

# REPRESENTACIÓN MEDIANTE GRAFCET DEL ACCIONAMIENTO DE GENERADORES SINCRÓNICOS EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MODERNIZADA

## GAF CET REPRESENTATION OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR AUTOMATIC SEQUENCE IN A MODERN HYDROELECTRIC POWER PLANT

DAVID ANDRÉS GALEANO GONZÁLEZ

*Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, galeanodavid@gmail.com*

HÉCTOR ANTONIO BOTERO CASTRO

*Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, habotero@unalmed.edu.co*

Recibido para revisar diciembre 17 de 2006, aceptado abril 27 de 2007, versión final julio 12 de 2007

**RESUMEN:** En este trabajo se muestra el desarrollo de los diagramas Grafcet (Gráfico funcional de control de etapas y transiciones) que describen el accionamiento de una unidad de generación hidroeléctrica del Sistema Interconectado Nacional. El enfoque del trabajo se centra en la metodología utilizada y en algunos diagramas Grafcet obtenidos para el caso de paro normal de la unidad de generación. Se demuestra que, con la utilización de estos diagramas, es posible mejorar la operación de la planta, lograr un mayor entendimiento del accionamiento y facilitar el entrenamiento de nuevo personal.

**PALABRAS CLAVE:** Generador sincrónico, automatismo, lenguaje de control, secuencia.

**ABSTRACT:** In this work we show the development of Grafcet diagrams to describe the automatic sequence in a hydroelectric power plant of the national interconnected power system. The focus of this work is centered in the methodology utilized and some Grafcet diagram obtained for the sequences of shut down of the generation unity. We show than the utilization of Grafcet diagrams is possible to achieve the operation in the plant, to have a major understanding of the automatism and to facilitate the understanding of the plant for the new technical personnel.

**KEY WORDS:** Synchronous generator, automatic sequence, language of control, sequence.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos, a los cuales se deben enfrentar los ingenieros y operarios de una central hidroeléctrica, es comprender correctamente las diferentes secuencias automatizadas en los generadores sincrónicos. Las secuencias automatizadas que se realizan en estos generadores son básicamente cinco:

arranque, paro normal, paro de emergencia, paro rápido y paro parcial. La correcta comprensión de estas secuencias permite resolver las contingencias en forma rápida y segura. Sin embargo, el conocimiento de las secuencias y de los detalles de las mismas no siempre está al alcance de los operarios, ya que mucha información se maneja de forma heurística o se adquiere por medio de la experiencia.

Como consecuencia de lo anterior, cuando ocurre un evento inesperado, o cuando una falla obliga a que la secuencia salga del ciclo normal de funcionamiento, se tienen pérdidas considerables de tiempo mientras se estudian las fallas y las posibles soluciones. Es en estos casos cuando, normalmente, se recurre a métodos experimentales de prueba y error para detectar el origen del problema y la posible solución.

Algunos autores han abordado este problema por medio de herramientas formales que permiten representar las secuencias de un automatismo y simplifican el proceso de búsqueda de fallas; algunas de estas herramientas son los diagramas Grafcet y las redes de Petri [1], [2], [3], [4].

Sin embargo, en la literatura y en el medio industrial del país, escasean las aplicaciones en este sentido, debido principalmente a la falta de cultura en la aplicación de métodos formales para planear secuencias automáticas y a la poca importancia que a ello se le otorga. En contraste, a nivel internacional estos métodos han logrado convertirse en estándares reconocidos por la industria y los fabricantes de equipos de automatización [5].

Con el fin de mostrar la aplicación documentada con una de estas herramientas en un proceso real, y motivar su utilización, en este artículo se resume la metodología y el resultado de desarrollar diagramas Grafcet para la central hidroeléctrica de Guadalupe IV de Empresas Públicas de Medellín. El trabajo se realizó con base en el conocimiento del sistema automatizado de los generadores sincrónicos, y contribuyó a la actualización documental de la central hidroeléctrica en un proceso de modernización de la misma. Los resultados muestran que la utilización de los diagramas obtenidos mejora el conocimiento del funcionamiento de la planta y sirve como guía para futuros cambios y expansiones en la misma. El artículo está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se muestra una idea general del sistema de control de generación del complejo Guadalupe IV, en la Sección 3 se explica la metodología utilizada para la elaboración de los diagramas Grafcet, en la Sección 4 se muestran y explican algunos diagramas Grafcet obtenidos,

en la Sección 5 se realiza el análisis de los resultados y las aplicaciones de los diagramas Grafcet, y finalmente, en la Sección 6 se dan las conclusiones.

