



XVIII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA. SIE-2019

Implementación de estrategias de control en sistema inmótico para batería de calentadores de agua

Control strategies implementation in inmotoc system applied to set of hot water generator

MSc. Jaime Fardales Pérez¹, MSc. Jorge Fardales Pérez², Ing. Yunior Rafael
Cabrera Hernández³

¹ Empresa de Automatización Integral (CEDAI), Cuba, fardales@cedai.com.cu

² Universidad de Snacti Spiritus (UNISS), Cuba, jorgefardales@uniss.co.cu

³ Universidad de Snacti Spiritus (UNISS), Cuba, yuniorrafael@uniss.edu.cu

Resumen: En este trabajo se expone la solución brindada para el calentamiento de agua de una instalación hotelera cubana basada en la conexión en paralelo de tres subsistemas de calentamiento. Se presenta el sistema de supervisión y adquisición de datos (SCADA) implementado para el hotel, en el cual se enmarca el sistema de control concebido para el proceso de calentamiento de agua. De este, se explican las estrategias de control asumidas para manipular los tres subsistemas de calentamiento desde un controlador lógico programable (PLC) enfocándose en la satisfacción de las exigencias de confort y eficiencia energética impuestas por el proyecto al sistema de automatización; deteniéndose en la definición de la variable a controlar para que la misma refleje las peculiaridades del proceso, las alternativas implementadas para garantizar la continuidad del servicio ante averías y la rotación de los subsistemas de calentamiento.

Abstract: The present work describes a solution to hot water generation in a Cuban hotel based in paralleled connection of three hot water generator subsystems. The supervisory control and data acquisition system (SCADA) implemented for hotel is shown, which contains the control system conceived for the hot water generation process. The control strategies developed to manipulate the three hot water generator subsystems from a programmable logic controller (PLC) focused in the comfort and energy saving satisfaction demanded by the project to the automation system is explained. A careful presentation of control variable definition is made in order to reflect the process



peculiarities, the alternatives implemented to guarantee the services continuity in damages conditions and the hot water generator subsystems rotation.

Palabras Clave: Domótica; Eficiencia energética; SCADA; PLC; Agua caliente; Calentador.

Keywords: Domotic; Energy efficiency; SCADA; PLC; Hot water; Boiler.

1. Introducción

Los sistemas inmóticos orientan sus soluciones con gran prioridad en el confort que deben ofrecer las instalaciones [6], [9] lo cual es correcto, sin embargo, nunca debe perderse la perspectiva del ahorro y contribución al uso racional de recursos que puede introducir la explotación de estos sistemas. Esta necesidad se enfatiza en gran medida en el entorno nacional donde las políticas de ahorro de portadores energéticos se hacen cada vez más rigurosas.

Las áreas tecnológicas, dentro de las instalaciones hoteleras, suelen ser puntos de marcado interés para enfocar esta visión, [2], [3].

El Hotel Rancho Luna, enclavado en la playa del mismo nombre de la provincia Cienfuegos, perteneciente al grupo hotelero Cubanacán, fue sometido a una inversión capital. Dada la necesidad de dotar la instalación con sistemas automatizados que permitieran una adecuada explotación de los sistemas instalados producto al proceso inversionista, el CEDAI con la participación de las entonces ESI Isla de la Juventud y Sancti Spiritus, concluyó la ejecución y puesta en marcha de un proyecto de automatización que abarcaba distintas áreas y sistemas del referido hotel, realizándosele mantenimientos periódicos que garantizan su óptimo estado de funcionamiento.

El proyecto de automatización ejecutado se trazó como premisa la supervisión y control del funcionamiento en régimen automático y manual de los sistemas y servicios técnicos de ingeniería de la instalación. Para ello, se desplegaron redes de gestión técnica que facilitan la supervisión y control de distintos parámetros en cada subsistema (Ver Fig. 1).

