

SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN, SUPERVISIÓN Y CONTROL DEL “APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ARROYO EL TIGRE”. LA MÁQUINA DE ESTADO COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO.

J.C. Kairiyama¹, G. A. Fernández², V. H. Kurtz³.

Grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Electrónica (GID-IE).

Universidad Nacional de Misiones (UNaM) – Facultad de Ingeniería (FIO).

Juan Manuel de Rosas N° 325 – Oberá – Misiones – Argentina – C.P. 3360 – Tel.: 3755-422169; FAX: 3755-422170.

kairi@fio.unam.edu.ar; inggaff2000@yahoo.com.ar; kurtzvh@fio.unam.edu.ar.

RESUMEN: Este artículo describe la utilización del concepto de máquina de estado como herramienta para el diseño de un sistema de automatización, supervisión y control destinado al funcionamiento autónomo de una pequeña central hidroeléctrica. El concepto es adecuado para analizar, describir y resolver la automatización de sistemas secuenciales. La secuencia se representa por un modelo gráfico denominado diagrama de transición de estados, este reúne toda la información necesaria para conocer el funcionamiento del sistema que se desea automatizar. Para mostrar la utilidad del concepto mencionado, en este artículo se aplica el mismo al diseño de un sistema que permite automatizar, supervisar y controlar el funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica instalada en la provincia de Misiones, denominada “Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo El Tigre”. Los resultados alcanzados con la aplicación del concepto, se manifiestan en el funcionamiento adecuado de la pequeña central, que actualmente opera de forma autónoma.

Palabras clave: Pequeña central hidroeléctrica, máquina de estado, automatización.

INTRODUCCIÓN

La provincia de Misiones, debido a sus características geográficas y climatológicas, cuenta con numerosos causes de arroyos y ríos que pueden aprovecharse para la generación de energía eléctrica a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). Estas instalaciones, debido a sus características constructivas, provocan un impacto ambiental reducido en las zonas circundantes a su emplazamiento. También hay que destacar que en la provincia existe una población rural importante que no cuenta con suministro de energía eléctrica. Atendiendo a ambas situaciones, un grupo de docentes-investigadores pertenecientes a la Facultad de Ingeniería de la U.Na.M., se ha motivado en participar de la investigación, desarrollo e instalación de varios aprovechamientos hidroeléctricos. La tabla 1 indica algunos ejemplos de los aprovechamientos. En varios casos el funcionamiento de la PCH es autónomo, es decir no requiere de la presencia continua de un operador en la sala de máquina. Este es el caso los proyectos indicados en la tabla 1, donde el funcionamiento autónomo se justifica por las siguientes razones:

- a) Potencia instalada pequeña. Por razones de costo operacional no admite el sostenimiento del salario de un operador.
- b) Inaccesibilidad a la sala de máquinas. Por la geografía del lugar y características de diseño de la instalación (salto de agua adecuado), la sala de máquinas debe situarse en un lugar poco accesible. Esto es muy frecuente en las PCH.

Proyecto	Potencia Instalada	Características	Tecnología empleada en el SASC
Aprovechamiento Hidroeléctrico Saltito 2. Provincia de Misiones.	600 KVA	Generador sincrónico en paralelo con la red provincial	PLC
Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo El Tigre. Provincia de Misiones.	90 KVA	Generador asincrónico en paralelo con la red provincial	PLC
Aprovechamiento Refugio Montaña S. C. de Bariloche.	5KVA	Generador sincrónico, funcionamiento aislado.	Lógica digital discreta

Tabla 1. Proyectos de aprovechamientos hidroeléctricos, con intervención de la FIO-UNaM.

¹ Docente-Investigador, FIO-UNaM.

² Docente-Investigador, FIO-UNaM.

³ Docente-Investigador, FIO-UNaM.