## **2. SISTEMA DE CONTROL GENERAL DE LA CENTRAL GUADALUPE IV MODERNIZADA**

Normalmente el control y la optimización de una cadena hidráulica se realiza desde un Centro de Control General, donde se ejecuta el control y el monitoreo de todas las unidades de la cadena y sus servicios auxiliares.

Para seguridad y confiabilidad en la operación se han creado cinco niveles de control jerarquizados. La Figura 1 ilustra los sitios de acceso para las diferentes jerarquías de control. Los equipos de protección y emergencia están siempre presentes en todos los niveles de control en esta jerarquía.

Todos los dispositivos poseen un modo de selección para el tipo de control ya sea local o remoto. Cuando se encuentra seleccionado el modo local, el modo remoto se bloquea mediante lógica programada en el respectivo controlador lógico. En la Figura 1:

CCG: Centro de Control General

CND: Centro Nacional de Despacho

CCCG: Centro de Control Cadena Guadalupe

UCP: Unidad de Control programada

A continuación se explican cada uno de los niveles de control

### **2.1 Primer Nivel De Control**

El primer nivel de control es realizado de manera local en los dispositivos primarios como válvulas, motores, interruptores, entre otros. Estos dispositivos son manejados por elementos del segundo nivel de control, dependiendo de un selector de modo de operación local o remota. Este tipo de control sólo se utiliza durante el mantenimiento y en caso de emergencia.

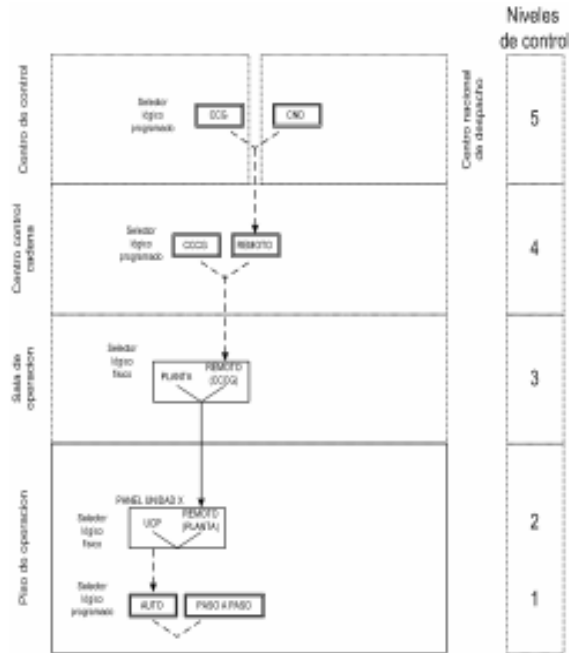
Los dispositivos de primer nivel de control son:

- Equipos primarios de generación (Turbina, generador, interruptores, transformadores (de potencia, medida y protección)).

- Bombas, compresores, válvulas y puertas de acceso.

- Tableros de control y mandos locales.

- Instrumentación de campo inteligente y entradas/salidas remotas (RIO) para: unidades de generación, transformadores de potencia, válvulas, bombas, compresores, puertas de acceso.
- Tableros de control y mandos locales.
- Sistemas auxiliares de AC y DC de la planta.
- UPS (Uninterruptible Power Source).
- Sistema anti-incendio de generadores y de la planta.



**Figura 1.** Accesos a las jerarquías del control  
**Figure 1.** Hierarchy of control

**2.2 Segundo Nivel De Control**

El segundo nivel de control se ejecuta sobre dispositivos primarios automatizados en grupos, como el regulador de turbina, el regulador de tensión y los relés de protección.

Los dispositivos de segundo nivel de control son:

- Computador de unidad de generación.
- Regulador de velocidad y sistema de excitación.
- Computador de servicios generales y auxiliares de la planta.
- Sistemas de protección y medida.
- Computador de control de generación.

**2.3 Tercer Nivel De Control**

El tercer nivel de control se ejecuta desde la sala de operación de la central y le compete la operación de toda la planta. Este nivel de control depende de los selectores de modo de control local o remoto de las unidades generadoras, los equipos asociados de servicios auxiliares, los filtros y las compuertas.

