

OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES SINCRÓNICOS  
MODERNIZADOS EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GUADALUPE IV.

DAVID ANDRÉS GALEANO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2006

OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES SINCRÓNICOS  
MODERNIZADOS EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GUADALUPE IV.

DAVID ANDRÉS GALEANO GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Director  
HÉCTOR ANTONIO BOTERO  
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2006

Nota de aceptación

---

---

---

---

Firma revisión

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Olga (mi mamá) y toda mi familia, cuyo apoyo a lo largo de mis estudios fue clave y esencial.

Héctor Antonio Botero, Ingeniero Electricista y director de este TDG, por su constante apoyo y retroalimentación dada durante la ejecución del mismo.

Profesores de la carrera de Ingeniería Eléctrica por haberme guiado en mi formación académica.

Ingenieros, tecnólogos y técnicos del área de Guadalupe (Empresas Públicas de Medellín) por su constante apoyo durante la práctica empresarial hecha con EEPPM y por compartir conmigo su inmenso conocimiento.

## CONTENIDO

	Pág.
1. JUSTIFICACIÓN	1
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO GUATRÓN	4
2.1. CONFIGURACIÓN DE LA CADENA HIDRÁULICA	4
2.2. GENERALIDADES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GUADALUPE IV	7
2.3. MODERNIZACIÓN DE LA PLANTA DE GUADALUPE IV	9
2.3.1. Sistema de control antiguo	9
2.3.2. Sistema de control nuevo	12
2.3.2.1. Operación de las máquinas a partir del programa digivis	18
3. ACCIONES DEL CONTROL EN LAS MÁQUINAS GENERADORAS DE GUADALUPE 4	26
3.1. PLAN DE MANDO SOBRE ETAPAS EN LAS MÁQUINAS	26
3.2. TIPO DE PARO SEGÚN LA ETAPA Y LA CAUSA	37
4. ARRANQUE DE LA MÁQUINA	40
4.1. GRAFCET 1 ARRANQUE DE LA MÁQUINA	43
4.1.1. Notas aclaratorias del Grafcet 1 de arranque.	44
4.2. GRAFCET 2 ARRANQUE DE LA MÁQUINA	46
4.2.1. Convención del grafcet 2 de arranque de la máquina.	49
4.2.1.1. Subprograma 1 De Arranque	52
4.2.1.2. Subprograma 2 De Arranque	53
4.2.2. Notas aclaratorias del Grafcet 2 de arranque.	55

	Pág
5. PARO NORMAL DE LA MÁQUINA	56
5.1. GRAFCET 1 PARO NORMAL DE LA MÁQUINA	56
5.1.1. Notas aclaratorias al grafcet 1 de paro normal de la máquina	57
5.2. GRAFCET 2 PARO NORMAL DE LA MÁQUINA	58
5.2.1. Convención del grafcet 2 de paro normal de la máquina	60
5.2.2. Notas aclaratorias al grafcet 2 de paro normal de la máquina	62
6. PARO DE EMERGENCIA DE LA MÁQUINA	64
6.1. GRAFCET 1 PARO DE EMERGENCIA DE LA MÁQUINA	64
6.1.1. Notas aclaratorias al grafcet 1 de paro de emergencia de la máquina	65
6.2. GRAFCET 2 PARO DE EMERGENCIA DE LA MÁQUINA	66
6.2.1. Convención del grafcet 2 de paro de emergencia de la máquina	67
6.2.2. Notas aclaratorias al grafcet 2 de paro de emergencia de la máquina	69
7. PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA	71
7.1. GRAFCET 1 PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA	71
7.1.1. Notas aclaratorias al grafcet 1 de paro rápido de la máquina	72
7.2. GRAFCET 2 PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA	73
7.2.1. Convención del grafcet 2 de paro rápido de la máquina	74
7.2.2. Notas aclaratorias al grafcet 2 de paro rápido de la máquina	75
8. PARO PARCIAL DE LA MÁQUINA	77
8.1. GRAFCET 1 PARO PARCIAL DE LA MÁQUINA	77
8.1.1. Notas aclaratorias al grafcet 1 de paro parcial de la máquina	78
8.2. GRAFCET 2 PARO PARCIAL DE LA MÁQUINA	78
8.2.1. Convención del grafcet 2 de paro parcial de la máquina	79
8.2.2. Notas aclaratorias al grafcet 2 de paro rápido de la máquina	79
CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
• Figura 1. Mapa de la distribución de la cadena hidráulica de Guatrón.	5
• Figura 2. Jerarquías de control del sistema antiguo	11
• Figura 3. Accesos a las jerarquías del control	14
• Figura 4. Esquema de control a instalar en la cadena hidroeléctrica	17
• Figura 5. Pantalla de operación de la máquina en el Digivis	19

## LISTA DE CUADROS

	Pag.
• Cuadro 1. Generalidades hidráulicas de la central hidroeléctrica Guadalupe IV	8
• Cuadro 2. Especificaciones mecánicas de las turbinas en las máquinas de Guadalupe IV	8
• Cuadro 3. Especificaciones eléctricas de las máquinas de la hidroeléctrica de Guadalupe IV	9
• Cuadro 4. Acciones de control y sitios donde se pueden ejecutar	12
• Cuadro 5. Etapas configuradas en la pantalla del Digivis que deben cumplirse para llevar la máquina desde “Parada” hasta “Sincronizada”	22
• Cuadro 6. Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro normal	23
• Cuadro 7. Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro parcial.	23
• Cuadro 8. Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro rápido	24
• Cuadro 9. Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro de emergencia.	24
• Cuadro 10. Plan de mando sobre la máquina durante el arranque	28
• Cuadro 11. Plan de mando sobre la máquina durante el paro normal	31
• Cuadro 12. Plan de mando sobre la máquina durante el paro parcial	33
• Cuadro 13. Plan de mando sobre la máquina durante el paro rápido	34
• Cuadro 14. Plan de mando sobre la máquina durante el paro de emergencia	35
• Cuadro 15. tipos de paro según la etapa que se esté ejecutando en el digivis durante el arranque	38
• Cuadro 16. Pasos a seguir en caso de no franquearse alguna transición en el arranque	45



## RESUMEN

Este trabajo reúne los aspectos fundamentales operativos de la central hidroeléctrica de Guadalupe IV producto del proceso de modernización y su objetivo principal es servir como fuente de consulta a ingenieros y operarios de la central hidroeléctrica de Guadalupe IV sobre el funcionamiento y la operación de las máquinas modernizadas.

En los primeros capítulos se hace una introducción a la planta y toda su estructura. Luego se explica, en capítulos posteriores, la forma operativa de la misma.

Como resultado final del trabajo de grado se exponen los gráficos GRAFCET que servirán de apoyo en la comprensión del comportamiento de las diferentes secuencias que se pueden presentar en la máquina: arranque, paro normal, paro de emergencia, paro rápido y paro parcial.

## INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas de Troneras, Guadalupe III y Guadalupe IV de Empresas Publicas de Medellin se encuentran en la actualidad en un proceso de modernización que incluye una renovación total de los controles de las centrales y en los sistemas de comunicación.

Estas centrales vienen funcionando desde los años 60's para Guadalupe III y los años 80's para Guadalupe IV cada una cuenta con sistemas de control que después de ser analizados por la firma Integral S.A se determinaron obsoletos o que su costo de mantenimiento era extremadamente alto como para ser rentable. Por lo anterior, la Subgerencia de Operación y Generación optó por invertir en modernizar las plantas de generación del sistema hidroeléctrico de Guadalupe.