Para los aprovechamientos indicados, se han efectuado estudios relacionados con sistemas electrónicos de control (Kurtz y Anocibar, 2004) y sistemas electrónicos de regulación de tensión y frecuencia (Kurtz y Botteron, 2007), como así también se ha aplicado el concepto de máquina de estado (ME) para el diseño e implementación del sistema de automatización, supervisión y control (SASC) que permite el funcionamiento autónomo de la PCH. El concepto de ME es aplicable a toda máquina, sistema o proceso cuyo funcionamiento puede representarse por una secuencia de estados únicos, conocidos y observables. El concepto permite efectuar el análisis sistemático del funcionamiento autónomo de la PCH, permitiendo reunir toda la información necesaria para el diseño e implementación del SASC. A continuación, con el fin de desarrollar la aplicación y utilidad del concepto de ME en el diseño del SASC, se toma como ejemplo el Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo El Tigre.

LA MÁQUINA DE ESTADO. REPRESENTACIÓN GRÁFICA

Una máquina, sistema o proceso es secuencial cuando su funcionamiento es la evolución a través de una serie de estados conocidos. Cada estado debe ser único y representar un comportamiento estable y observable del sistema durante un instante de tiempo. La transición de un estado a otro es regida por el cambio en las variables internas o externas al sistema. Estos cambios deben considerarse discretos, es decir del tipo “todo o nada”, “abierto o cerrado”, “0 ó 1”. Un sistema con las características mencionadas puede tratarse como una ME. Como se verá mas adelante, una PCH en funcionamiento autónomo y su respectivo SASC, cumplen con las especificaciones mencionadas, por lo tanto ambos sistemas pueden considerarse como máquinas de estado.

Para representar el funcionamiento de una ME, es conveniente utilizar la herramienta gráfica denominada diagrama de transición de estados (DTE). Esta gráfica reúne información valiosa para el entendimiento del funcionamiento del sistema en cuestión. El DTE consiste en representar a cada estado mediante una burbuja, el cambio o transición entre estados se manifiesta por intermedio de una flecha unidireccional que une a los estados consecutivos. Las transiciones y los estados deben ser definidos, únicos y caracterizados totalmente por el valor lógico (abierto o cerrado, 0 ó 1, etc.) de todas las variables que intervienen en el funcionamiento del sistema. En cada transición deben especificarse las causas que producen el cambio de estado, y el efecto de dicho cambio sobre la salida del sistema. Es decir, en las transiciones deben representarse los valores lógicos de las entradas y salidas de la ME. La figura 1 muestra la representación a través del DTE (Uyemura, 2000).

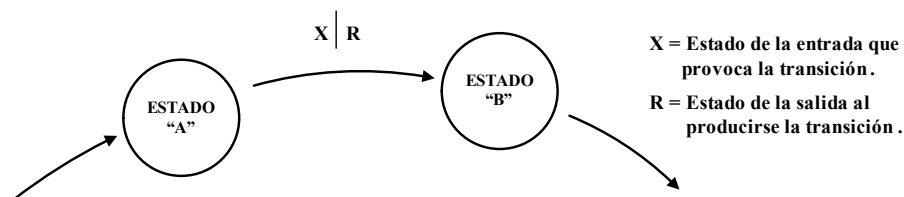


Figura 1: Representación simbólica del diagrama de transición de estados.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA TOMADO COMO EJEMPLO

Para abordar el diseño del SASC se requiere del conocimiento de las características y equipamientos generales empleados en la PCH, como así también del funcionamiento preciso de la central en sus diferentes secuencias, de operación normal y en situaciones de fallas propias y/o externas al sistema (Muñoz y Kairiyama, 2007). A continuación se describen los equipamientos generales, las operaciones y maniobras que son efectuadas durante el funcionamiento automático de la central, indicando las variables que intervienen en cada operación, para luego llevar la secuencia al modelo de máquina de estado que permite el diseño del SASC.

El Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo El Tigre trabaja en paralelo con la red de distribución de la Provincia de Misiones, la generación es asincrónica y se utiliza como generador un motor de inducción trifásico comercial. Dicho aprovechamiento corresponde a una central de pasada cuyo funcionamiento es autónomo, en la misma se requiere la intervención de un operador únicamente para la puesta en marcha y el apagado de la central. Los equipamientos hidroelectromecánicos que componen a esta PCH son los mostrados en la figura 2 y a continuación están detallados:

- Una turbina de flujo transversal, tipo Michell Banki con rodete de 300 mm de diámetro, velocidad nominal de 830 rpm e inyector con alabe accionado mediante un servo motor con un voltaje corriente continua de 24 V.
- Un motor de inducción trifásico de fabricación en serie, que es utilizado como generador asincrónico, con las siguientes características: potencia nominal de 90 kVA, voltaje nominal de 380/660 V y frecuencia nominal 50 Hz.
- Interruptor principal que conecta en paralelo la central hidroeléctrica con el sistema eléctrico provincial. El interruptor cuenta con sistemas de protección principal y auxiliar.
- Un controlador lógico programable (PLC) alimentado por un voltaje de corriente continua de 24 V, el cual ejecuta todas las acciones como SASC.
- Sensores varios que aportan información relevante al SASC para lograr el correcto funcionamiento del sistema.

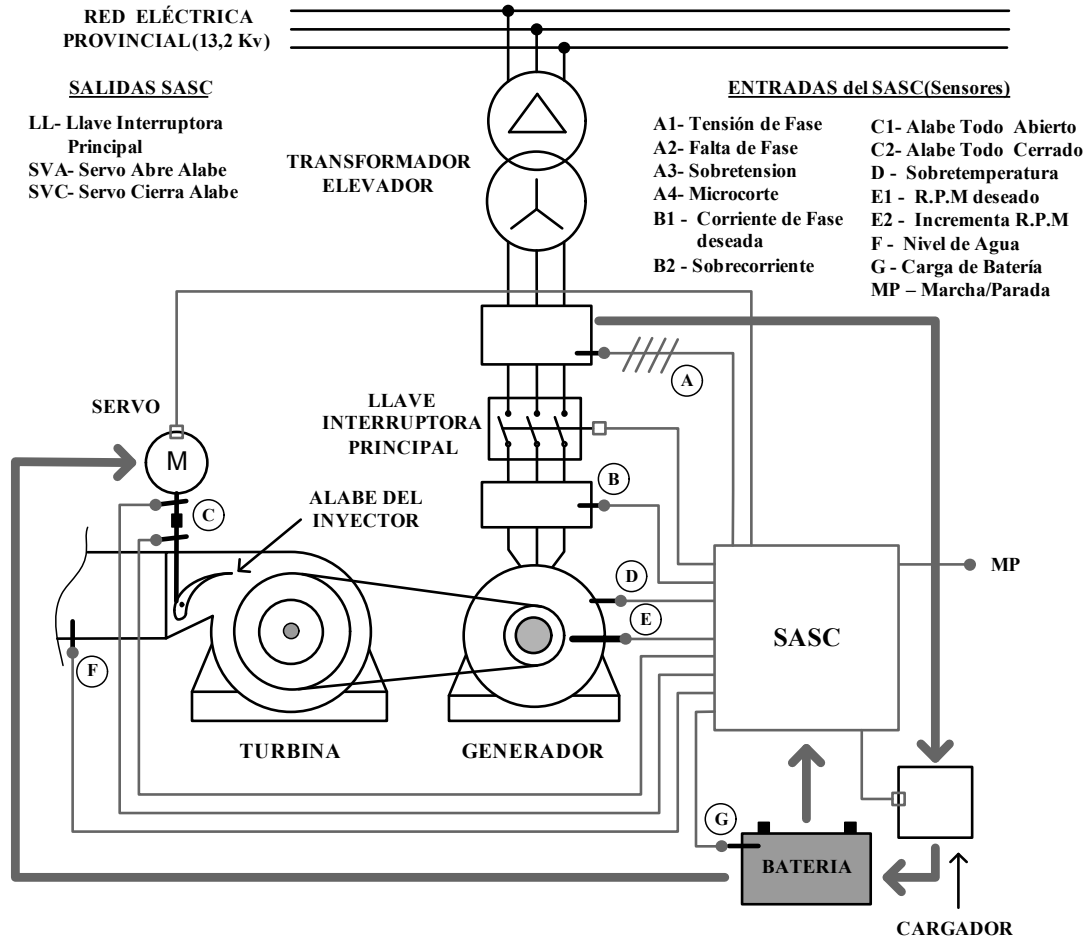


Figura 2: Componentes de la PCH "Arroyo El Tigre".

SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO. DIAGRAMA DE TRANSICIÓN DE ESTADOS

Para llegar a obtener el DTE que indique la información necesaria para el diseño del SASC, primeramente debe analizarse el funcionamiento de la máquina, sistema o proceso al que estará aplicado. Para el ejemplo de la figura 2, en funcionamiento autónomo, la PCH debe cumplir con la secuencia de estados indicados en la figura 3.

En la secuencia de la figura 3, cada burbuja representa un estado en que la PCH cumple con alguna operación. Las transiciones que salen y vuelven al mismo estado indican que la operación se mantiene hasta cumplirse con alguna condición interna o externa del sistema. El SASC es el encargado de que la PCH cumpla con la secuencia anterior, para esto utiliza la información que brindan los sensores, y de sus salidas que actúan sobre la PCH. Cabe destacar que la información provista por los sensores y las señales de comando que genera el SASC, son del tipo discreta (abierto/cerrado, 0/1, etc.). Las tareas efectuadas por el SASC corresponden a maniobras u operaciones que realizaría permanentemente un operador. La generación asincrónica operando en paralelo a un gran sistema como la red provincial, simplifica el modo de funcionamiento y el número de maniobras que deben ejecutarse (Caballero, 2000). Conocida la secuencia de funcionamiento de la PCH, deben reconocerse las variables (y sus valores lógicos) que intervienen en cada transición de la misma. Cada variable será una entrada o una salida para el SASC, las entradas corresponden a los sensores y las salidas a los actuadores sobre la PCH. A cada una de las entradas y salidas mencionadas debe asignarse un nombre y sus respectivos valores lógicos. Por ejemplo, en la figura 2 para el sensor de nivel de agua F, tenemos:

F=1; Nivel de agua ACEPTABLE
 F=0; Nivel de agua NO ACEPTABLE

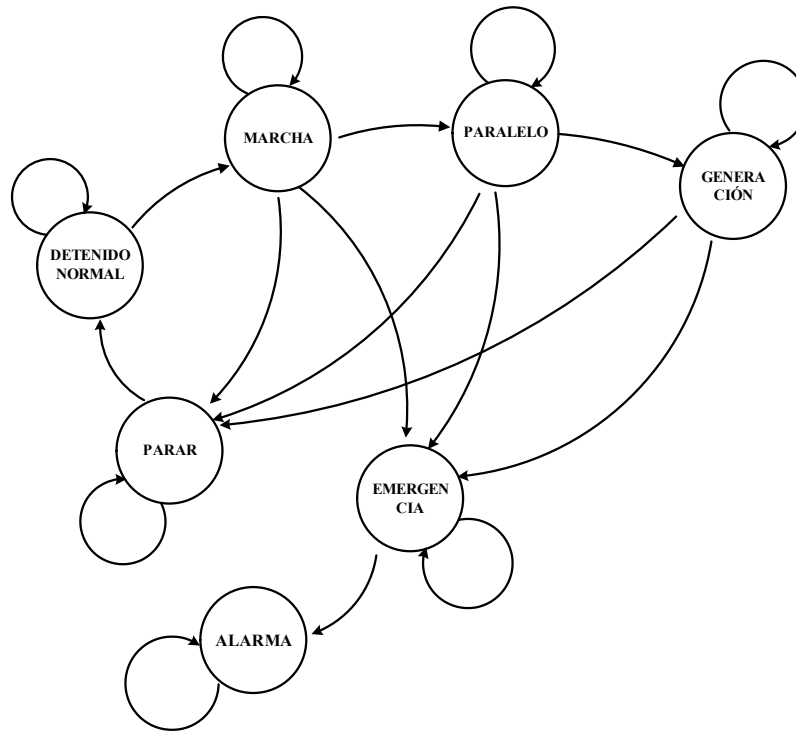


Figura 3: Secuencia de funcionamiento de la PCH "Arroyo El Tigre".