**2.4 Cuarto Nivel De Control**

El cuarto nivel de control se ejecuta desde la sala de control general y realiza el control de toda la cadena hidráulica. Este nivel el control está distribuido entre los controladores de las plantas, mediante los cuales se manejan consignas y comandos, para lograr los objetivos deseados por el operador de la cadena hidráulica.

**2.5 Quinto Nivel De Control**

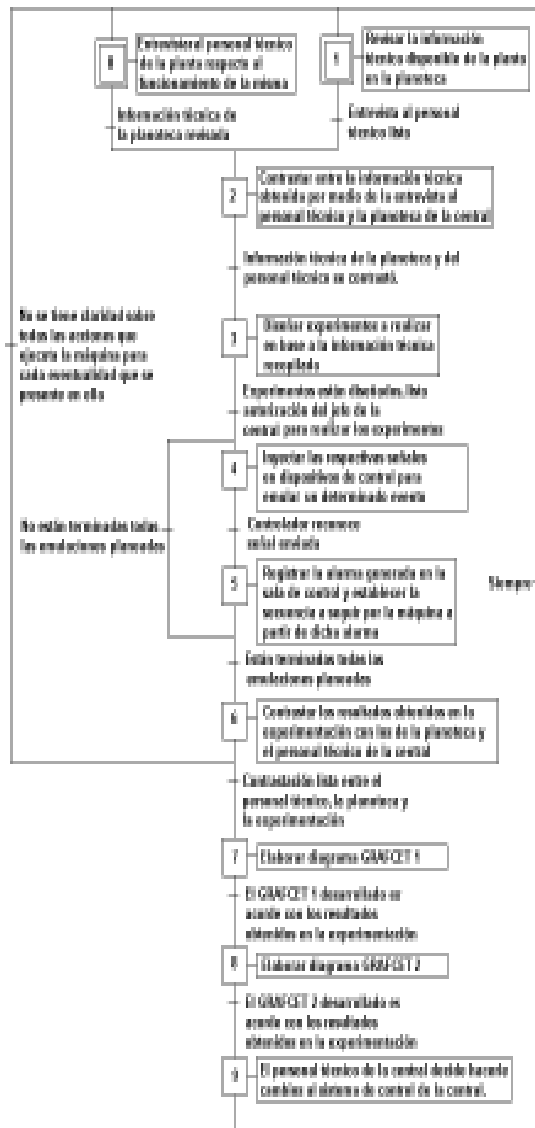
El quinto nivel de control es el control remoto de la cadena hidráulica y se hace desde el Centro de Control Guadalupe o desde el Centro Nacional del Despacho. En la modernización de la central Guadalupe IV algunos elementos de este nivel fueron actualizados. Específicamente se remplazaron los Controladores Lógicos Programables (PLC) antiguos y se instaló una red de área local (LAN) con computador de planta.

**3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS DIAGRAMAS GRAFCET**

Con el fin de realizar los diagramas Grafcet para las secuencias automáticas de los generadores sincrónicos, se desarrolló una metodología de trabajo. La metodología se ilustra en la Figura 2. Las fases de la metodología se explican a continuación:

*Levantamiento y reconciliación de la información:* En esta fase fue necesario verificar el conocimiento empírico que tenían las personas a cargo de la operación (ingenieros,

tecnólogos y técnicos) con la información técnica disponible en la planoteca.



**Figura 2.** Metodología utilizada para la realización de los Grafcet

**Figure 2.** Used methodology for the Grafcet realization

El objetivo de lo anterior era tener una visión global del grado de concertación que había entre ambas fuentes de información y la realidad. Para el registro de la información se utilizaron tablas especiales, desarrolladas para este fin, por algunos fabricantes de generadores [6].

*Validación de la información por el personal experto:* A partir de este levantamiento

sistemático y organización de la información, se realizaron varias encuestas al personal experto encargado del proyecto de modernización. El resultado de estas encuestas permitió comprender la secuencia de respuestas que tendría el accionamiento de los generadores sincrónicos al efectuarse una maniobra errónea.

*Diseño de las pruebas experimentales de verificación:* Con base en la información recopilada en el paso anterior, se procedió a realizar el diseño de las pruebas experimentales que permitirían verificar la validez del conocimiento adquirido. Estas pruebas se basaron en la inyección de señales que emularon las posibles fallas y los eventos que ocurren normalmente en la operación del sistema.