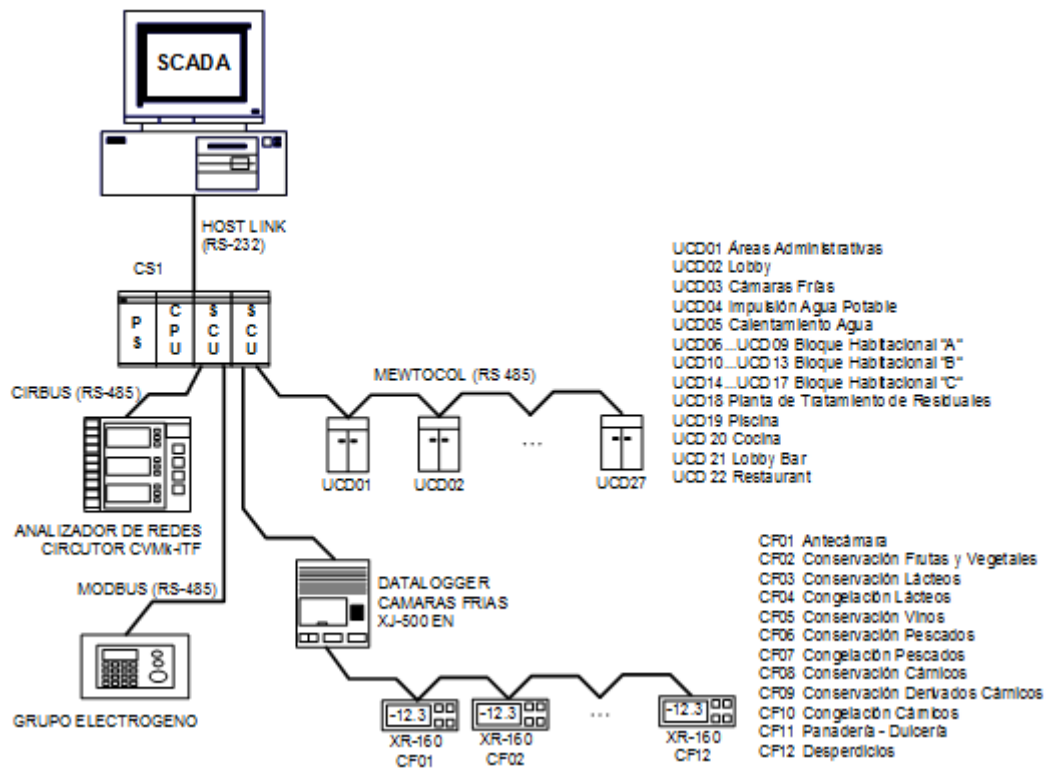


Fig. 1: Arquitectura de red de automatización. Fuente: Elaboración propia

En todos los subsistemas mostrados en la figura se supervisan y controlan las variables de interés para el explotador, manteniéndose como premisa el empleo de la inteligencia distribuida proporcionada por los controladores o dispositivos específicos presentes en el campo en virtud de delegar en ellos las tareas de control y recolección de información primaria que hacen independiente su funcionamiento del estado de las comunicaciones en las redes de datos.

La perspectiva de ahorro energético está presente en todos los subsistemas abarcados por el sistema de automatización, sin embargo, entre estos destaca el de calentamiento de agua. El calentamiento eficiente del agua requerida por el hotel, se fue erigiendo de una pretensión a una marcada exigencia para el sistema de control, en tanto influye de forma directa en el ahorro del gas empleado como combustible. Entre las exigencias impuestas al sistema de control destacan el seguimiento de curvas de temperatura deseada, la inferencia de estados anómalos de funcionamiento, el aporte de información y soporte a labores de mantenimiento preventivo.

De aquí que el objetivo de este trabajo sea exponer las estrategias de control que se implementaron en el dispositivo de campo para el control del sistema de calentamiento de agua del Hotel Rancho Luna.

1. Descripción del sistema para calentamiento de agua

El sistema empleado para la generación de agua caliente está compuesto por tres subsistemas (calentador, subsistemas de bombeo e intercambiador a placas) que logran calentar agua para su almacenamiento en un tanque de donde es bombeado al sistema hidráulico de habitaciones y de servicio del hotel, retornando a un tanque de recuperación toda el agua caliente no consumida.