Considerando lo anterior y conociendo el valor lógico que toma cada variable en las transiciones entre estados de la secuencia, esta puede describirse de la siguiente forma:

- Estado Detenido Normal.** En este estado el alabe del inyector está cerrado ($C2=0$), y por consiguiente la turbina detenida. El interruptor principal se encuentra abierto ($LL=0$). Se mantiene en este estado mientras el SASC detecte condiciones irregulares externas temporarias que provienen de algunos de los sensores como nivel de agua, falta de fase, sobretensión, microcorte y tensión de fase ($A=1$), o si la llave marcha/parada está desactivada ($MP=0$). Si todas las condiciones irregulares se restablecen ($A=0$) y además la llave de marcha/parada se encuentra activada ($MP=1$), habrá una transición al siguiente estado denominado **Marcha**. De esta forma el SASC, mediante una señal ($SVA=1$) debe provocar la apertura del alabe. Teniendo en cuenta la representación para el DTE indicada en la figura 1, para el estado Detenido Normal y la transición mencionada, se representará:

$$\begin{aligned} \text{Detenido Normal} &\rightarrow (A;MP / LL;SVA;SVC) = (1 / 000) \\ \text{Transición a Marcha} &\rightarrow (A;MP / LL;SVA;SVC) = (01 / 010) \end{aligned}$$

- Estado Marcha.** En este estado continúa activa la señal de apertura del alabe ($SVA=1$) hasta que el sensor de rpm detecte una velocidad próxima a la nominal ($E1=1$), instante en que evoluciona al siguiente estado denominado **Paralelo**, donde el SASC deberá ordenar el cierre de la llave interruptora principal ($LL=1$) para poner en paralelo a la PCH con la red provincial. Si por algún motivo durante el estado Paralelo, algunos de los sensores como nivel de agua, falta de fase, sobretensión, microcorte y tensión de fases indica irregularidad ($A=1$), o si un operador acciona la llave de parada ($MP=0$), el SASC debe llevar a la PCH al estado **Parar** dando el orden de cerrar el alabe ($SVC=1$). Si en el estado Marcha no se detecta movimiento en el eje del generador ($E2=0$), significa que la correa entre la turbina y generador está cortada o el servo no abrió el alabe del inyector ($C2=1$), ante estas situaciones el SASC debe llevar a la PCH al estado **Emergencia**, dando el orden de cerrar el alabe del inyector ($SVC=1$).

$$\begin{aligned} \text{Marcha} &\rightarrow (A;MP;E2 / LL;SVA;SVC) = (011 / 010) \\ \text{Transición a Paralelo} &\rightarrow (A;MP;E1 / LL;SVA;SVC) = (011 / 110) \\ \text{Transición a Parar} &\rightarrow (A;MP; / LL;SVA;SVC) = (10 / 001) \quad \text{o} \quad (A;MP / LL;SVA;SVC) = (01 / 001) \\ \text{Transición a Emergencia} &\rightarrow (E2 / LL;SVA;SVC) = (0 / 001) \quad \text{o} \quad (C2 / LL;SVA;SVC) = (1 / 001) \end{aligned}$$

- **Estado Paralelo.** Al ingresar a este estado, el SASC debe cerrar el interruptor principal (LL=1) y el generador queda en paralelo con la red. Durante este estado la señal de apertura del alabe debe mantenerse (SVA=1) hasta que la corriente generada alcance un valor predeterminado (B1=1), instante en que el SASC debe detener la apertura del alabe (SVA=0), haciendo pasar a la PCH al siguiente estado denominado **Generación**. Si durante el estado Generación los sensores de falta de agua, falta de fase, sobretensión, microcorte, tensión de fase detectan irregularidades (A=1), o si un operador acciona la llave de parada (MP=0), el SASC debe llevar a la PCH al estado **Parar** dando la orden de cerrar el alabe (SVC=1). Si en el estado Generación se produce un aumento de temperatura de bobinado (D=1) o es detectada una sobrecorriente (B2=1), el SASC deberá llevar a la PCH al estado **Emergencia**, dando la orden de cerrar el alabe (SVC=1).