El proceso de modernización incluye el cambio de los instrumentos de medición, Transformadores de Potencia, Reguladores de velocidad, reguladores de Voltaje, servicios auxiliares y las comunicaciones.

Por medio de este TDG se busca que la central se adapte a normas internacionales en cuanto a la descripción de sus sistemas automáticos, concretamente con la aplicación de la norma GRAFCET. Con la norma GRAFCET se facilitará la detección de fallas en los distintos modos de accionamiento de las máquinas modernizadas y se visualizará de forma más global todas las secuencias que deben cumplirse en la máquinas para un correcto funcionamiento. Lo anterior permitirá detectar de forma más rápida posibles fallas que en la unidad se estén presentando, dándole así al ingeniero otra herramienta que le ayudará a solucionar el problema de forma rápida y eficaz.

## 1. JUSTIFICACIÓN.

*A continuación se justificará la presentación de este TDG y su utilidad para la central hidroeléctrica de Guadalupe IV. Así mismo se expondrá la metodología utilizada para alcanzar el objetivo general propuesto en el trabajo: la creación de diagramas GRAFCET (Gráfico funcional de Control de Etapas y Transiciones) y la elaboración de tablas que ayudan a esclarecer la operación y control de la central.*

Las centrales hidroeléctricas de Troneras, Guadalupe III y Guadalupe IV de Empresas Publicas de Medellín (EPM) se encuentran en la actualidad en un proceso de modernización que incluye una renovación total en los controles de las máquinas y en sus sistemas de comunicación.

El proceso de modernización incluye el cambio de los instrumentos de medición, transformadores de potencia, reguladores de velocidad, reguladores de voltaje, servicios auxiliares, sistemas de comunicación, controles de unidades generadoras y control general del complejo. Para este proceso EPM contrató a diferentes empresas fabricantes dentro de ellas la empresa Asea Brown Boveri (ABB) de Canadá.

Hasta el momento solo están modernizadas 2 de las 11 máquinas que conforman el complejo hidroeléctrico de Guadalupe. Estas máquinas están ubicadas en las centrales de Troneras , Guadalupe III y Guadalupe IV. De estas dos máquinas solo se cuenta con el instructivo y funcionamiento de los equipos y el generador de Guadalupe III. Como la máquina 1 de Guadalupe IV fue la última de las dos en entrar en modernización, aun se carece de instructivos para los operadores sobre el manejo de la máquina, los sistemas de comunicación instalados y demás instrumentos de medida instalados en la

modernización. La operación de esta máquina se hace bajo el mando de unos pocos operadores que estuvieron en algunos entrenamientos hechos por los ingenieros que instalaron el sistema. Por medio de este trabajo se pretende tener un conocimiento más integral del sistema de control y operación de las nuevas unidades modernizadas.

Con la modernización de las unidades es necesario documentar el nuevo sistema de control debido a que esta tarea se realiza tradicionalmente en forma oral y con base en el conocimiento empírico.

Por medio de este TDG se busca que la central se adapte a normas internacionales en cuanto a la descripción de sus sistemas automáticos, concretamente con la aplicación de la norma GRAFCET. Con la norma se facilitará la detección de fallas en los distintos modos de accionamiento de las máquinas modernizadas y se visualizará de forma más global todas las secuencias que deben cumplirse en la máquinas para un correcto funcionamiento. Lo anterior permitirá detectar de forma más rápida posibles fallas que en la unidad se estén presentando, dándole así al ingeniero otra herramienta que le ayudará a solucionar el problema de forma rápida y eficaz.

La norma GRAFCET está avalada internacionalmente por L'AFCEC (*Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique*) en Alemania, Australia, Bélgica, Canadá,, Dinamarca, Egipto, España, Finlandia, Francia, Italia, Japón, Noruega, Países Bajos,, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Checoslovaquia, Turquía, Yugoslavia desde 1987.

La adopción de esta norma de carácter internacional, significará para la planta de Guadalupe IV, acogerse a lo expuesto por las normas ISO las cuales exigen que la descripción de un sistema de control debe hacerse bajo normas estandarizadas.

Como uno de los grandes objetivos de este TDG es presentar los diagramas GRAFCET de control y funcionamiento de las máquinas, se hicieron varias pruebas en la central de Guadalupe IV para así tener unos resultados correctos y fiables.

Para dichas pruebas se contó con la constante asesoría de los ingenieros, tecnólogos y operarios de la central hidroeléctrica de Guadalupe IV. El objetivo de las pruebas era evidenciar como es el comportamiento del sistema de control de las máquinas frente a eventualidades. Por lo tanto el diagrama GRAFCET se toma como un resultado final de las pruebas verificadas experimentalmente y las consultas hechas en la central hidroeléctrica de Guadalupe IV.

Con este TDG se pretende que después de su lectura se tenga una percepción global sobre el control de las máquinas modernizadas y una comprensión general de las posibles fallas que pueden ocurrir en el sistema, así mismo como la descripción funcional de cada paso seguido en las diferentes secuencias en las máquinas.

Otra utilidad del trabajo es que servirá como documentación descriptiva del sistema de control de las unidades para el entrenamiento de las personas que ingresen a trabajar en la central. Hasta el momento el proceso de entrenamiento se realiza en forma lenta y tediosa, perdiendo así tiempo y dinero en la empresa.

En el siguiente capítulo podrá verse las generalidades más importantes de la cadena hidráulica Guatrón (Troneras, Guadalupe III y Guadalupe IV) y el estado tecnológico en el que se encuentra, específicamente la central hidroeléctrica de Guadalupe IV.

## **2. GENERALIDADES DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO**

### **GUATRÓN.**

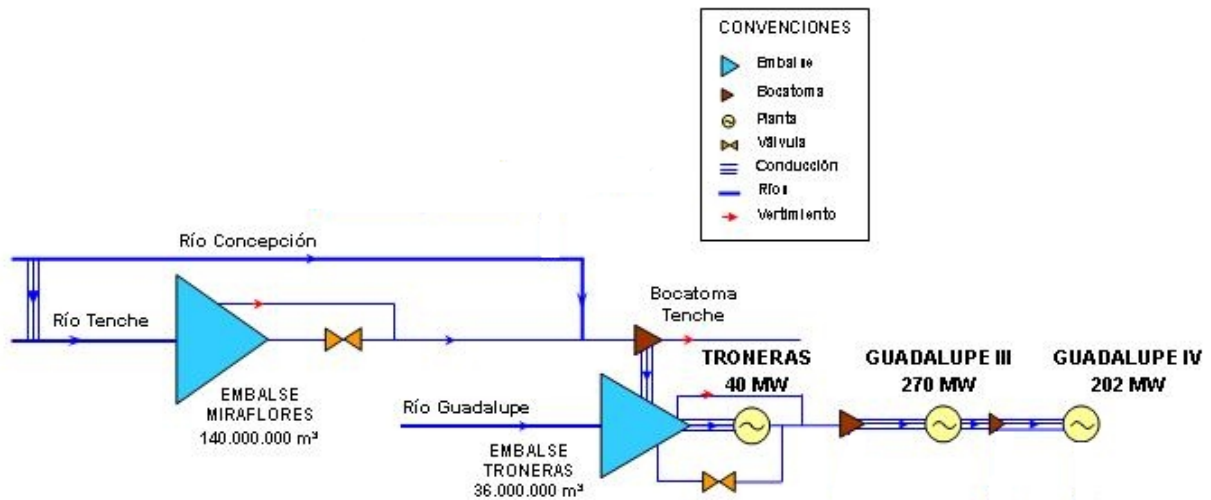
*En éste capítulo se hará una descripción general de la cadena hidráulica Guatrón, la cual involucra las centrales hidroeléctricas de Troneras, Guadalupe III y Guadalupe IV. Esta descripción es importante para comprender en capítulos posteriores el funcionamiento del control de la cadena hidráulica.*