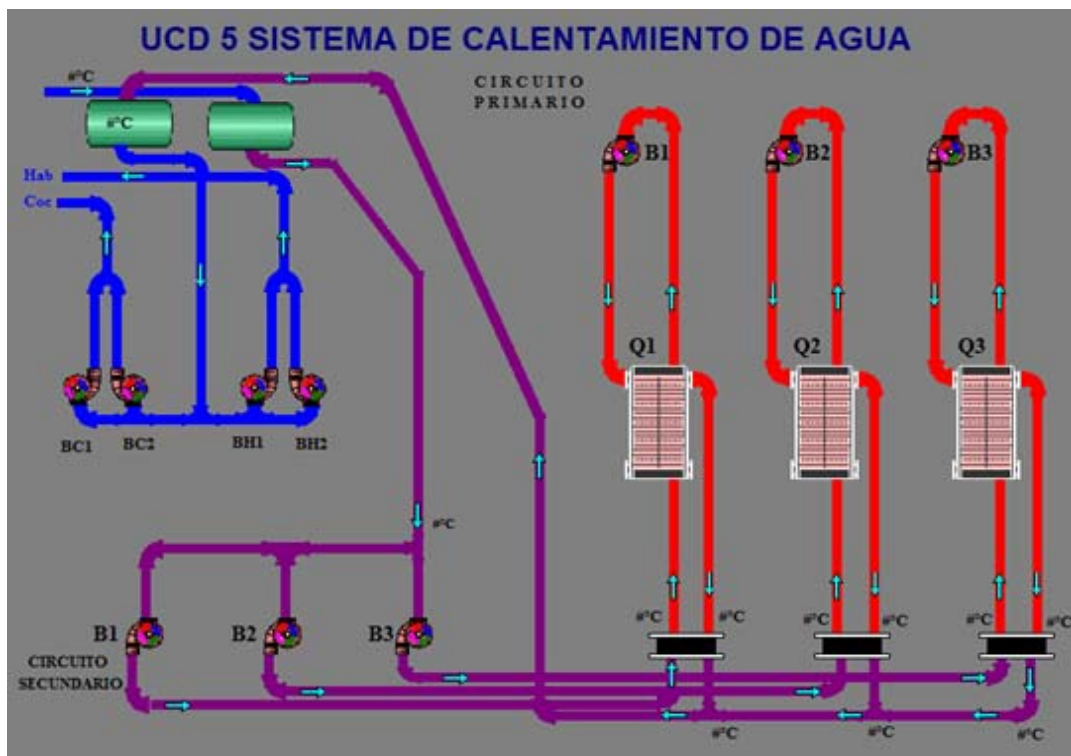


Fig. 2: Esquema del sistema de calentamiento de agua. Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 2 se muestra un esquema del sistema descrito. En la misma se puede apreciar la existencia de varios circuitos hidráulicos:

- Circuito primario: Aparece señalado en rojo, se trata de agua tratada que en el interior de la caldera eleva significativamente su temperatura (95°C) [10] para tener capacidad de ceder calor en el intercambiador.
- Circuito secundario: Señalado en marrón, Se trata del agua de consumo que se hará circular a contracorriente por el intercambiador para elevar su temperatura al valor deseado ($45^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$).



- Circuitos de distribución o consumo: De color azul, circuito que distribuye el agua caliente a los consumidores, se puede distinguir la presencia de circuitos independientes para el caso del consumo en habitaciones y en la zona de servicios (Cocina).

En la Fig. 2 se puede constatar la existencia de varios puntos de medición de temperatura, así como la presencia de disímiles equipos como bombas, calentadores, intercambiadores, tanques, etc. En cada uno de estos puntos de medición se colocan termoresistencias (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que aportan variables de temperaturas de vital importancia para el algoritmo de control implementado. Por otro lugar se censan estados asociados al funcionamiento de los equipos directamente en el panel eléctrico o mediante el uso de flujostatos, como se puede ver en la misma figura.