Paralelo → (A;MP;E1 / LL;SVA;SVC) = (011 / 110)

Transición a Generación → (A;MP;E1;B1 / LL;SVA;SVC) = (0111 / 110)

Transición a Parar → (A;MP; / LL;SVA;SVC) = (10 / 001) o (A;MP / LL;SVA;SVC) = (01 / 001)

Transición a Emergencia → (D / LL;SVA;SVC) = (1 / 001) o (B2 / LL;SVA;SVC) = (1 / 001)

- **Estado Generación.** Continúa en este estado hasta que se produzcan algunas de las irregularidades en los sensores mencionados anteriormente (A=1), o si un operador active la llave para parar (MP=0) o es detectada una sobrecorriente (B2=1). Con estas condiciones el SASC debe llevar a la PCH al estado **Parar**. En caso que se detecte temperatura excesiva en el bobinado del generador (D=1) o se cortó la correa entre turbina y generador funcionando este último como motor (B1=0), el SASC deberá pasar a la PCH al estado **Emergencia**.

Generación → (A;MP;E1 / LL;SVA;SVC) = (011 / 110)

Transición a Parar → (A;MP; / LL;SVA;SVC) = (10 / 001) o (A;MP / LL;SVA;SVC) = (01 / 001)

Transición a Emergencia → (D / LL;SVA;SVC) = (1 / 001) o (B2 / LL;SVA;SVC) = (1 / 001) o (B1 / LL;SVA;SVC) = (0 / 001)

- **Estado Emergencia.** El SASC ordena la apertura del interruptor principal (LL=0) y el cierre el alabe en la turbina (SVC=1). Cuando el SASC detecta la señal del alabe cerrado (C2=1) se detiene el proceso y genera una señal de **Alarma**.

Emergencia → (C2 / LL;SVA;SVC) = (0 / 001)

Transición a ALARMA → (C2 / LL;SVA;SVC) = (1 / 000)

- **Estado Parar.** En este estado el SASC debe ordenar la apertura del interruptor principal (LL=0) y el cierre del alabe en la turbina (SVC=1). Cuando el SASC detecta el alabe cerrado (C2=1), la PCH debe pasar al estado **Detenido Normal**. De esta manera continúa la secuencia de generación de forma autónoma.

Parar → (C2 / LL;SVA;SVC) = (0 / 001)

Transición a Detenido Normal → (C2 / LL;SVA;SVC) = (1 / 000)

Cabe destacar que en análisis de funcionamiento anterior, por razones de simplificación no se tuvieron en cuenta la etapa de carga de la batería, que para este caso particular, también lo comanda el SASC de la central. Por los mismos motivos no se tuvo en cuenta ocasionales fallas que puedan presentarse en los finales de carrera (C1 y C2) provistos al servo para la detección del cierre y la apertura total del alabe del inyector. Teniendo en cuenta la secuencia comentada anteriormente y las simplificaciones efectuadas, el diagrama de transición de estados que describe el funcionamiento autónomo de la PCH se presenta en la figura 4. En la misma no se encuentran los estados de las variables de entradas que no intervienen en las transiciones.