*Ejecución de los ensayos e inyección de señales:* Posteriormente, se realizaron los ensayos de campo, emulando los posibles eventos desde los gabinetes de control. Esta emulación se hizo inyectando la señal correspondiente a un evento o falla, en el terminal adecuado, y verificando la secuencia de operaciones que se realizaba ante dicho cambio. Debido a que la experimentación se realizó inyectando señales en tiempos específicos, no fue necesario someter los generadores sincrónicos a condiciones peligrosas. Estas emulaciones se realizaron en cada una de las unidades remotas de entrada y salida (RIO : Remote Input Output) y en los enlaces de los dispositivos (Linking Devices). La señal a inyectar dependía de la naturaleza del componente de la central que se estuviera evaluando (Dispositivos inteligentes o no inteligentes). Por ejemplo, las emulaciones de las fallas en los gabinetes de control se realizaron cortocircuitando la entrada del elemento a la RIO (o al Linking Device) con la salida a la sala de control de la central, con el fin de registrar, en la sala de control, el tipo de alarma que se generaba, y a partir de esto determinar la secuencia de acciones de cada generador sincrónico.

Procediendo sistemáticamente como se acaba de explicar, se evaluaron decenas de posibles eventualidades que podrían ocurrir dentro de la operación de la máquina sincrónica y se documentó cada evento.

*Validación de los resultados desde la sala de control:* Finalmente, luego de obtener la información de todas las señales con las respectivas acciones que ejecutaba la máquina sincrónica, al dispararse por ejemplo alguna de las protecciones del generador, se hizo una supervisión detallada en la sala de control de las fallas en operación normal de la máquina y se contrastaron con las obtenidas experimentalmente en los gabinetes de control (al cortocircuitar la entrada del elemento con la salida). Esto último se realizó con el fin de tener plena seguridad de que la máquina sincrónica si tenía el comportamiento predicho cuando ocurría una eventualidad.

*Obtención del Grafcet Nivel I (Grafcet 1):* Con la información recogida se organizaron los diagramas Grafcet, comenzando con una descripción general del comportamiento de la máquina sincrónica en sus diferentes etapas, ya sea arranque o cualquiera de sus paros. A esta Grafcet se le llama Grafcet nivel I.

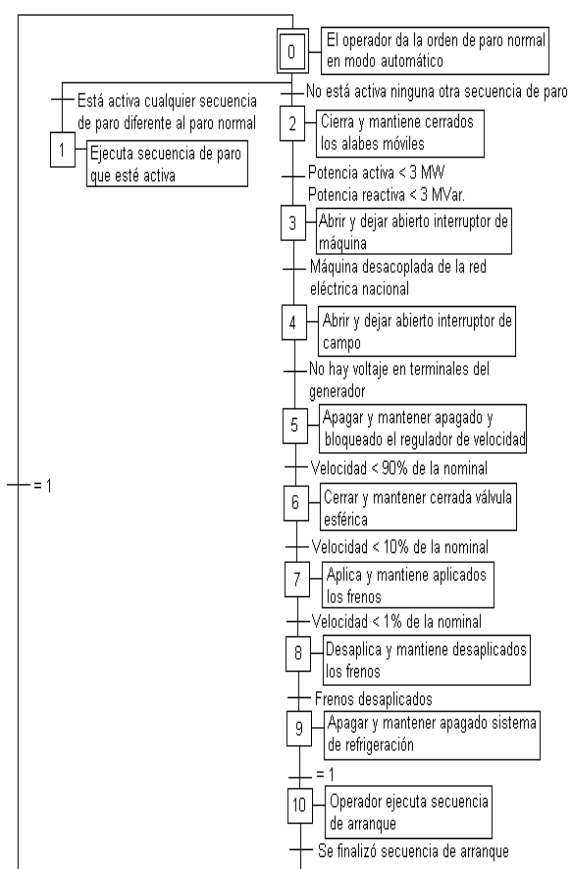
*Obtención del Grafcet Nivel II (Grafcet 2):* A partir del Grafcet nivel I se analizan detalladamente cada una de las etapas del mismo, haciendo énfasis en los equipos y sus acciones sobre el sistema general de control y de la máquina sincrónica, para desarrollar el Grafcet 2. Por lo tanto el Grafcet 2 involucra los elementos tecnológicos asociados. Mediante el Grafcet 2 se obtiene una visión detallada de la interacción de la máquina sincrónica con cada equipo en particular; de esta forma se puede analizar la acción que realizará la máquina sincrónica cuando un equipo en particular ha presentado una falla. A continuación se muestran algunos diagramas Grafcet obtenidos.