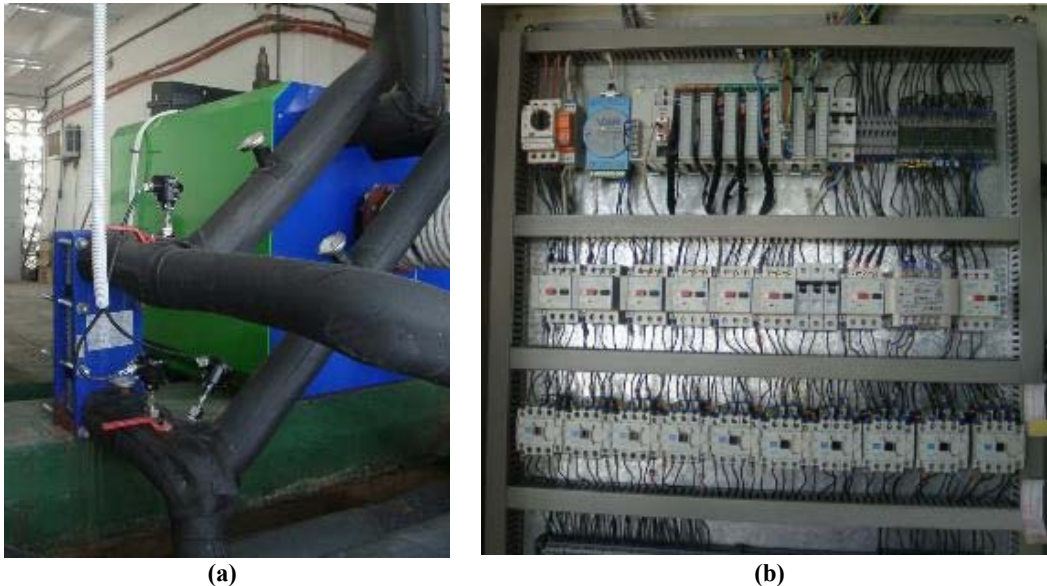


Fig. 3: Planta de calentamiento de agua en Hotel Rancho Luna. (a) Calentador, Intercambiador a placas, instrumentación. (b) Interior del panel de maniobra y control. Fuente: Elaboración propia

2. Estrategias de control implementadas.

Todas las señales de campo son llevadas al PLC (Panasonic, NAIS-Matsuchita FP-2) para de conjunto con las variables recibidas desde el SCADA formar el universo de información disponible al software implementado en el PLC.

En la tabla 1 se presenta un resumen de las principales variables que intervienen en las estrategias de control propuesta [7], [8]. En esta tabla, además del universo de información disponible del SCADA y el campo, se han incorporado un conjunto de variables, definidas sólo en el entorno del software que se ejecuta en el PLC y que se obtienen como resultado de procesar dicha información.



Descripción de la Variable	Fuente	Tipo
Temp. Ent. Circ. Primario 1, 2, 3	Entrada	Int
Temp. Sal. Circ. Primario 1, 2, 3	Entrada	Int
Temp. Sal. Circ. Secund. 1, 2, 3	Entrada	Int
Temp. Ent. Circ. Secund. 1, 2, 3	Entrada	Int
Temp. Tanque de Suministro	Entrada	Int
Temp. Retorno Recirculación	Entrada	Int
Bombas Circuito Primario (3) y Secundario (3).		
Estado Automático-Manual	Entrada	Bool
Estado de Funcionamiento	Entrada	Bool
Estado térmico	Entrada	Bool
On-Off Bombas	SCADA	Bool
Calentadores (3)		
Estado de Funcionamiento	Entrada	Bool
Estado Automático-Manual	Entrada	Bool
On-Off Sist. de Calentamiento	SCADA	Bool
Hab/Bloq Sist. de Calentamiento	SCADA	Bool
Horas Trabajo Sist. calentamiento	Soft PLC	Int
Bombas Cocina (2) y Bombas de Habitaciones (2)		
Estado Automático – Manual	Entrada	Bool
Estado de Funcionamiento	Entrada	Bool
Estado térmico (Común a ambas)	Entrada	Bool
On-Off Bombas	SCADA	Bool
Habilitación/Bloqueo Bombas	SCADA	Bool
Horas de Trabajo Bombas	Soft PLC	Int
Otras Variables		
Setpoint Temperatura	SCADA	Int
Ventanas (Histéresis) prender-apagar calentadores	Soft PLC	Int
Factor de Rotación Calentadores (Horas)	SCADA	Int
Factor de Rotación Bombas Recirculación (Horas)	SCADA	Int
Sist. de Calent. Fuera de servicio	Soft PLC	Bool
Alarma (Bombas cocina, habitaciones o calentadores)	Salida	Bool
Interruptor Horario Bombeo de Agua Caliente	SCADA	Bool
Interruptor Horario Cocina	SCADA	Bool

Tabla 1: Principales variables sostenidas en el software del PLC. . Fuente: Elaboración propia

3.1 Variable a controlar, alternativas.

Con el objetivo de lograr que el agua caliente suministrada mantenga una temperatura estable y en el entorno del punto de ajuste prefijado, el algoritmo implementado en el PLC se encarga de ir prendiendo o apagando los calentadores en dependencia de la demanda de agua caliente que registra el hotel, lo cual es inferido de las variaciones de temperatura detectadas. El valor de temperatura empleado para operar la batería de calderas se obtiene mediante la expresión:



$$T_{Pond} = \frac{T_{Impulsion} + 1.2 * T_{Retorno}}{2} \quad (1)$$

Con la aplicación de esta expresión se pondera la temperatura del agua caliente en todos los puntos de los circuitos que recorren la instalación. Es decir, no solo resulta significativo la temperatura con que se impulsa el agua (temperatura percibida por los primeros consumidores en el circuito), sino la temperatura con que esta retorna, que en principio pudiera tomarse como la percibida por los consumidores más alejados en el circuito [5]. Dado que el conducto de retorno desde los consumidores, principalmente los más alejados, es bien extenso se determina el factor 1.2 que compensa las pérdidas de calor producidas en los trayectos de retorno, las cuales no se requiere suplir.