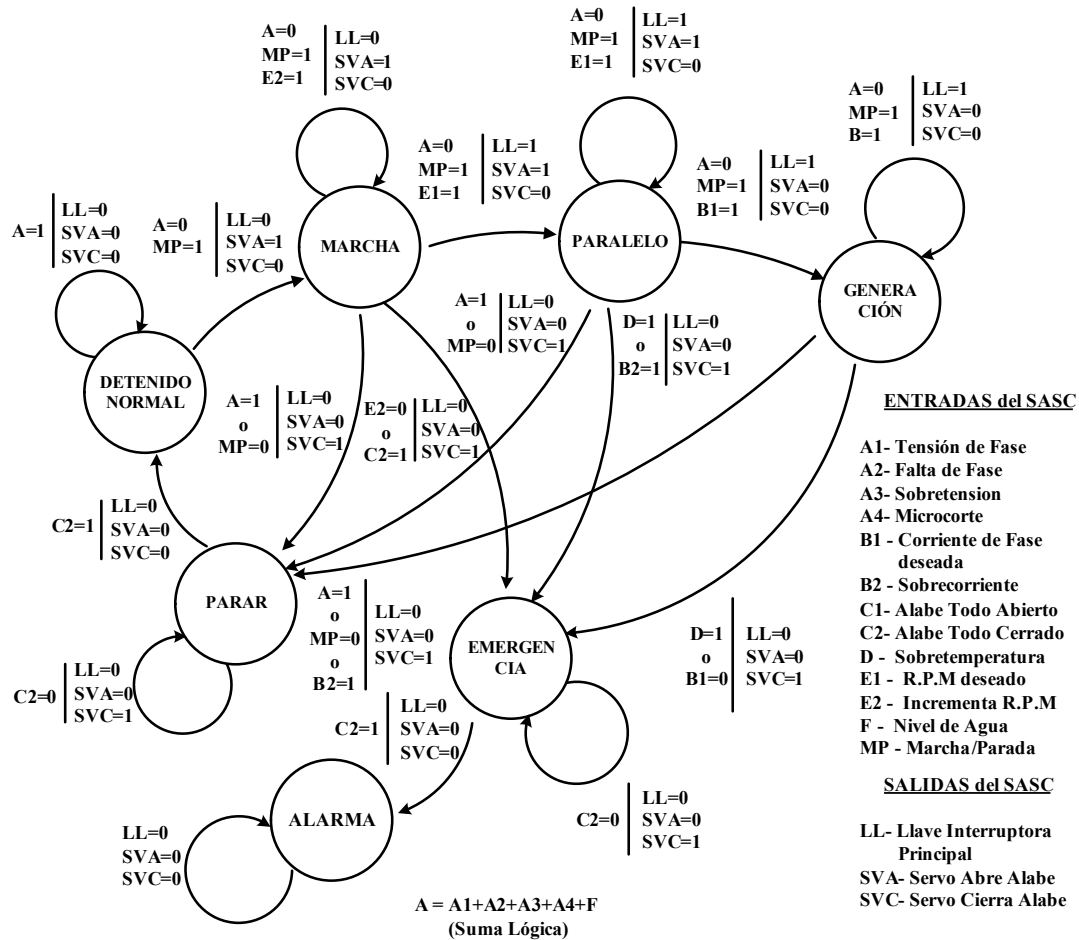
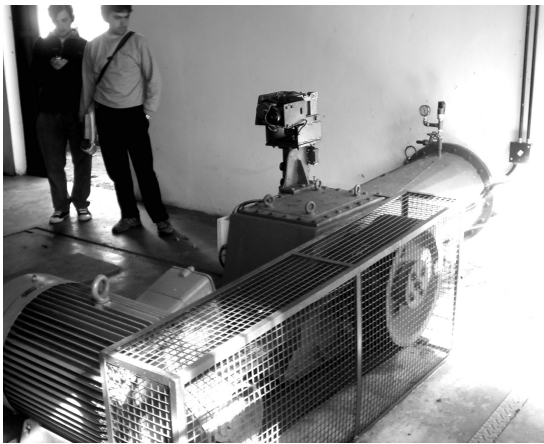


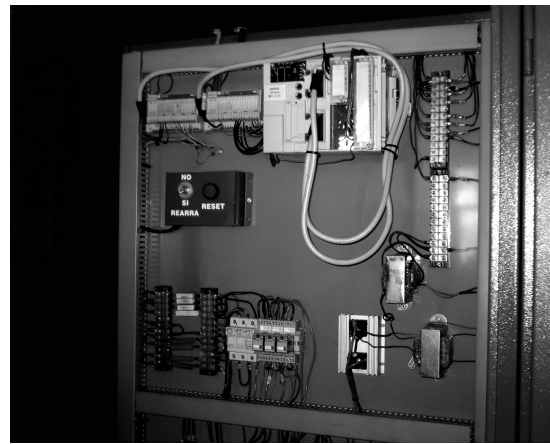
Figura 4: Diagrama de transición de estados que representa el funcionamiento autónomo de la PCH.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