*Además, en este capítulo se hace una descripción general de la central hidroeléctrica de Guadalupe IV que es donde se centrará nuestro estudio. Al final del capítulo se hará un paralelo entre el sistema de control antiguo y el moderno con el fin de mostrar la evolución tecnológica que justificó la modernización de la planta.*

*El capítulo finaliza con una explicación rápida y sencilla de cómo operar la máquina por medio del programa Digivis, esto con el fin de utilizar en capítulos posteriores datos como los plasmados en las pantallas que son vitales para entender el funcionamiento de la operación y control de la central de Guadalupe IV.*

#### **2.1. CONFIGURACIÓN DE LA CADENA HIDRÁULICA**

La cadena hidráulica de Guatrón comprende las centrales hidroeléctricas de Troneras, Guadalupe III y Guadalupe IV. Esta cadena hidroeléctrica comparte el agua del embalse de Troneras y del embalse de Miraflores. La figura 1 muestra la configuración.



**Figura 1.** Mapa de la distribución de la cadena hidráulica de Guatrón.

El río Tenche alimenta el embalse de Miraflores que almacena 140 millones de m<sup>3</sup> como reserva adicional para las épocas de verano, estas aguas junto con las del río Concepción que a su vez tiene los aportes de los ríos Nechí, Pajarito y Dolores se vierten a la represa de Troneras.

La presa del embalse Troneras está constituida por un terraplén de materiales compactados y protegida aguas arriba por enrocado con capa filtrante y aguas abajo por un engramado que recolecta las aguas superficiales a través de un túnel o gradería.

La torre de captación está sumergida y unida al túnel de regulación (416 m) por medio de un pozo vertical de 25.5 m de profundidad. Al finalizar el túnel Dolores-Concepción el agua continúa por un canal corto y desemboca al río Concepción para juntarse con las aguas provenientes del embalse de Miraflores en la bocatoma de Tenche, de donde parte el túnel hasta el embalse de Troneras, conduciendo estos aportes.

El embalse de Troneras Almacena las aguas provenientes de: El río Guadalupe, las desviaciones de los ríos antes mencionados y la descarga de la represa de Miraflores que se hace por medio de una válvula de cono.

La presa de Troneras es similar a la de Miraflores, la torre es superficial y está unida a un túnel de regulación de 424 m que desvía el caudal del embalse Troneras para alimentar las turbinas de la central Hidroeléctrica del mismo nombre.

Cuando el agua llega a la central de Troneras se toma a través de la torre de captación del embalse y se conduce a la casa de máquinas por medio de un túnel de regulación para mover dos turbinas Francis y generar 40.000 kW.

Las aguas turbinadas en la planta de Troneras, las desviadas de la central por medio de una válvula de cono y las provenientes de la quebrada Cañasgordas son represadas en una bocatoma y conducidas a la casa de máquinas de la Central de Guadalupe III, para mover 6 turbinas Pelton las cuales transforman 270.000 kW.

Las aguas turbinadas en Guadalupe III son depositadas en un tanque con capacidad de 22.000 m<sup>3</sup> y sirve de captación para esta Central.

Estas aguas son conducidas a través de un túnel de 6.4 kilómetros a la casa de máquinas de Guadalupe IV, donde movilizan tres turbinas tipo Francis, para generar 202.000 kW efectivos. La aguas finalmente caen al cauce del río Guadalupe y desembocan al río Porce en el sitio denominado Puente Acacias.



## **2.2 GENERALIDADES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GUADALUPE IV**

La central hidroeléctrica de Guadalupe IV está en operación desde 1985. El agua que abastece las turbinas de los 3 generadores instalados en ella proviene del río Concepción el cual es abastecido por los ríos: Nechí, Pajarito y Dolores.

Esta instalación generadora tiene una capacidad nominal de 216 MW y capacidad efectiva de 201 MW, repartida en tres unidades iguales de 67 MW cada una, movidas por turbinas tipo FRANCIS de eje vertical. Sus aportes de energía al sistema contabilizan 1,205 GWh al año, si se habla de energía media y 1,026 GWh al año, si es de energía firme. Su entrada en operación comercial se produjo durante el año 1985, paralelo a ello salían de funcionamiento las centrales hidroeléctricas de Guadalupe I y Guadalupe II.

La central cuenta con dos bancos de transformadores configurados así: las máquinas 1 y 2 comparten el primero y la máquina 3 tiene su banco propio. Esto porque en un principio se pensaba tener 4 máquinas en la central y se tenía planeado que esta cuarta máquina compartiera el banco con la máquina 3.

Las máquinas sincrónicas generadoras, tienen las siguientes características nominales:

Potencia aparente:  $S = 77400 \text{ KVA}$

Voltaje fase – fase:  $V = 13800 \text{ V}$

Corriente fase:  $I = 3238 \text{ A}$

Número de fases: 3

Factor de potencia: 0.9

Frecuencia: 60 Hz

Velocidad: 514 RPM

Número de polos: 14

Voltaje de excitación: 165 VDC

Aumento de temperatura: 89010 KVA → 80 °C

77400 KVA → 60 °C

Cada máquina cuenta con su sistema de comunicación independiente al centro de control y la comunicación de cada instrumento se maneja por medio de RIO's (Remote Input Output) o Linkings Devices, dependiendo de la naturaleza del instrumento.

En los siguientes cuadros se hará una recopilación de los datos técnicos más relevantes de la central.

**Cuadro 1.** Generalidades hidráulicas de la central hidroeléctrica Guadalupe IV

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Cabeza máxima	1120.50	msnm
Cabeza normal	1119.80	msnm
Cabeza mínima	1116.00	msnm
Salto bruto máximo	418.50	m
Salto bruto típico	554.90	m
Cabeza	399.00	m
Altura eje de turbina	698.00	msnm
Rango de operación	4.5	m
Caudal de diseño	58.00	m <sup>3</sup> /s
Caudal actual total	63.45	m <sup>3</sup> /s
Caudal nominal unidad	21.15	m <sup>3</sup> /s
Nivel del tanque de compensación máximo	703.00	msnm
Nivel del tanque de compensación mínimo	702.00	msnm
Perdidas típicas de cabeza	43.82	m

**Cuadro 2.** Especificaciones mecánicas de las turbinas en las máquinas de Guadalupe IV

<b>Fabricante</b>	Charmiles
<b>Tipo</b>	Francis
<b>Eficiencia</b>	91.50%
<b>Velocidad</b>	514.3 rpm
<b>Zona de operación</b>	< 35 MW
<b>Numero de álabes</b>	24

**Cuadro 3.** Especificaciones eléctricas de las máquinas de la hidroeléctrica de Guadalupe IV

<b>Variable</b>	<b>Planta</b>	<b>Unidades</b>
Potencia activa máxima Planta	215	MW
Potencia reactiva máxima planta	156	Mvar
Potencia reactiva mínima planta	-120.0	Mvar
Máxima velocidad de aumento de carga	216	MW/min
Potencia aparente máxima Unidad	77.4	MVA
Potencia activa máxima Unidad	72.0	MW
Potencia reactiva máxima Unidad	52.0	Mvar
Potencia reactiva mínima Unidad	-40.0	Mvar
Mejor eficiencia Generador	98	%
Mejor eficiencia planta	99	%
Factor de potencia	0.9	p.u
Fabricante	Mitsubishi	
Frecuencia	60	Hz
Velocidad	514.3	rpm
Fases	3	
Voltaje	13.8	kV

## **2.3 MODERNIZACIÓN DE LA PLANTA DE GUADALUPE 4**

### **2.3.1 Sistema De Control Antiguo**

La estación de operación es la encargada de gobernar el control de las máquinas. Aunque el área Guadalupe dispone de su propio sistema de control, denominado sistema de control de Guadalupe (GCS – Guadalupe Control System), el cual trabaja subordinado al Centro Regional de Despacho.

