de un campo solar o una fuente de energía auxiliar a fuego directo. Que

alimenta a (2) una unidad de enfriamiento encargada de producir el efecto frigorífico, que a través de (3) retira el calor en la vivienda o espacio a climatizar.

A. Unidad de enfriamiento

La maquina de enfriamiento actualmente es comercializada por la compañía Robur con modelo ACF60-00-HT, la cual se basa en un ciclo por absorción con una mezcla amoniaco-agua (NH₃-H₂O), siendo amoniaco el refrigerante. El equipo original se impulsa con una fuente de energía térmica proporcionada por un quemador a fuego directo, sin embargo fue modificada para trabajar con energía solar. Más especificaciones se ilustran en la tabla I.

Tabla I. Información técnica del equipo acf60-00 ht.

<i>Clasificación de operación</i>	<i>Unidades</i>	<i>ACF-60-00 HT</i>
Capacidad d enfriamiento	kW	17.10
Entrada de gas	kW	27.78
COP	-	0.64
Temperatura de Operación	C	0-50
Temperatura del agua refrigerada	C	5-45
Flujo de agua	l/s	0.96-0.88
Refrigerante	-	R717

B. Circuito hidráulico y aire

El fabricante de la unidad de enfriamiento propone una configuración con componentes como: mangueras flexibles (para disminuir vibraciones), dispositivos de protección (filtro de agua y tanque de expansión térmica), instrumentación (para el ajuste del equipo) y un tanque de almacenamiento de no más de 70 litros, que se recomienda para absorber variaciones térmicas del agua que entra al sistema de enfriamiento, con ello se logra disminuir el tiempo de trabajo de la unidad y el consumo de energía. En la figura 1, se ilustra la instalación que se ajusta a las recomendaciones del fabricante, además se agrega un tanque de almacenamiento de frío de 1000 litros, válvulas solenoides y proporcionales, colocadas estratégicamente con el objetivo de re direccionar el flujo entre las tuberías, para operar el sistema en modos de operación.

El circuito de aire es el medio de intercambio de calor entre el espacio a climatizar y el agua fría que proviene del sistema de enfriamiento, este se compone de una unidad manejadora con una capacidad de 17 kW (5 ton) a 2000CFM.

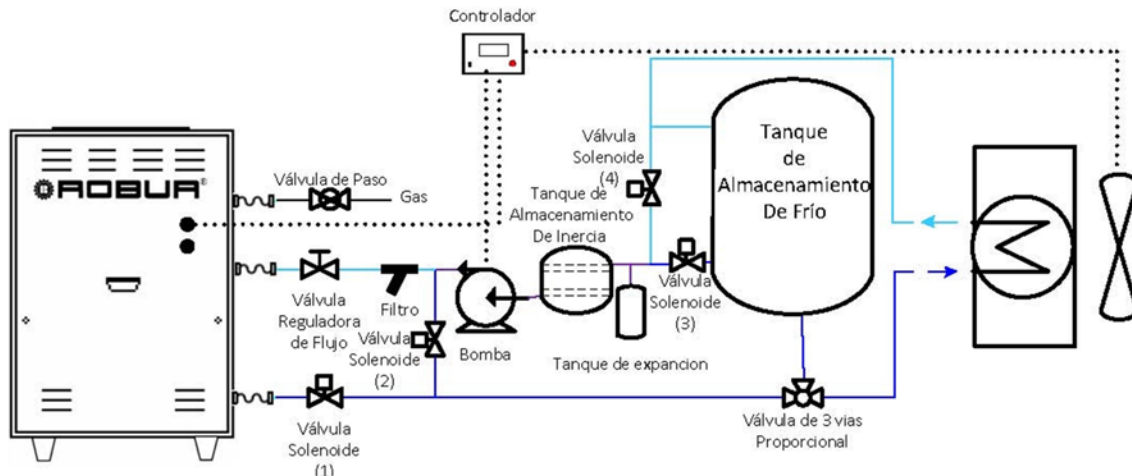


Fig. 1. Configuración propuesta para el circuito hidráulico de agua fría.

C. Funcionamiento y modos de operación

El objetivo principal del sistema de climatización es mantener la temperatura de confort en la vivienda, si su temperatura esta por encima de la referencia del sistema de control, enciende la maquina de absorción, la bomba del circuito de agua fría, la unidad de enfriamiento y la unidad manejadora de aire. La bomba del circuito hidráulico hace circular agua entre la unidad de enfriamiento y la manejadora de aire, con ello la unidad de enfriamiento recibe agua a una temperatura entre los 12.5 y 45°C, si la capacidad de la unidad es suficiente, el agua es expulsada a 5°C, la cual se traslada a la entrada de la unidad manejadora, donde intercambia calor con el aire contenido en el espacio a climatizar, con ello se logra conseguir el efecto frigorífico solicitado. El agua después de absorber calor, puede salir de la manejadora con una temperatura entre 12.5 y 45°C, para ser dirigida nuevamente hacia el sistema de enfriamiento. En el circuito de aire, cuando la temperatura de consigna es alcanzada, el sistema de control envía una señal de apagado hacia la unidad de enfriamiento, de lo contrario la unidad permanece encendida. Sin embargo la operación antes mencionada pierde solidez cuando el sistema de climatización se modifico para trabajar con energía solar, debido a ello la gestión entre las fuentes de energía se vuelve una prioridad importante. Para cumplir con los requerimientos se consideraron los siguientes modos de operación:

- **Modo 0 : El sistema permanece Totalmente apagado:** todos los componentes del sistema de enfriamiento se encuentran desactivados. □ Este modo entra en acción cuando la temperatura de la vivienda esta por debajo de la temperatura de referencia o simplemente el usuario apaga manualmente el sistema de enfriamiento. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla II.
- **Modo 1 : Equipo de absorción como generador de frío para almacenamiento mediante energía solar:** El generador de la unidad opera con el campo de colectores, mientras que el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direcciona el flujo total hacia el tanque de almacenamiento de frío. □ Para activar este modo de operación se verifica la existencia de radiación solar suficiente para activar la máquina por absorción, además de no necesitar climatización en el espacio. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla II.
- **Modo 2 : Equipo de absorción como generador de frío para climatización y almacenamiento mediante energía solar:** El generador de la unidad opera con el campo

de colectores, mientras que el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direcciona porcentajes de flujo hacia la entrada de la unidad manejadora y el tanque de almacenamiento de frío, la decisión se toma en base a la temperatura de referencia de la vivienda. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla II.

Para activar este modo de operación se verifica la existencia de radiación solar suficiente para activar la máquina por absorción.

- **Modo 3 : Climatización del espacio con reserva de frío:** Cuando el recurso solar no es suficiente para activar el equipo por absorción, y a su vez existe reserva de frío, el campo de colectores y el equipo por absorción permanecen sin funcionamiento, por lo que se utiliza el tanque de almacenamiento para satisfacer la demanda de agua fría de la manejadora, con el objetivo de brindar confort en la vivienda. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla II. Este modo solamente es activado si el modo 2 no se cumple, además es necesario contar con reserva de frío.
- **Modo 4 : Equipo de absorción como generador de frío para climatización y almacenamiento con fuego directo:** El generador de la unidad opera a fuego directo mientras el evaporador le retira calor al agua del circuito hidráulico, y por medio de la válvula proporcional de 3 vías se direccionan porcentajes de flujo hacia la manejadora y el tanque de almacenamiento según sea la demanda de frío, la decisión se toma en base a la temperatura de referencia de la vivienda. Esto se hace con el fin de evitar las numerosas conmutaciones de encendido, a causa de un controlador convencional on-off en el equipo Robur, es decir, la unidad no esta diseñada para trabajar a cargas parciales, sólo puede ser encendida o apagada, esto induce a un apagado constantemente al llegar al punto de consigna. En el lapso en el que el equipo es apagado, el ciclo de enfriamiento tiende a un equilibrio térmico, lo que provoca flujos de calor al exterior e igualaciones de presiones internas que se traducen en pérdidas de energía. Para evitar lo antes mencionado, el equipo se somete a la carga provocada por la vivienda y el tanque de almacenamiento, con ello se obliga al sistema de enfriamiento a trabajar a plena potencia, generando periodos de trabajo más amplios al operar con biogás y tanque de almacenamiento, al mismo tiempo se reducen las perdidas de energía que ocasiona la frecuencia de oscilación entre encendido y apagado. La apertura de las válvulas solenoides se puede ver en la tabla II.
- Este modo de operación entra en acción si no se cumple el modo 2 y 3.

Tabla I. Tabla de verdad de las válvulas solenoides del circuito hidráulico propuesto.

Modo	V1	V2	V3	V4
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1
2	1	0	0	1
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1

Con los modos de operación ya mencionados, el sistema incrementa la fracción solar durante la operación, así como el manejo eficiente de energía sin perder el nivel térmico que se desea obtener.

III. SIMULACIÓN EN TRNSYS STUDIO

TRNSYS es un ambiente completo y amplio para simular sistemas en el estado transiente, con una trayectoria desde hace más de 25 años, utilizado por ingenieros e investigadores alrededor del mundo para estudiar nuevos relacionados con el consumo de energía, que va desde un simple calentamiento de agua doméstico hasta la simulación de grandes plantas y equipos, incluyendo estrategias de control y las principales fuentes de energías limpias. TRNSYS contiene una amplia librería de equipos basados en modelos matemáticos y resultados experimentales, cada modulo se manejan como una caja negra con entradas y salidas llamados Types, también permite la creación de estos módulos en lenguajes como C, Fortran, Pascal, etc. En las librerías de TRNSYS no existe un sistema de enfriamiento operado a fuego directo y con energía solar, por esta razón, el campo de colectores no se incluye en la simulación, sin embargo se considera que cuando hay una radiación mayor a 400w/m2 el sistema opera con energía solar, cuando se baja de esta referencia el sistema opera a fuego directo. La simulación del enfriamiento operado a fuego directo se llevo a cavo mediante el Type655 siendo un sistema de climatización enfriado por aire, el cual se conforma por un modelo simplificado que se basa en un híbrido entre ecuaciones y resultados experimentales[13]. Para obtener un comportamiento real en la localidad donde se quiere evaluar el equipo, se utiliza un modulo capaz de leer archivos de formato TMY (type109), este tipo de archivo contiene información climatológica de un año típico de Mexicali B.C., en intervalos horarios, además se agregan módulos como la carta psicrométrica (Type33e) para el cálculo de otras propiedades.