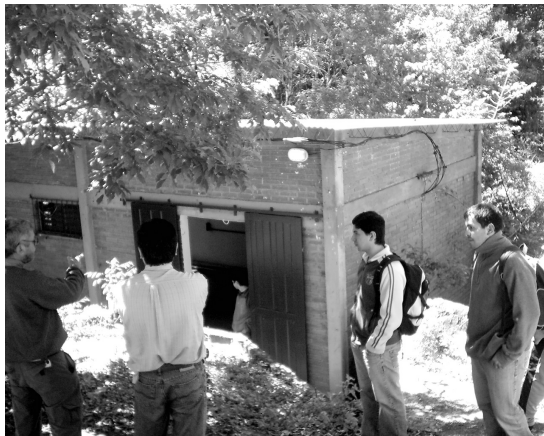
Como puede apreciarse, el diagrama de transición de estados resume las acciones que deben efectuarse en las distintas etapas de funcionamiento autónomo de la central, proporcionando información muy importante para la implementación del automatismo planteado. El uso del concepto de máquina de estado en el diseño del sistema de automatización, supervisión y control aplicado a pequeñas centrales hidroeléctricas, es viable pudiéndose generalizar a otros casos donde la operación de la central resulte más compleja. El diseño de dicho sistema, parte del diagrama de transición de estados, el cual representa secuencia de funcionamiento, por lo tanto el éxito del mismo parte de un exhaustivo análisis de funcionamiento del sistema en situaciones de operación normal y de emergencia. Estas situaciones también definen los sensores y actuadores necesarios a instalar en la pequeña central. La descripción detallada del funcionamiento de la central permite arribar con facilidad la obtención del diagrama de transición de estados, por lo tanto esta descripción necesita de la participación de un equipo de trabajo de manera tal que se consideren todas las condiciones de funcionamiento (Muñoz y Kairiyama, 2007).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5: Fotos del Aprovechamiento Hidroeléctrico Arroyo el Tigre. (a) Turbina y generador; (b) Sistema de automatización, supervisión y control; (c) Sala de máquina ubicada en el monte; (d) Tubería que ingresa el agua a la turbina.

REFERENCIAS

- Uyemura, J. P. (2000). Diseño de sistemas digitales, un enfoque integrado, pp. 375 – 386. Thomson editores, México.
- Caballero A. L. (2000). Generación Asincrónica su aplicación a las energías renovables. Tesis de doctorado, 2000, II.
- Kurtz V. H., Anocibar H. R. (2005). Sistema mixto para el control de la generación en micro centrales hidroeléctricas. Encuentro Latinoamericano y del Caribe, Sobre Pequeños Aprovechamiento Hidroenergéticos, ELPAH XI, Chile.
- Kurtz V. H., Botteron F. (2007). Control Híbrido de Tensión y Frecuencia para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Autónomo. XXII Congreso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, CRICTE 2007, Brasil.
- Muñoz H. E., Kairiyama J. C. (2007). Control y Automatismo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Congreso Nacional de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, HYFUSEN 2007, Argentina.

ABSTRACT: This paper describes the state machine concept applied to the design of automated, supervisory and control system on a small hydroelectric plant. The state machine concept is useful to analyze, describe and solve an automatic sequential system, where the performance of the system produces sequences of states. Associated to the state machine, a graphical model called state transition diagram, permit the representation of the system as a whole easy understandable way. The diagram contains complete function information and design pattern of the automated, supervisory and control system. The design step of the system is described on a functioning real case, installed in Misiones “Arroyo El Tigre Hydroelectric Development”.

Keywords: Small hydroelectric plant, state machine, automation.