El GCS trabaja bajo el control del Sistema de Manejo de Energía (EMS – Energy Management System) pero en caso de falla del sistema de comunicación entre el EMS y GCS, éste último puede trabajar de manera independiente hasta el restablecimiento de las comunicaciones. Dicha operación también puede ser a voluntad, es decir, previa coordinación entre el EMS y el GCS.

La subestación el Salto también tiene inferencia sobre el control de las máquinas. Esto para actuar como respaldo si ocurre alguna eventualidad que impida maniobrar las máquinas desde los centros de control arriba explicados. (Ver figura 2)

Cabe anotar que el control de la máquina se hace por medio de un sistema de mando que incluye el equipo de mando y el sistema mandado. Cada uno con retroalimentación de información que permite hacer una operación más segura de las máquinas en cuanto a la confiabilidad de las mismas.

Los instrumentos están comunicados con las máquinas por medio de lógica cableada con relés. Los instrumentos que están cableados de esta forma son:

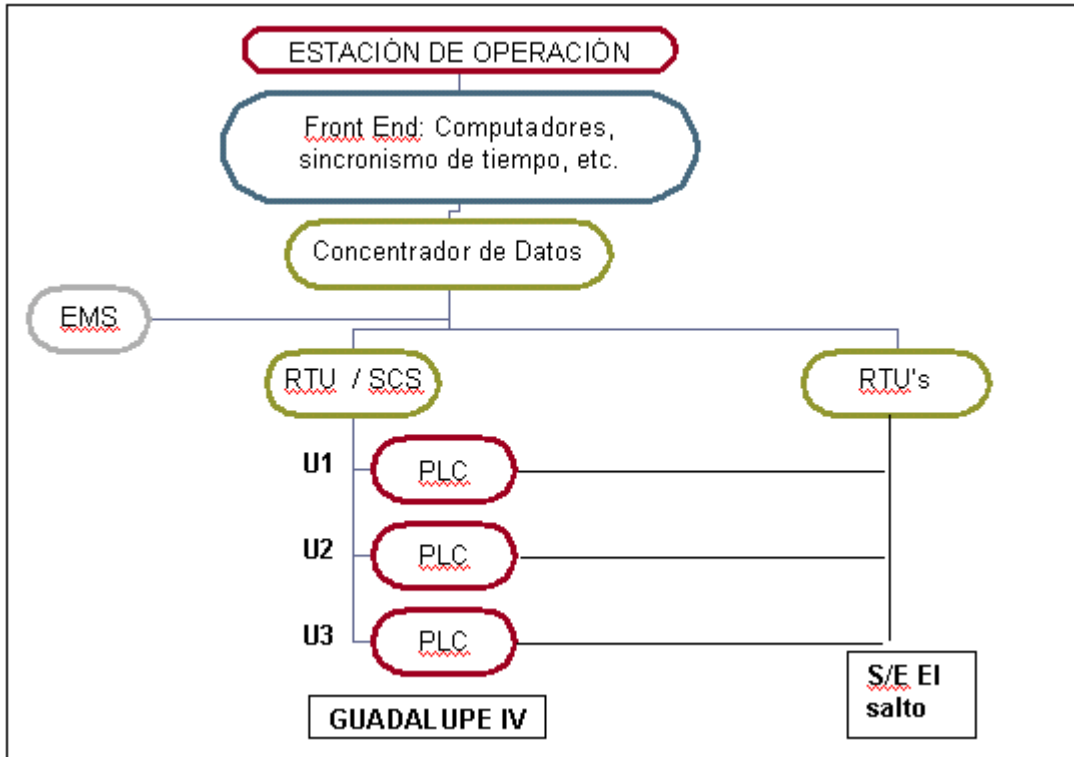
- Regulador de voltaje
- Protecciones
- Regulador de velocidad
- Instrumentos, Indicadores de flujo e interruptores límites.

La modernización de la planta se justifica porque los aparatos de instrumentación y medida presentan problemas operativos o no son aptos para las condiciones de trabajo.

Además los reguladores de velocidad (Charmilles) tienen 14 años de operación con una tecnología que no permite obtener información vital para la operación, problemas operativos y pocos repuestos en el mercado.

Se justifica la necesidad de modernizar el sistema de control, que actualmente tiene un PLC electrónico para cada máquina, con 14 años de servicio. Estos PLC presentan

obsolescencia tecnológica, problemas operativos, pocos repuestos en el mercado y suministro discontinuado de estos. En la Figura 2 se resume lo explicado.



**Figura 2.** Sistema de Control antiguo

Dentro de las modificaciones que se están haciendo al control de la planta, está el cambio del sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) el cual comprende: Estaciones de operación, Front End, Equipos concentradores de datos y EMS.

Actualmente el sistema SCADA tiene 12 años de servicio; desde él se supervisan y envían órdenes para las plantas y subestaciones del complejo. Este sistema está subordinado al CRD (Centro Regional de Despacho). El sistema SCADA presenta serios inconvenientes como obsolescencia tecnológica, pocos repuestos y suministro discontinuado de estos.

### 2.3.2 Sistema De Control Nuevo

El control y supervisión de la cadena esta localizado en la Planta Guadalupe IV. Normalmente el control y la optimización de la cadena hidráulica se realiza desde CCCG. Adicionalmente desde allí se puede ejecutar 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 5 niveles de control jerarquizados. Los equipos de protección y emergencia están siempre presentes en todos los niveles de control.

Todos los dispositivos poseen modo de selección para el tipo de control (Local o remoto). Cuando se encuentra seleccionado en local el control remoto se bloquea por la lógica programada en el respectivo controlador. En cuadro 4 se muestran las principales acciones de control sobre las unidades y los sitios donde se pueden ejecutar.

**Cuadro 4.** Acciones de control y sitios donde se pueden ejecutar

<b>CONTROL</b>	<b>Sala de operación G4</b>	<b>CCCG</b>	<b>CCG</b>	<b>CND</b>
Automático / Paso a paso	X	X		
Ejecución de secuencias en modo paso a paso	X	X		
Ejecución de secuencias en modo automático	X	X		
Arranque de unidad	X	X		
Paro normal de unidad	X	X		
Paro parcial de unidad	X	X		
Paro rápido de unidad	X	X		
Paro emergencia de unidad	X	X		
Control individual o conjunto	X	X		
Consigna ICAP	X	X		
Consigna JCAP	X	X		
Consigna ICRP	X	X		
Consigna JCRP	X	X		
Consigna JVC	X	X		
Consigna HCC		X	X	X

La nomenclatura del cuadro 4 es como sigue:

**ICAP:** Control Individual de Potencia Activa. En este modo el controlador proporcionara la consigna potencia activa (MW) al regulador de la turbina.

**ICRP:** Control Individual de Potencia Reactiva. En este modo el controlador proporcionara la Consigna potencia reactiva (MVAR) al regulador de tensión.