En la expresión anterior se emplean como variables primarias: para la temperatura de impulsión, la temperatura en el tanque de suministro; para la temperatura de retorno, la temperatura en el retorno del circuito de recirculación. Sin embargo, previendo posibles averías en los sistemas de medición de estas variables, el software emplea variables secundarias o alternativas: para la temperatura de impulsión, la máxima temperatura captada en los circuitos secundarios 1, 2 o 3; para la temperatura de retorno, la temperatura en el punto común de entrada a los circuitos secundarios. Ante averías detectadas en el canal de medición de las variables primarias, se generan las alarmas y avisos pertinentes que informan a operadores y mantenedores de la necesidad de solucionar la falla, pero mientras esto ocurre las variables alternativas suplantando a las primarias, con lo cual se garantiza la continuidad del servicio, sin que sea estrictamente necesario pasar el sistema a un modo de operación manual. En el tiempo de explotación del sistema esta situación se ha presentado en varias ocasiones, las cuales han servido para validar prácticamente la efectividad de esta estrategia para hacer frente a las averías.

3.2 Ajuste al punto de consigna.

Para el prendido y apagado de calentadores se establecen tres "ventanas de temperatura" alrededor del punto de ajuste con una apertura preestablecida y seleccionable. Mediante comparación de la temperatura del agua caliente (calculada mediante la expresión [1]) con las ventanas preestablecidas se determina la cantidad de calentadores que es necesario mantener prendidas para suplir el déficit de temperatura o corregir excesos. Conocido el estado actual del sistema, es decir la cantidad de calentadores prendidos, se decide la cantidad de calentadores a prender a apagar de acuerdo a la demanda estimada.



En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de esta secuencia de prendido y apagado.

En la misma se ha establecido una temperatura deseada de 45°C, y una apertura seleccionada para las ventanas de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$. Con estos datos se crean las 3 ventanas que rigen la siguiente estrategia de control:

- Si la temperatura decae por debajo de 45°C, se prende 1 calentador; si con este único calentador no se puede suplir la pérdida de temperatura y esta continúa descendiendo, al alcanzarse los 43°C se prendería un segundo calentador; si la situación persiste, a los 41°C se prendería el tercero.
- Para el apagado de los calentadores se sigue igual estrategia, solo que en este caso se observa la recuperación de la temperatura por el sistema en lugar de la pérdida.

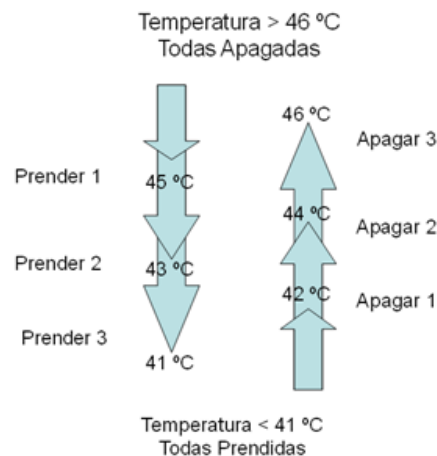


Fig. 4: Ejemplo de secuencia algoritmizada. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar se crea una franja de histéresis de 1°C que evita el fenómeno de oscilación entre el prendido y apagado de un calentador.