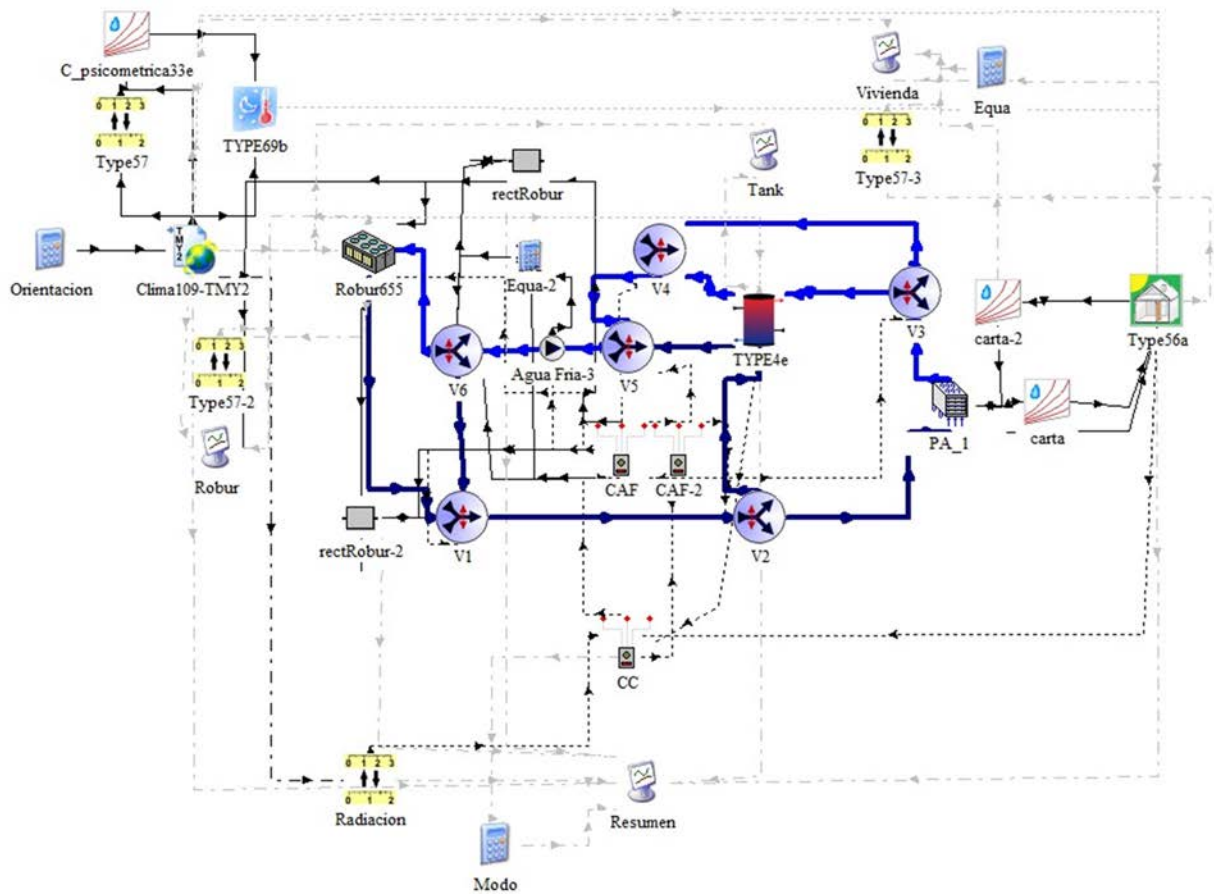


Fig. 2. Configuración del sistema bajo el entorno de simulación TRNSYS.

La demanda de enfriamiento proviene de una vivienda representada por el type56 que simula el comportamiento térmico de las diferentes zonas de la vivienda, a partir un archivo creado con la herramienta TRNBuild que requiere parámetros como lo es, el área del envolvente de la vivienda y propiedades de los materiales constructivos. La vivienda simulada consistió de un espacio de 10m×10m×2.5m con una carga térmica nominal de 13.6 kW (4 toneladas) con un máximo de 17 kW (5 toneladas). El medio de intercambio de calor entre el espacio a climatizar y el agua fría proveniente del sistema de enfriamiento o del almacenamiento de frío, se utilizó el módulo type32, que funciona como una manejadora de aire con los parámetros de un equipo comercial marca Carrier modelo 50RHC, con 17 kW (5 toneladas) capacidad. La interconexión de los componentes del sistema final bajo entorno de simulación se muestra en la figura 2.