#### 4. DIAGRAMAS GRAFCET OBTENIDOS

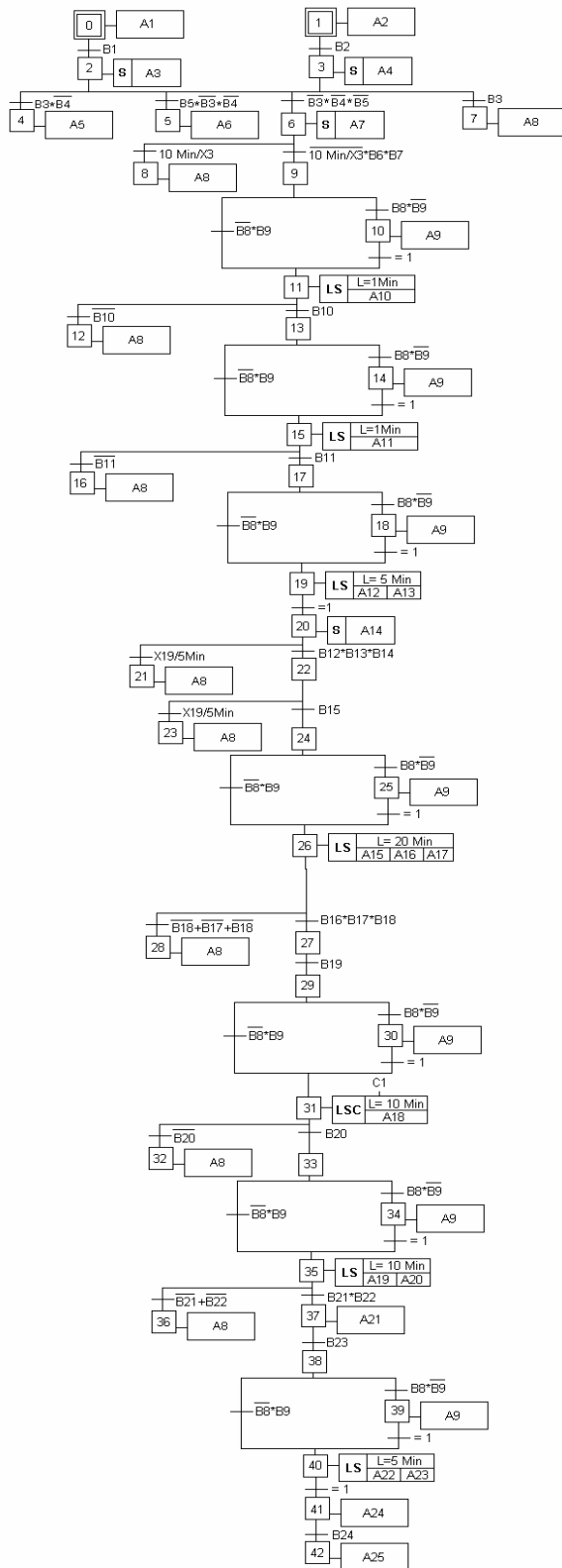
En las Figuras 3 y 4 se presentan dos de los diez Grafcet elaborados para la central hidroeléctrica de Guadalupe IV, mostrando así la diferencia entre el Grafcet 1 y el Grafcet 2. Debido a limitaciones de espacio no se pueden incluir todos los diagramas desarrollados. Sin embargo,

los detalles se pueden consultar en [7], [8]. Como puede observarse, el Grafcet 1 describe el funcionamiento del accionamiento sin tener en cuenta los componentes tecnológicos que lo implementan. Este diagrama es muy cercano al lenguaje verbal que manejan las personas expertas y los operarios del automatismo, en este caso los ingenieros y técnicos de la central.

En la Figura 4, se tiene el Grafcet 2 obtenido desde el Grafcet 1. El paso entre estos dos diagramas se realiza considerando los componentes tecnológicos que intervienen en el automatismo. La nomenclatura es la típica de la norma Grafcet; si no está familiarizado con la misma, se recomienda consultar [5] y [9] para su interpretación. Adicionalmente, para comprender el Grafcet 2 mostrado en la Figura 4, es necesario tener en cuenta una lista de los símbolos de los elementos que intervienen; dicha lista se muestra a continuación.