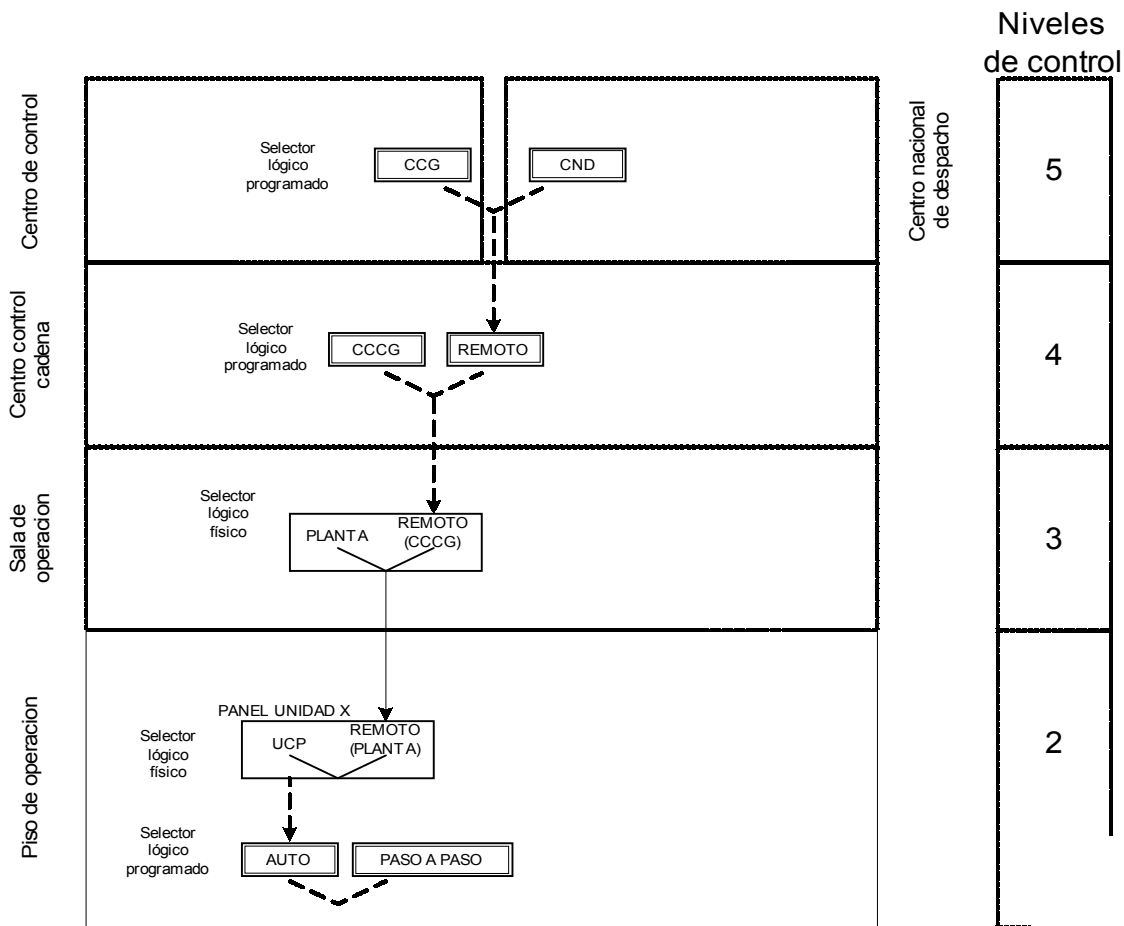
**JCAP:** Control Conjunto de Potencia Activa. El controlador de la planta asignara las consignas potencia activa al controlador de las máquinas optimizando el reparto y satisfaciendo la potencia asignada a la planta

**JCRP:** Control Conjunto de Potencia Reactiva. El controlador de la planta asignara las consignas potencia reactiva al controlador de las maquinas optimizando el reparto y satisfaciendo la potencia reactiva asignada a la planta

**JVC:** Control Conjunto de Voltaje. El controlador de la planta asignara las consignas reactiva activa al controlador de las maquinas optimizando el reparto y satisfaciendo la consigna voltaje en barras S/E Salto I.

**HCC:** Control de Cadena Hidráulica. El controlador de la planta asignara las consignas potencia activa al controlador de las maquinas optimizando el reparto y satisfaciendo la potencia activa asignada a la planta con base en la potencia activa que le sea asignada desde el controlador de la cadena hidráulica.

La Figura 3 ilustra e indica de una mejor manera los sitios de acceso para las diferentes jerarquías de control.



**Figura 3.** Accesos a las jerarquías del control

Primer nivel de control.

El primer nivel de control es realizado de manera local en los dispositivos primarios como válvulas, motores, interruptores, etc. Este tipo de control solo se utilizará durante el mantenimiento y en emergencia. Estos dispositivos se manejan por dispositivos del segundo nivel de control dependiendo de un selector de modo de operación local o remota. El dispositivo que no se encuentre en modo de operación remota tendrá su respectivo bloqueo lógico en el controlador asociado.



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 I/O 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
- Sistema antiincendio de generadores y planta.

#### Segundo nivel de control.

El segundo nivel de control se ejecuta sobre dispositivos primarios automatizados en grupos como el regulador de turbina, regulador de tensión, relés de protección, etc. El arranque o paro de estos grupos puede ser iniciado desde las consolas de operación en el centro de operación de la planta o desde las secuencias programadas en los controladores dependiendo de los selectores de modo de control de los dispositivos primarios no automatizados.

Los dispositivos de segundo nivel de control son:

- Computador de unidad de generación
- Regulador de voltaje y sistema de excitación
- Regulador de velocidad

- Computador de servicios generales y auxiliares de la planta.
- Sistemas de protección y medida
- Computador de control de generación de la planta

#### Tercer nivel de control.

El tercer nivel de control se ejecuta desde la sala de operación de la centra Guadalupe IV y compete la operación de toda la planta. Este nivel de control depende de los selectores de modo de control de las unidades generadoras, los equipos asociados de servicios auxiliares, filtros y compuertas.