El circuito de agua fría se modelo con un tanque estratificado (type4e) de 4 etapas, para las válvulas solenoides se eligieron diversores, ya que en la simulación no es valido bloquear una corriente de agua y esta tiene que ser re direccionada al mismo punto para que los resultados no se vean afectados, por ello se considero hacer algunas conexiones estrás para representar al máximo la configuración física. En la tabla III, se muestra un resumen de los módulos que conforman el circuito hidráulico y en la tabla IV, se pueden observar componentes adicionales que facilitaron el análisis de la simulación. Tanque de almacenamiento y válvulas

Tabla II. Módulos contenidos en el circuito hidráulico de agua fría.

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>#type</i>
1	Bomba	3d
3	Mezclador	11d
3	Diversor	11f
1	Tanque de almacenamiento de frio	4e
1	Manejadora de aire	32

Tabla III. Módulos de uso general utilizados en la simulación.

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>#type</i>
4	Conversor de unidades	57
3	Carta psicométrica	33e
3	Lector TMY	109
1	Graficador	65a
1	Editor de ecuaciones	-

TRNSYS nos proporciona una serie de módulos para crear proyectos generales y específicos, de los cuales se pueden usar o adaptar según sea el caso, sin embargo, con la estrategia de automatización y control propuesta no se dispone de un type capaz de proporcionar el control de válvulas con el comportamiento deseado, por lo que hubo la necesidad de desarrollar el modulo que ejecuta algoritmo de control mostrado en la figura 3, el cual se codifico en el lenguaje de programación Fortran, bajo las normas de TRNSYS. La decisión para cambiar entre cada modo de operación es tomada de acuerdo a la temperatura de la vivienda y la disponibilidad del recurso solar. TRNSYS. según sea el modo de operación.