**Figura 3. Grafcet 1 de paro normal de la máquina**  
**Figure 3. Grafcet 1 machine shut down**



**Figura 4.** Grafset 2 de paro normal de la máquina  
**Figure 4.** Grafset 2 machine shut down

- A1:** Operador de la máquina envía orden de paro normal automático al controlador de unidad  
**A2:** Operador de la máquina envía orden de paro normal paso a paso al controlador de unidad  
**A3:** Controlador de unidad memoriza la orden de realizar secuencia de paro normal en forma automática  
**A4:** Controlador de unidad memoriza la orden de realizar secuencia de paro normal en forma paso a paso  
**A5:** Ejecuta toda la secuencia de paro rápido  
**A6:** Ejecuta toda la secuencia de paro parcial  
**A7:** Cerrar alabes móviles  
**A8:** Ejecuta toda la secuencia de paro de emergencia  
**A9:** Operador da la orden de continuar con la secuencia de paro normal  
**A10:** Abrir interruptor del generador  
**A11:** Abrir interruptor de campo  
**A12:** Cerrar limitador de apertura  
**A13:** Apagar regulador de velocidad  
**A14:** Bloquear regulador de velocidad  
**A15:** Cerrar válvula esférica  
**A16:** Encender lubricación forzada  
**A17:** Cerrar distribuidor  
**A18:** Aplicar frenos  
**A19:** Desaplicar Frenos  
**A20:** Apagar lubricación forzada  
**A21:** Monitorea velocidad de la máquina  
**A22:** Apagar refrigeración de la máquina  
**A23:** Cerrar válvula de aislamiento  
**A24:** Operador da orden de secuencia de arranque  
**A25:** Va a la etapa 0 de la secuencia de paro normal  
**B1:** Controlador recibió orden de hacer paro normal automático  
**B2:** Controlador recibió orden de hacer paro normal paso a paso  
**B3:** Está activa secuencia de paro rápido  
**B4:** Está activa secuencia de paro de emergencia  
**B5:** Está activa secuencia de paro parcial  
**B6:** Potencia activa < 3 MW  
**B7:** Potencia reactiva < 3 MVar  
**B8:** Está activa secuencia paso a paso de paro normal  
**B9:** Está activa secuencia automática de paro normal  
**B10:** Interruptor del generador está abierto

- B11:** Interruptor de campo abierto
- B12:** Limitador de apertura < 3% de abertura total
- B13:** Regulador de velocidad apagado
- B14:** Regulador de velocidad bloqueado
- B15:** Velocidad < 90% de la nominal
- B16:** Presión lubricación forzada en rangos normales
- B17:** Válvula esférica cerrada
- B18:** Distribuidor en menos del 2% de su abertura normal
- B19:** Velocidad < del 10 % de la nominal
- B20:** Frenos aplicados
- B21:** Frenos desaplicados
- B22:** Lubricación forzada aplicada
- B23:** Velocidad < 1% de la nominal
- B24:** Secuencia de arranque finalizada satisfactoriamente
- C1:** Velocidad > 1% de la nominal

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Con base en los diagramas Grafcet obtenidos se procedió a utilizar esta información para aclarar situaciones poco comprendidas. Por ejemplo:

- Se pudo detectar redundancias en el control de las máquinas sincrónicas, las cuales no estaban documentadas en la planoteca de la central hidroeléctrica.

- Se encontró en los Grafcet desarrollados ciertas jerarquías en los paros que se pueden realizar, las cuales no estaban completamente claras. Por ejemplo, se detectó que es prioritario el desarrollo de un paro rápido sobre un paro parcial y de un paro de emergencia sobre un paro rápido.

- Se pudo verificar que en un paro de emergencia, la máquina sincrónica queda sometida sólo a la ejecución del automatismo por parte del controlador lógico, y en caso de fallar este, se deberá tener un plan de contingencia. Lo anterior es importante porque en caso que el automatismo no ejecute las etapas correctas, se bloquearía el sistema, lo cual

afectaría los otros dispositivos de la central o del cuarto de máquinas.