#### Cuarto nivel de control.

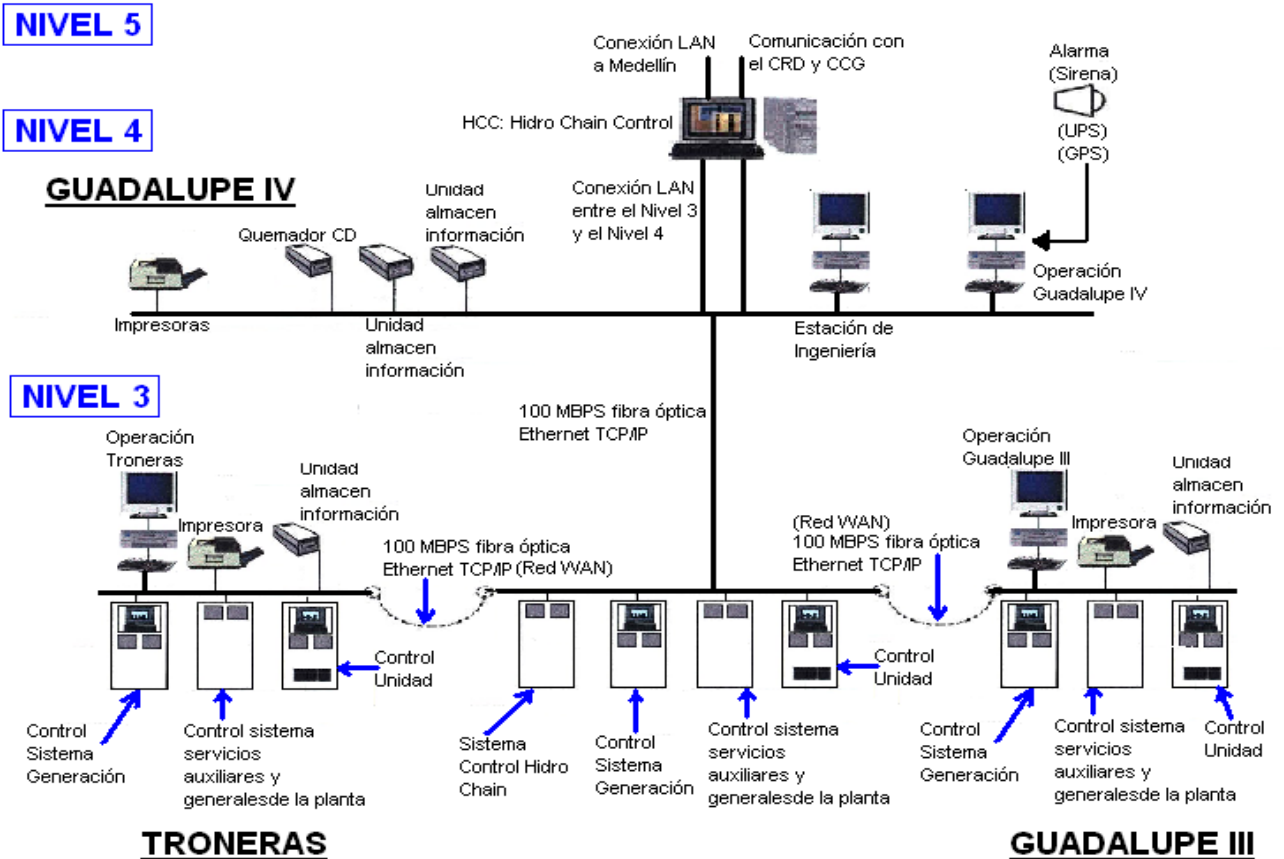
El cuarto nivel de control se ejecuta desde la sala de operación de CCCG ubicada contigua a la sala de operación de unidades y realiza el control de toda la cadena hidráulica de Guadalupe. En este nivel el control es distribuido entre los controladores de las plantas en forma de consignas y comandos para lograr los objetivo deseados por el operador de CCCG. Este nivel de control depende del selector de modo de control de la planta.

#### Quinto nivel de control.

El quinto nivel de control es el control remoto de la cadena hidráulica de Guadalupe desde el CCG vía ICCP o el CND vía interfase IEC-870-5-101. Este se utilizará para implementar estrategias de control como AGC, predicción de demanda y programación de carga entre otros.

Este nivel de control depende del selector de modo de control de la cadena hidráulica.

Para nuestro caso nos interesa el control de la central de Guadalupe IV, el cual se muestra en la figura 4.



**TRONERAS** **GUADALUPE III**  
**Figura 4.** Esquema de control a instalar en la cadena hidroeléctrica

La Figura 4 no revela el número exacto de equipos por central pues no es relevante ese dato para la descripción del sistema de control.

Para el control de la central de Guadalupe IV se reemplazarán los PLC's antiguos y se instalará una LAN con computador de planta.

El control de las demás plantas se hará en lo posible a partir del Hidro Chain Control el cual cuenta con las siguientes características:

- Red Ethernet con protocolo TCP/IP

- Tendrá acceso remoto para operación y consultar.
- Trabaja bajo plataforma Windows.
- Podrá gestionar y supervisar el complejo hidroeléctrico a partir de curvas de tendencia, registro de eventos y alarmas, y control conjunto.
- Estará sincronizado por medio de un GPS para sincronismo de tiempo.
- Podrá tener supervisión y comandos sobre las otras plantas.

### **2.3.2.1 Operación De Las Máquinas A Partir Del Programa Digivis**

#### **- Arranque De La Máquina**

Para arrancar una máquina a partir del programa Digivis se debe primero seleccionar el modo de operación en los diferentes conmutadores de la máquina. Estos están ubicados en diferentes sitios de la planta y proporcionan las señales necesarias para que el controlador del proceso determine su modo de operación. El controlador de la unidad solo dará manejo desde el Digivis cuando los conmutadores estén en remoto y/o automático.

Para comenzar la secuencia de arranque se debe entrar desde la plataforma del digivis a la pantalla de "Secuencias". Ver figura 5.



**Figura 5.** Pantalla de operación de la máquina en el Digivis

Allí se deben verificar el cumplimiento de las condiciones de arranque. Éstas se encuentran dándole clic en el botón **E** ubicado en la sección de color azul titulada “Arranque”.

Estas condiciones de arranque desde parada son :

- ✓ No secuencia de paro
- ✓ Voltajes control disponibles
- ✓ Voltajes servicios auxiliares normal
- ✓ Selectores posición normal
- ✓ Junta inflable mantenimiento desapplicada
- ✓ Turbina lista
- ✓ Nivel de aceite cojinete superior normal
- ✓ Nivel de aceite cojinete inferior normal

- ✓ Relés de disparo en forma reseteada
- ✓ Sistema de frenos listos
- ✓ Presión sistema de aceite turbina listo
- ✓ Regulador de velocidad listo
- ✓ Válvula esférica lista
- ✓ Regulador de voltaje listo
- ✓ Refrigeración lista
- ✓ Válvula mariposa no abierta
- ✓ Sistema de inundación drenaje listo
- ✓ No falla compresor general
- ✓ Nivel de tanque normal
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado
- ✓ Interruptor unidad listo
- ✓ No falla potencial en reguladores

Las condiciones desde girando (Rotor girando) son:

- ✓ No secuencia de paro activa
- ✓ Voltajes control disponibles
- ✓ Voltajes servicios auxiliares normales
- ✓ Selectores posición normal
- ✓ Relés disparo reseteados
- ✓ Sistema frenos listos
- ✓ Regulador voltaje listo
- ✓ No falla compresor general
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado

- ✓ Interruptor listo
- ✓ No falla potencial reguladores

Las condiciones desde energizada (Rotor girando, campo cerrado) son:

- ✓ No existan secuencia de paro activas
- ✓ Voltajes de control disponibles
- ✓ Voltajes de servicios auxiliares disponibles
- ✓ Selectores en posición normal
- ✓ Relés de disparo reseteados
- ✓ Frenos listos
- ✓ No falla compresor general
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado
- ✓ Interruptor máquina listo
- ✓ No falla potencial reguladores

Las condiciones para sincronizar son:

- ✓ Sincronizador listo
- ✓ Seccionador generador

El cumplimiento de estos prerequisites debe vigilarse estrictamente de acuerdo a la etapa a la que se quiera llevar la máquina: girando, energizada o sincronizada en la red.

Una vez ya estén dadas estas condiciones (Los recuadros aparecen de color verde) se procede, en la pantalla de “Secuencias”, a dar clic sobre el botón **AUTO** o **PASO** en

el área azul titulada “Arranque” según se quiera arrancar la máquina automáticamente o llevándola manualmente paso a paso, ver cuadro 5.