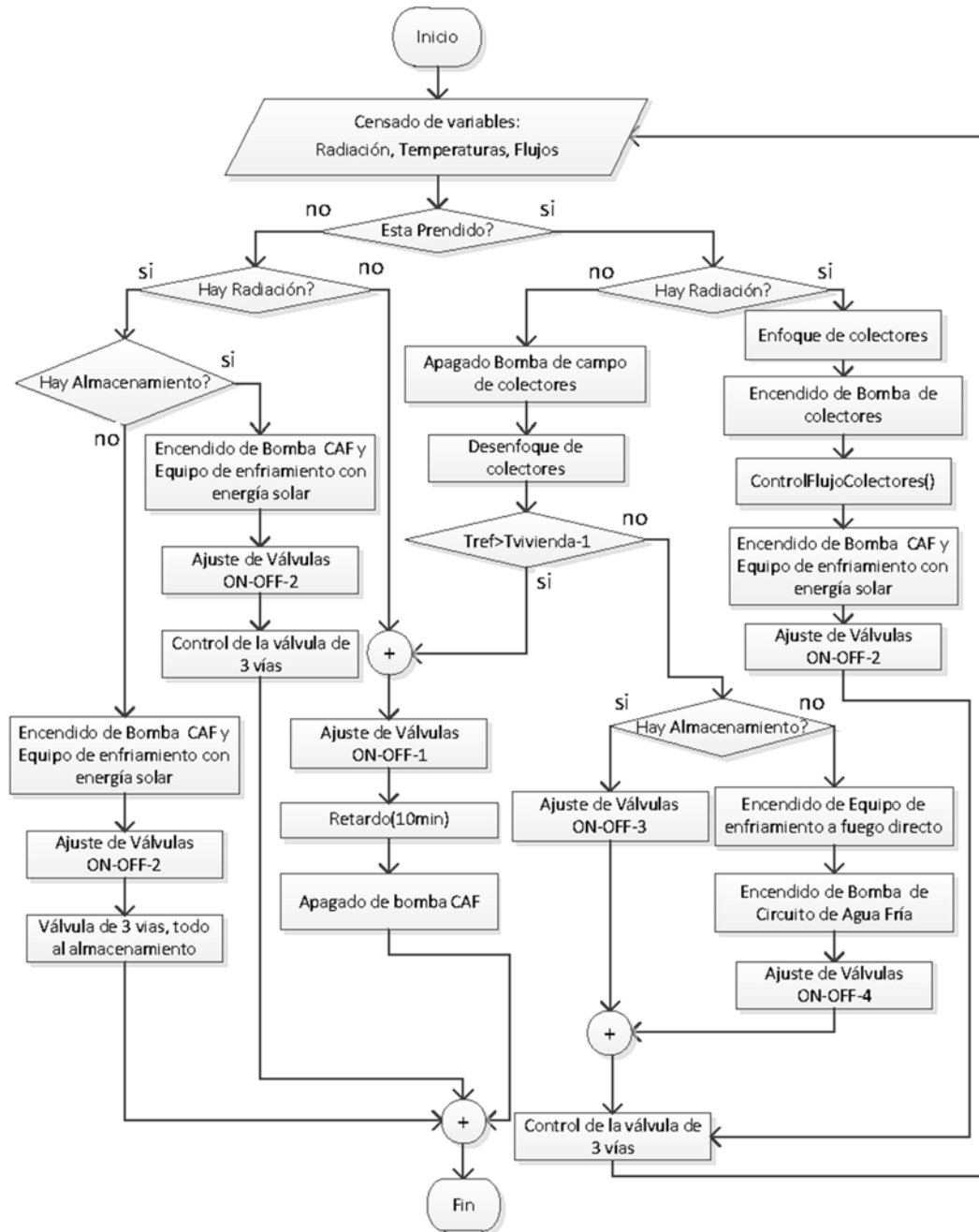


Fig. 3. Diagrama de flujo del algoritmo de automatización y control.

IV. ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

El sistema de climatización junto con el sistema de automatización y control se simuló bajo tres diferentes condiciones iniciales en la temperatura del espacio a climatizar, con un punto de consigna de 25°C y con temperatura de 5°C en el agua del tanque de almacenamiento. La simulación se realiza a lo largo de las 24hrs, de un día que se alcanza una temperatura cerca de los 42°C y una radiación de 900W/m².

La primera corrida con una temperatura inicial de la vivienda a 15°C, se realiza con el objetivo de operar el sistema sin carga térmica durante las primeras horas, para prestar atención en el procedimiento de arranque del sistema de control. En la figura 3a se observa que el controlador se encuentra inactivo en las primeras horas, debido a que la temperatura de la vivienda continúa por debajo del punto de consigna, si no hasta la 7:00 horas donde el sistema de control decide encender el equipo de enfriamiento, como aun no se cuenta con carga térmica en la vivienda el sistema control entra en modo 1, para almacenar energía solar por medio de agua fría.

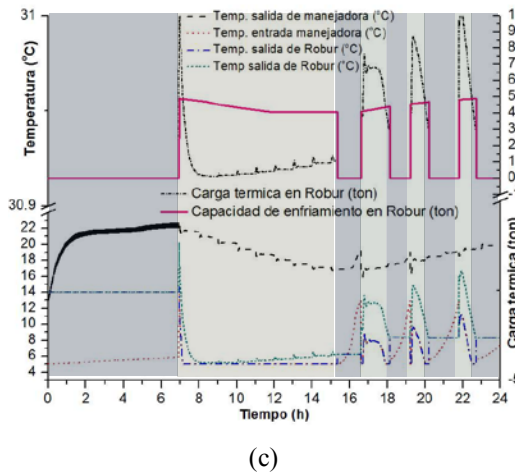
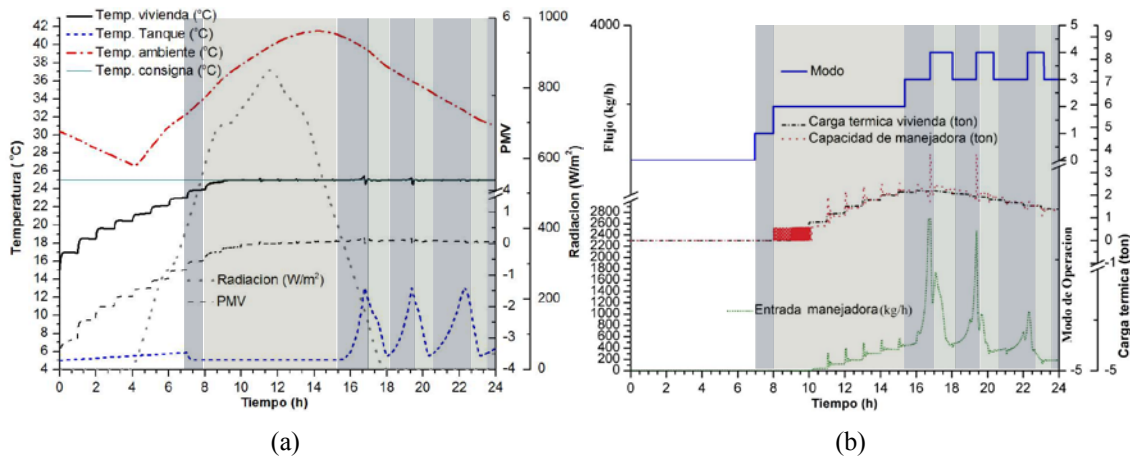


Fig. 4. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 15°C.

En la figura 3b se muestra que a las 8:00 horas la vivienda empieza a ganar calor, lo que provoca el cambio de operación al modo 2 (para proveer de climatización a la vivienda y al mismo tiempo almacenar frío), en este transcurso de tiempo a medida que la carga térmica aumenta, el controlador lo hace de manera proporcional con el flujo de agua hacia la manejadora de aire, para retirar el calor ganado en la vivienda y mantener la temperatura de consigna.