3.3 Estrategias de rotación.

El objetivo fundamental de cada subsistema de calentamiento es elevar la temperatura del agua de consumo, la cual fluye a través de sus circuitos secundarios, de aquí que la determinación de la eficiencia con que está ocurriendo este proceso en cada momento sea de suma importancia, en tanto repercute directamente en el ahorro de combustible [4]. Por ello, en todos los subsistemas de calentamiento se determina la eficiencia operacional valiéndose de una promediación de las diferencias de temperatura - ecuación (2) - alcanzadas en los circuitos secundarios de los subsistemas de calentamiento a su paso por los intercambiadores de calor a placas asociados a ellos en cada ciclo de trabajo.



$$\Delta T_{Sec} = \frac{\sum_{i=0}^n (T_{Salida} - T_{Entrada})}{n} \quad n: \text{Cant. de muestras periódicas en un ciclo de trabajo} \quad (2)$$

Así entre más pequeña se mantenga estas diferencias, menor será la eficiencia operacional del subsistema de calentamiento, pues es indicativo de que, a su paso por el interior del intercambiador a placas, el agua del circuito primario no está cediendo el calor esperado al circuito secundario. Este parámetro fue el usado para determinar cuál sería el sistema de calentamiento que se prendería o apagaría en cada caso (rotación de los subsistemas de calentamiento), prendiéndose siempre el sistema de calentamiento que se considera más eficiente en ese momento y apagándose el menos eficiente cuando se reclama esta acción.

En este algoritmo se establece un umbral de eficiencia operacional, por debajo del cual se recomienda practicar labores de mantenimiento al subsistema, pues es indicativo de situaciones anómalas como: valores de deterioro en las superficies de intercambio de calor del intercambiador a placas; desperfectos en los sistemas de bombeo asociados a los circuitos primarios y/o secundarios; o mal funcionamiento del calentador. Al alcanzarse estos valores se genera la alerta correspondiente.

Con el transcurso del tiempo y la explotación de los sistemas de calentamiento, la estrategia de rotación expuesta anteriormente fue replanteada. Este replanteo estuvo determinado principalmente por la no homogeneidad en los componentes de los circuitos de primarios de calentamiento, lo cual falseaba la comparación de la eficiencia operacional de cada sistema de calentamiento considerando únicamente la diferencia de temperatura lograda en los circuitos secundarios de cada uno de ellos. Se valoraron varias alternativas para establecer algún indicador de eficiencia operacional más abarcador y que pudiera servir como comparador relacional entre los sistemas de calentamiento, sin embargo, se optó por tomar como parámetro para la rotación el tiempo de trabajo acumulado por cada sistema de calentamiento posterior a un mantenimiento.

De este modo, la prioridad para prender o apagar los calentadores se establece en base al tiempo de trabajo acumulado por cada una de ellas. Así, siempre se intenta prender como primera opción el subsistema de calentamiento que menos tiempo de trabajo ha acumulado, dada la supuesta correlación directa entre este parámetro y la eficiencia lograda por el mismo, además de mantener niveles de funcionamiento equitativos que



garantizan la no sobreexplotación de ninguno de los subsistemas de calentamiento lo que provocaría un detrimento acelerado de sus componentes.

Sin embargo, con el fin de facilitar labores de mantenimiento, se respeta el tiempo de rotación de los subsistemas de calentamiento, de tal manera que se intenta garantizar que al menos uno de los tres subsistemas de calentamiento mantenga una "distancia" en horas de trabajo de las restantes, lo suficientemente holgado como para que sea el primero en alcanzar el tiempo de trabajo establecido para practicarle intervenciones de mantenimiento, sin que ello implique que las restantes también estén en periodo de mantenimiento y por ende sea necesario prescindir del servicio de agua caliente por el periodo que dure el mantenimiento.

3.4 Exclusión del ciclo de rotación.

Cuando se envía el comando para prender un subsistema de calentamiento se requieren encender distintos equipos asociados: bomba de recirculación del circuito primario, bomba del circuito secundario y el calentador correspondiente. Al igual que en toda acción de control, al emitirse el comando para prender un subsistema de calentamiento es necesario cerciorarse que esto tuvo lugar. Si cualquiera de los equipos involucrados falla, el comando no habrá alcanzado el éxito. Los sistemas de bombeo no presentan ninguna complejidad para determinar su respuesta ante el comando, pues se disponen de señales de realimentación directa ("Estado de Funcionamiento" en el listado de variables presentado en la Tabla 1). Sin embargo, el éxito en el prendido del calentador no es una señal que se pueda obtener de forma directa, por lo cual se requiere inferirla del conjunto de variables disponibles.