**Cuadro 5.** Etapas configuradas en la pantalla del Digivis que deben cumplirse para llevar la máquina desde “Parada” hasta “Sincronizada”

NÚMERO ETAPA PANTALLA DIGIVIS	MUESTRA LA PANTALLA DEL DIGIVIS
0	Prerrequisitos listos
1	Bomba de refrigeración en operación, Válvula de aislamiento abierta, Válvula de alivio cerrada.
2	Frenos aplicados, Válvula esférica abierta.
3	Frenos desaplicados, Lubricación forzada ON.
4	Regulador desbloqueado, Regulador energizado, Velocidad > 90%
	EN MARCHA
5	Interruptor de campo cerrado, Lubricación forzada OFF, Voltaje generador > 63%
	ENERGIZADA.
6	Interruptor de generador cerrado.
	SINCRONIZADA.
7	Límite apertura 100%, Potencia activa >35 MW
	POTENCIA ACTIVA MIN.

#### - Parar La Máquina

La máquina se puede parar normalmente siempre y cuando no estén activas ninguna de las secuencias de paro: Parcial, rápido o de emergencia. Estas secuencias de paro se hacen automáticamente cuando ocurre alguna falla en la unidad.

Para hacer un paro normal de la máquina se debe dar clic en el botón **AUTO** o **PASO** según se quiera hacer este procedimiento automáticamente una vez dada la orden o paso a paso respectivamente.

Luego debe darse clic en el botón **PARAR**. Después, en la ventana desplegada se debe reconfirmar el proceso de paro normal. Una vez hecho esto, el proceso de paro



automático o paso a paso (según se haya seleccionado) es igual al proceso seguido para arrancar la máquina en cada caso respectivamente.

A continuación se hará una tabla informativa de la numeración de las etapas que aparecen en la pantalla del Digivis para los distintos paros. En capítulos posteriores se hará referencia a estas etapas específicamente.

**Cuadro 6.** Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro normal

<b>PARO NORMAL</b>	
<b>NÚMERO ETAPA PANTALLA DIGIVIS</b>	<b>MUESTRA LA PANTALLA DEL DIGIVIS</b>
1	Potencia activa < 5%, Potencia reactiva < 5%
2	Interruptor generador abierto
	ENERGIZADA
3	Interruptor de campo abierto
	EN MARCHA
4	Regulador bloqueado, Regulador desenergizado, Limitador de apertura dist 0%, Velocidad < 90%
5	Lubricación forzada ON, Válvula esférica cerrada, Posición distribuidor 0%, Velocidad < 10%.
6	Frenos aplicados, Velocidad < 1%.
7	Lubricación forzada OFF, Frenos desaplicados.
8	Válvula de aislamiento cerrada, Bomba de refrigeración OFF.
	PARADA

**Cuadro 7.** Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro parcial.

<b>PARO PARCIAL</b>	
<b>NÚMERO ETAPA PANTALLA DIGIVIS</b>	<b>MUESTRA LA PANTALLA DEL DIGIVIS</b>
1	Potencia activa < 5%, Potencia reactiva < 5 %.
2	Apertura interruptor de generador.
	ENERGIZADA

**Cuadro 8.** Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro rápido.

<b>PARO RÁPIDO</b>	
<b>NÚMERO ETAPA PANTALLA DIGIVIS</b>	<b>MUESTRA LA PANTALLA DEL DIGIVIS</b>
1	Secuencia de paro rápido activa, Potencia activa < 3MW
2	Interruptor de generador abierto.
3	Interruptor de campo abierto.
4	Velocidad < 90%, Limitador de apertura dist. 0%, Regulador bloqueado, Regulador desenergizado.
5	Lubricación forzada ON, Válvula esférica cerrada, Posición distribuidor 0%.
6	Velocidad < 10%.
7	Frenos aplicados.
8	Velocidad < 1%
9	Lubricación forzada OFF, frenos desaplicados.
10	Válvula de aislamiento cerrada, Bomba de refrigeración OFF.
	PARADA

**Cuadro 9.** Etapas configuradas en la pantalla del Digivis para la ejecución del paro de emergencia.

<b>PARO DE EMERGENCIA</b>	
<b>NÚMERO ETAPA PANTALLA DIGIVIS</b>	<b>MUESTRA LA PANTALLA DEL DIGIVIS</b>
1	Interruptor de campo abierto.
2	Interruptor de generador abierto
3	Regulador bloqueado.
4	Regulador desenergizado
5	Velocidad < 90%, Limitador 0%
6	Lubricación forzada ON, válvula esférica cerrada, posición distribuidor 0%
7	Velocidad < 10%
8	Frenos aplicados.
9	Velocidad < 1%
10	Frenos desaplicados, lubricación forzada OFF.
11	Bomba de refrigeración OFF, válvula de aislamiento cerrada.
	PARADA

**NOTA:** Las etapas 1, 2, 3 se realizan en el digivis simultáneamente. La etapa 5 se ejecuta una vez se haya terminado de ejecutar las etapas 1, 2 y 4.

En este capítulo se explicaron las características generales de la cadena hidráulica de Guatrón y la planta de Guadalupe IV haciendo el respectivo paralelo entre el sistema de control viejo y el nuevo. Adicionalmente se ilustró la operación de la máquina con el programa Digivis. En el siguiente capítulo se hará un análisis general del control de las máquinas a partir del nuevo sistema modernizado.

### **3 ACCIONES DEL CONTROL EN LAS MÁQUINAS GENERADORAS DE GUADALUPE IV.**

*En éste capítulo se resume por medio de tablas explicativas el control de las unidades de generación de Guadalupe IV. El objetivo del capítulo es facilitar la comprensión de los pasos que sigue el control de las unidades generadoras.*

*Los cuadros que en este capítulo se incluyen son planes de mando de la máquina para diferentes acciones, ya sea de arranque o paro. También se incluye un cuadro que describe el tipo de paro según el tipo de falla y muestra la etapa que se esté siguiendo en el Digivis.*

*Cuando se hable de etapas se está haciendo referencia a las marcadas por la plataforma Digivis. Esto con el fin de facilitarle al operador la búsqueda de posibles fallas con solo mirar la pantalla.*

#### **3.1 PLAN DE MANDO SOBRE ETAPAS EN LAS MÁQUINAS**

Estas tablas indicarán cada etapa que sigue la máquina en el arranque y paro, indicando los comandos que se activan en cada etapa y las acciones que se realizan en la máquina en caso de incumplimiento de alguna condición.

**Explicación de la notación que se usará en la tabla.**

**ETAPA:** En esta columna se numerará la etapa que se esté llevando a cabo. Se define como etapa a aquella situación en la cual el comportamiento de todo o parte de un sistema con relación a sus entradas y salidas es invariante (constante), ellas caracterizan un estado específico del sistema automático y el comportamiento del controlador lógico. Aquí para utilidad en cuanto a la operación de la máquina, se relacionará cada etapa con las enunciadas por el Digivis, las cuales se referenciaron en los subcapítulos 2.3.2.1.1 y 2.3.2.1.2

**CONDICIONES REQUERIDAS:** Aquí se enlistarán las condiciones necesarias para que se llegue a la etapa actual.

**MTE 1:** Máximo tiempo de espera (Minutos) para que la transición (posibilidades de evolución del Grafcet) verifique los prerequisites para la etapa actual.

**ACCIÓN ALTERNATIVA 1:** Aquí se anotará la acción que realizará el sistema en caso de no cumplirse los prerequisites para la llegar a la actual etapa.

**COMANDO:** Aquí se explica lo que se realiza en la etapa.

**RESULTADO COMANDO:** Una vez finalice la etapa, se espera que se hayan producido los efectos sobre el sistema que aquí se enlistan.