Tomando como prioridad el tanque de almacenamiento de agua fría para tratar de maximizar la fracción solar, el sistema de control entra en modo 3 alrededor de las 16:00 horas, cuando el nivel de radiación se encuentra por debajo del punto de consigna (400 W/m²) para trabajar con energía solar. Para retirar la cantidad de calor necesario y mantener la temperatura de consigna, el controlador incrementa el flujo de agua gradualmente en la manejadora de aire hasta agotar por completo la reserva

de agua fría contenida en el tanque de almacenamiento, en ese momento se cambia a modo 4 para operar con biogás, esto último se repite constantemente hasta contar nuevamente con recurso solar.

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica, la energía que entra en la vivienda es igual a la que se acumula en ella, más la que se le retira. $E_e = E_a + E_s$, donde E_e es la energía ganada en la vivienda, E_a es el energía acumulada y E_s es la energía retirada por la manejadora, de manera que si la energía acumulada y la ganancia de calor son retiradas, la temperatura de la vivienda permanecerá constante, tal es el caso en la figura 3b, donde se observa como la cantidad de energía retirada por la unidad manejadora se iguala con la carga térmica de la vivienda, lo que provoca que la temperatura se mantenga alrededor de los 25°C. Al inicio de la operación con biogás, la unidad de enfriamiento recibe el agua relativamente caliente, la cual es una mezcla del agua que proviene de la salida de la manejadora y el agua contenida en la parte superior del tanque, en la figura 3c se observa cómo el agua caliente ocasiona un gran demanda en la producción de frío tal que se supera a la capacidad de la unidad de enfriamiento, provocando que la unidad de enfriamiento no sea capaz de alcanzar la temperatura de consigna de salida de 5°C, lo que es causa de perturbación en el sistema de control para mantener la temperatura de confort en la vivienda, es decir, el agua que proviene del sistema de enfriamiento contiene menos capacidad de intercambio de calor, lo cual afecta directamente a la capacidad de la manejadora de aire.

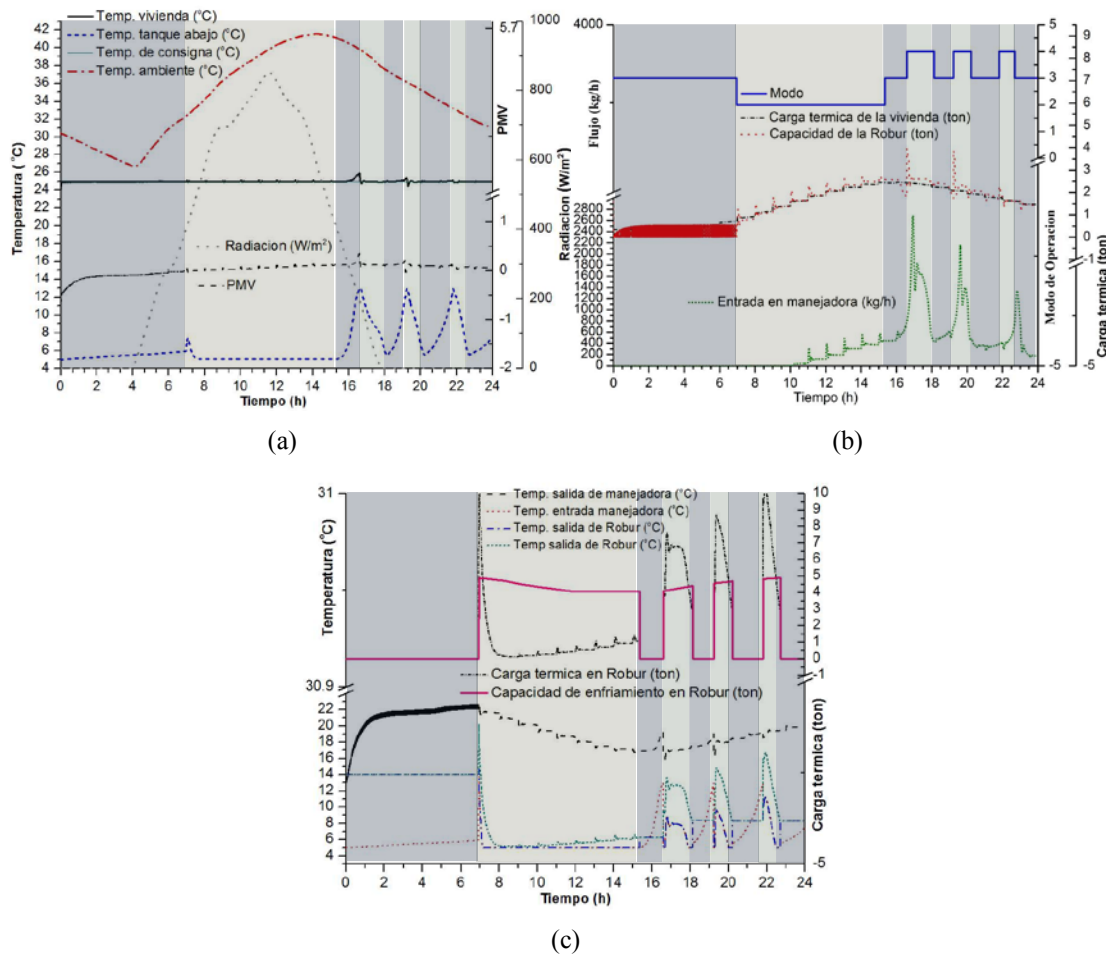


Fig. 5. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 25°C.