Durante el proceso de prendido de los calentadores se realiza un barrido controlado por la electrónica propia del equipo que pasa por la extracción de posibles gases presente en la cámara de combustión y el enriquecimiento de oxígeno en la misma para posteriormente alimentar gas y prender la llama. De todo este proceso no se tiene ninguna realimentación directa, por lo cual el algoritmo de control verifica el cumplimiento del comando emitido a través del incremento de la temperatura que se debe experimentar en el circuito primario, transcurrido un tiempo prudencial. Si esto no se logra, es indicativo de que el sistema de encendido necesita alguna asistencia por lo cual el calentador en cuestión se declara no apto para la operación.



Si cualquiera de los equipos involucrados (sistemas de bombeo primario/secundario o calentador) falla, el subsistema correspondiente se "saca de servicio" y se emiten las alarmas correspondientes. Los subsistemas fuera de servicio son excluidos y por ende no son tenidos en cuenta por el algoritmo hasta tanto no se resetee dicho estado.

3. Otras bondades.

Con el sistema de control implementado es posible apagar la bomba de impulsión del circuito de servicio (cocina) cuando no se requiere el suministro de esta a las áreas de cocina y restaurante. Si bien con esta acción se logra un pequeño ahorro de energía eléctrica, resulta más significativo el ahorro de combustible al evitarse la pérdida de calor debido al recorrido innecesario del agua caliente por el circuito hidráulico de servicio.

Otra facilidad que brinda el sistema desde el punto de vista de ahorro es la posibilidad de establecer una curva de seguimiento para el punto de ajuste de la temperatura de agua caliente que permita establecer regímenes de trabajo más adecuados a las necesidades, atendiendo a horarios del día o estaciones del año.

4. Conclusiones

1. En los sistemas de calentamiento de agua de instalaciones hotelera donde los circuitos de distribución son extensos y por ende se presenta un gran gradiente de temperatura, se debe establecer alguna expresión que pondere esta situación partiendo de las variables disponibles para el sistema de automatización y garantice el suministro de agua caliente tanto a los consumidores cercanos como a los más distantes.
2. El empleo de variables secundarias que suplanten en alguna medida a las primarias en el algoritmo de control, resulta una alternativa para el mantenimiento en operación del sistema de calentamiento de agua ante la ocurrencia de averías.
3. La estrategia basada en ventanas alrededor del punto de ajuste resulta adecuada para el control de baterías de calentamiento de agua en sistemas domóticos, logrando mantener la temperatura del agua en un estrecho margen alrededor del punto de ajuste con economía de recursos y estabilidad de funcionamiento.
4. Las estrategias de rotación basadas en indicadores de eficiencia son fácilmente implementables cuando todos los subsistemas de calentamiento son homogéneos, sin embargo, resulta más viable la consideración de los tiempos de trabajo de los mismos cuando estos no mantienen características homogéneas.



5. Referencias bibliográficas

- [1] A. C. Lapeña, «Guía de Ahorro y Eficiencia Energética,» [En línea]. Available: <http://www.aven.es>. [Último acceso: 15 octubre 2018].
- [2] CEN, NC 220-5: 2009 Edificaciones-Requisitos de diseño para la eficiencia energética-Parte 5: Administración de energía, Habana: Oficina Nacional de Normalización, Julio 2009.
- [3] CEN, NC 775-12: 2012: Bases para el diseño y construcción de inversiones turísticas-Parte 12: Requisitos de automatización, Habana: Oficina Nacional de Normalización, Mayo 2012.
- [4] Colectivo de autores, «Ahorro de energía. Documento Básico HE,» 2013.
- [5] D. N. Cesarini, C. Cristina, S. M. Trullas, F. Abad, G. Grigis y S. Mangilli, «Energy saving solution set description. Deliverable D2.2,» web-based energy management system for the optimization of the Energy consumption in Hospitals project, Estados Unidos, 2013.
- [6] H. M. Domínguez y F. Sáez Vacas, Domótica: Un enfoque sociotécnico. Primera edición, Primera edición ed., s. 2. Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de las Telecomunicaciones. Ciudad Universitaria, Ed., Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2006, p. 188.
- [7] J. Fardales Pérez, «Actualización listado de variables UCD-05. Proyecto de automatización para Hotel Rancho Luna,» Sancti Spiritus, 2012.
- [8] O. Royo Medina, «Listado de variables SCADA SX-Supervisor Ver. 4.2. Proyecto de automatización para Hotel Rancho Luna,» Habana, 2012.
- [9] P. E. Bogado, «Prototipo de un sistema domótico seguridad y confort,» Universidad Empresarial Siglo 21, Córdoba, 2012.
- [10] Ygnis Co., Guía de explotación caldera Ygnis, 2004.