Los descubrimientos anteriores demostraron que el conocimiento de una secuencia, normalmente almacenado en el cerebro del ser humano, no necesariamente se tiene en una forma organizada y clara, tal que le sirva al operario o al ingeniero para discernir rápidamente en caso de una eventualidad. En este mismo sentido, algunos autores han demostrado que el estrés y las condiciones ambientales de ruido y pérdida momentánea de la memoria no permiten que, en muchos casos, se tomen decisiones acertadas [10]. Este último punto es donde radica la importancia de desarrollar y utilizar diagramas como los obtenidos.

Los Grafcet desarrollados también mostraron que la programación de las secuencias en las máquinas modernizadas siguen procedimientos lógicos que velan por la protección de los distintos subsistemas, y que se tienen instalados equipos redundantes para el caso en que falle alguno. Con ello, estos diagramas pueden servir como una herramienta de seguimiento en una interventoría.

Los Grafcet también ayudaron a visualizar la programación realizada en el controlador lógico, de forma lógica y secuencial, mostrando que efectivamente este vela por el correcto funcionamiento de la máquina, además de brindarle protección frente a eventualidades que en la planta puedan ocurrir.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizaron los diagramas Grafcet 1 y 2 para la central hidroeléctrica de Guadalupe IV. Las secuencias analizadas fueron: arranque, paro normal, paro rápido, paro de emergencia y paro parcial. Estos diagramas se elaboraron para las tres máquinas modernizadas, contribuyendo así con una documentación extra que describe en forma confiable el funcionamiento y operación del accionamiento de los generadores sincrónicos.

Los diagramas mostraron ser útiles para encontrar redundancias en los automatismos implementados las cuales no estaban completamente documentadas. Adicionalmente

estos diagramas permitieron visualizar las opciones con que cuenta el automatismo diseñado para los generadores sincrónicos cuando ocurre alguna eventualidad.

Con un seguimiento juicioso de los Grafcet para las diferentes secuencias, se puede ahorrar tiempo (y por supuesto dinero) en la búsqueda de fallas, porque basta con ubicarse en la etapa que se está desarrollando en el momento en que ocurre un incidente y observar en el Grafcet 2 los dispositivos que están comprometidos, llevando así a un diagnóstico rápido de la causa de la falla.

Se espera que, en un futuro próximo, los diferentes Grafcet sirvan para encontrar fallas en el comportamiento de las máquinas sincrónicas durante su operación, conocer la causa de la falla y proponer soluciones. Así mismo se espera que estos diagramas se elaboren para otras centrales de generación y permitan reducir los tiempos de entrenamiento de operarios y practicantes.

## REFERENCIAS

- [1] BALCELLS, J; ROMERAL, J. Automatas Programables. Marcombo. 1997
- [2] CAICEDO, G; PINEDO, C.R; ARBOLEDA, C.A. Representación Mediante Grafcet del Mando Automático en Generación Hidroeléctrica. Artículo presentado en el III congreso de la Asociación Colombiana de Automática. Universidad Católica de Oriente. Rionegro. 1998
- [3] WANG, JIACUN. Timed Petri Nets: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers. 1998.
- [4] ZAPATA, G; HENAO, L; PATIÑO, J; GÓMEZ, J. Sistema de Diagnóstico de Fallas Para Sistemas de Transmisión de Energía Utilizando Redes de Petri. Revista Energética. Medellín. Vol 33. 2005.
- [5] LEWIS, R.L. Programming Industrial Control Systems Using IEC 1131-3. Revised edition. The Institution of Electrical Engineers. London. 1998.
- [6] BÜHLER, H; SCHATZMAN, G. Automatic Sequence Control and Automatic Operation of Turbine-Generator Units in Thermal Power Stations. Escher Wyss News. N 3. 1966.
- [7] GALEANO, D. Manual de Operación y Control de la Planta de Guadalupe IV. Planoteca Central Hidroeléctrica Guadalupe IV EPM. 2005-i.
- [8] GALEANO, D. Operación y Funcionamiento de los Generadores Sincrónicos Modernizados en la Central Hidroeléctrica de Guadalupe IV. Trabajo de grado de Ingeniero Electricista. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2005.
- [9] PEIRÓ, T. Análisis y Diseño Gráfico de Automatismos Secuenciales GRAFCET (teoría). Universidad Politécnica de Valencia, España. 1998.
- [10] NOYES, J.; BRANSBY M. People in Control: Human Factors in Control Room Design. The Institution of Electrical Engineers. London. 2001.