La simulación con una condición inicial a 25°C, se realizó para obtener el comportamiento del sistema operado continuamente de un día a otro. Debido a que la vivienda se encuentra sobre la temperatura de consigna y el tanque de almacenamiento cuenta con temperatura baja en el agua de almacenamiento, además la carencia de la radiación solar provoca que el sistema de control entre en modo 3. El diferencial de temperatura de la vivienda con respecto al ambiente, es demasiado pequeña que la carga térmica del espacio varía entre las 0 y las 0.5 toneladas, como se muestra en la figura 3.11b, lo que induce a que el controlador envíe poco flujo de agua fría hacia la manejadora, ocasionando que el tanque permanezca funcionando cerca de las 7:00 horas, hasta que el umbral de radiación para trabajar con energía solar es rebasado, en ese momento el modo de operación se modifica a 2, obteniendo de aquí en adelante un comportamiento similar a la simulación anterior.

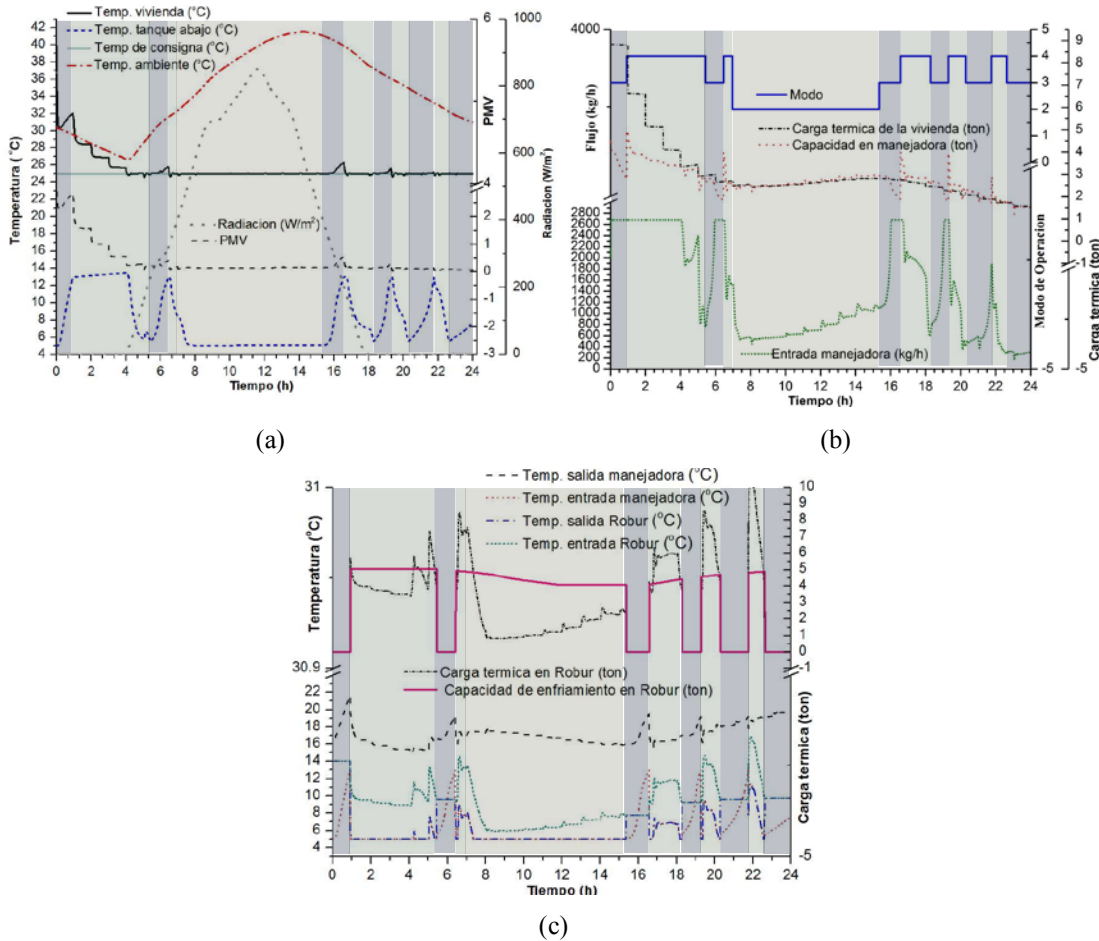


Fig. 6. Simulación de la vivienda con condiciones iniciales de la vivienda a 45°C.

Ya se ha mostrado el arranque y operación continua de un día a otro del sistema de enfriamiento operado bajo el sistema automatización y control, en esta ocasión se presenta la estabilización de la variable controlada, cuando el sistema es operando a plena carga. En la figura 3.12a se observa que la temperatura inicial de la vivienda es de 35°C, lo que genera en las primeras horas una carga térmica arriba de 8 toneladas, de acuerdo a ello el controlador se encuentra en saturación, enviando el flujo total de agua fría a la manejadora de aire, se mantiene así mientras que la temperatura de la vivienda supera el punto de consigna y la carga térmica supera la capacidad de la unidad, cuando la capacidad de la unidad de enfriamiento sobrepasa a la carga térmica de la vivienda el sistema de control empieza a disminuir el flujo de agua fría entrante en la unidad manejadora, para retirar el calor necesario y situarse en la

temperatura de referencia (ver figura 3.12b). Alrededor de las 5:30 horas, se acumula suficiente reserva de frío, como para cambiar de modo biogás a operar con el tanque de almacenamiento durante una hora, nuevamente el modo de operación biogás entra en acción hasta que es interrumpido, debido a que el nivel de radiación solar alcanza el umbral para trabajar en modo 2. En este punto la mayoría de la energía acumulada ya fue retirado, por ello el comportamiento de la vivienda es similar al de la simulación 1 y 2.

De acuerdo a la variable de control y la automatización de las válvulas, la unidad de enfriamiento y unidad manejadora se comportaron según lo requerido, además de obtener un buen control sobre la temperatura de la vivienda, que ayudó a mantener el indicador PMV dentro del rango confortable, se ha demostrado teóricamente que el algoritmo propuesto permite la automatización y control bajo la configuración del circuito hidráulico propuesto, para brindar al usuario seguridad, confort y ahorro de energía.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación dinámica demostraron la versatilidad del software TRANSYS, en el que se pueden realizar simulaciones en estado dinámico incluyendo estrategias de control. La simulación dinámica del sistema de climatización en el entorno de desarrollo TRNSYS v.16, demostró que el circuito hidráulico o configuración del sistema, permite operar la unidad de enfriamiento en tres diferentes formas: Con energía solar, con el sistema de almacenamiento de frío y con biogás. La configuración propuesta ayudo a disminuir la operación con fuego directo, ya que en el primer caso solo opero alrededor de 3:00 horas en un periodo de 9:00 horas, además permitió el uso eficiente del tanque de estratificación ya que la recirculación para regular la temperatura de la vivienda, se hace por la parte de abajo y se evita la mezcla de agua fría con la caliente.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través del proyecto con clave CB-2011-01-167794.

REFERENCIAS

- [1] Rubio, F., Camacho, E., y Berenguel, M. Control de campos de colectores solares. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3(4), pp. 26–45, 2006.
- [2] Fernández, F., Pilatowsky, I., y Ruíz, V. Programa de ensayos de una planta de enfriamiento solar para el acondicionamiento de aire. *Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar*, 2006.
- [3] Velázquez, N. y Best, R. Estudio de sistemas de absorción avanzados para operar con gas natural y asistidos por energía solar. *Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar*, 2002.
- [4] García, C. X. Instalaciones de refrigeración solar por absorción: análisis y simulación dinámica. *Congreso Mediterráneo de Climatización*, 2005.
- [5] Delgado, J. A., Alcahud, F., Bordons, C., y Rubio, F. R. Control integral de una planta de climatización solar. *XXI Jornada de Automática*, 2000.
- [6] Zambrano, D. Camacho, E. F. Optimización multiobjetivo aplicada al control de temperatura en una planta de refrigeración solar. *XXII Jornada de Automática*, 2001.
- [7] Corchero, M., Ortega, M., y Rubio, F. Aplicación de control robusto en una planta solar. *XXV Jornada de Automática*, 2004.
- [8] González, C. Temperature control of solar air conditioning systems. Master's thesis, University of Puerto Rico, Mayaguez, 2004.

- [9] Núñez, A., Normey, J., Bordons, C., and Camacho, E. A smith predictive based mpc in a solar air conditioning plant. *Journal of Process control*, 15(1), pp. 1–10, 2005.
- [10] Lygouras, J., Botsaris, P., Vourvoulakis, J., and Kodogiannis, V. Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system. *Applied Energy*, 84(12), pp. 1305– 1318, 2007.
- [11] Lygouras, J., Kodogiannis, V., Pachidis, T., Tarchanidis, K., and Koukourlis, C. Variable structure tito fuzzy-logic controller implementation for a solar air- conditioning system. *Applied Energy*, 85(4), pp. 190–203, 2008.
- [12] Zetzsche, M., Koller, T., and Müller, H. Solar cooling with an ammonia/water absorption chiller. In *EUROSUN 2008*, 2008.
- [13] TRNSYS. *Matemathical Reference (5 ed.)*, 2005