**MTE 2:** Máximo tiempo de espera (Minutos) para el cumplimiento de la etapa actual que se está tratando.

**ACCIÓN ALTERNATIVA 2:** En caso de no cumplirse las acciones referentes a la etapa, se realizará la operación que aquí se menciona.

Para la realización de las tablas se cuenta con las siguientes nomenclaturas:

PE = Paro de emergencia

P = Parar

S = Envía señal al controlador.

R (#) = Regreso a la etapa #

**Cuadro 10.** Plan de mando sobre la máquina durante el arranque

<b>ARRANQUE</b>						
<b>ETAPA</b>	<b>CONDICIONES REQUERIDAS</b>	<b>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</b>	<b>COMANDO</b>	<b>RESULTADO COMANDO</b>	<b>MTE 2</b>	<b>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</b>
0	Todas las condiciones de la lista A se han cumplido.	No comienza secuencia de arranque	Verificar de condiciones de la lista A	Continúa secuencia máquina, pasa a etapa 1	$\infty$	No pasa a la etapa 1
1	Fin etapa 0	Se queda esperando cumplimiento de lista A	Encender la refrigeración, abrir válvula de aislamiento, cerrar la válvula de alivio	Están encendidas las bombas de refrigeración y los filtros, se quita la válvula de aislamiento y se cierra la válvula de alivio.	10 Min	R(0), S
2	Fin etapa 1, estén aplicados los frenos.	Intenta aplicar los frenos o R(1) por medio de paro normal.	Abrir válvula esférica.	Comienza a entrar agua por el tubo madre por la válvula esférica. Esto se hace después de verificar que los frenos están aplicados.	10 Min.	R(0), S

<b>ARRANQUE (CONTINUACIÓN)</b>						
<b><u>ETAPA</u></b>	<b><u>CONDICIONES REQUERIDAS</u></b>	<b><u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u></b>	<b><u>COMANDO</u></b>	<b><u>RESULTADO COMANDO</u></b>	<b><u>MTE 2</u></b>	<b><u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u></b>
3	Fin etapa 2, continúan aplicados los frenos.	R(0) o aplica los frenos.	Desaplicar frenos, encender la refrigeración forzada.	Comienza a girar el rotor de la máquina y comienza a actuar la refrigeración forzada en la misma.	10 Min.	R(0), S, P.
E1	Fin Etapa 4, Velocidad > 90% nominal.	R(0) por medio de paro normal.	EN MARCHA (Etapa estable)	La máquina se encuentra girando a velocidad nominal.	∞	
5	Se seleccionó en el controlador la opción de arranque automático o se le dió la orden de continuar la secuencia de arranque. Se cumple Lista B de condiciones.	Se queda la máquina en la etapa E1.	Apagar lubricación forzada, cerrar interruptor de campo	Se cierra el interruptor de campo apareciendo voltaje en las terminales del generador y se apaga la lubricación forzada.	5 Min.	R(E1), S.
E2	Fin etapa 5, Voltaje generador > 63 % nominal	Se abre interruptor de campo y va a la etapa E1	ENERGIZADA (etapa estable)	La máquina está girando a velocidad nominal y hay voltaje nominal en bornes del estator.	∞	

<b>ARRANQUE (CONTINUACIÓN)</b>						
<u>ETAPA</u>	<u>CONDICIONES REQUERIDAS</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u>	<u>COMANDO</u>	<u>RESULTADO COMANDO</u>	<u>MTE 2</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u>
E3	Fin etapa 6, máquina sincronizada a la red.	Se abre interruptor de máquina y va a la etapa E2	SINCRONIZADA (Etapa estable)	La máquina está conectada a la red y aportándole potencia a la misma.	∞	
7	Se seleccionó en el controlador la opción de arranque automático o se le dió la orden de continuar la secuencia de arranque. Potencia activa > 0 y el limitador de apertura está abierto más del 95%. Se cumple lista D de condiciones.	Va a la etapa E3	Etapa de verificación del funcionamiento de la máquina conectada a la red.	Chequea que la potencia sea apropiada y que la sincronización haya sido exitosa.	10 Min.	R(E3), S
	Fin etapa 7.	Va a la etapa E3	POTENCIA ACTIV. MIN. (etapa estable)	La máquina se encuentra trabajando correctamente en la red.	∞	



**Cuadro 11.** Plan de mando sobre la máquina durante el paro normal

<b>PARO NORMAL</b>						
<u>ETAPA</u>	<u>CONDICIONES REQUERIDAS MTE1</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u>	<u>COMANDO</u>	<u>RESULTADO COMANDO</u>	<u>MTE 2</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u>
E0	No haya activa ninguna secuencia de paro distinta a la normal.	Se privilegiará cualquiera de las otras secuencias de paro	Verificar que pueda llevarse a cabo el paro normal	La máquina va a paro normal si y solo si no hay otra secuencia de paro activa.	0	Escoge el paro diferente al normal
1	Se haya iniciado secuencia de paro normal	No se ejecutará la secuencia de paro normal	Cerrar alabes móviles	Potencia activa < 3MW y Potencia reactiva < 3MVares	10 Min	S, PE
2	Fin etapa 1	PE	Abrir interruptor del generador	Se desacopla la máquina del sistema eléctrico nacional	1 Min	S, PE
E1	Fin etapa 2 e interruptor de máquina completamente abierto	PE	ENERGIZADA (Etapa estable)	La máquina está girando a velocidad nominal y hay voltaje nominal en bornes del estator.	∞	
3	Se seleccionó en el controlador la opción de paro normal automático o se le dio la orden de continuar la secuencia de paro normal. Está listo interruptor de campo	PE	Abrir interruptor de campo	Se desenergiza la máquina.	1 Min	S, PE
E2	Fin etapa 3	PE	EN MARCHA (Etapa estable)	La máquina se encuentra girando a velocidad nominal sin voltaje.	∞	

<b>PARO NORMAL (CONTINUACIÓN)</b>						
<b><u>ETAPA</u></b>	<b><u>CONDICIONES REQUERIDAS MTE1</u></b>	<b><u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u></b>	<b><u>COMANDO</u></b>	<b><u>RESULTADO COMANDO</u></b>	<b><u>MTE 2</u></b>	<b><u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u></b>
5	Limitador de apertura < 3% y la velocidad < 90% de la nominal	PE	Encender lubricación forzada, cerrar válvula esférica	No hay entrada de agua al caracol.	20 Min	S, PE.
6	Fin etapa 5, presión de lubricación forzada normal, posición distribuidor < 2% y velocidad < 10% de la nominal	PE, S	Aplicar frenos	Los frenos están aplicados	10 Min	S
7	Fin etapa 6, Velocidad < 1% de la nominal	PE, S	Apagar la lubricación forzada, desaplicar frenos	Frenos y lubricación forzada apagados	10 Min	S
8	Fin etapa 7	PE, S	Cerrar válvula de aislamiento, apagar la refrigeración.	Bombas de refrigeración apagadas y válvula de aislamiento cerrada.	5 Min.	S
E3	Fin etapa 8		DETENIDA (Etapa estable)	La máquina está totalmente detenida y lista para arrancarla de nuevo	∞	

**Cuadro 12.** Plan de mando sobre la máquina durante el paro parcial.

<b>PARO PARCIAL</b>						
<u>ETAPA</u>	<u>CONDICIONES REQUERIDAS</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u>	<u>COMANDO</u>	<u>RESULTADO COMANDO</u>	<u>MTE 2</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u>
E1	La máquina está sincronizada al sistema y no hay secuencia de paro rápido o de emergencia activa	Se irá al paro rápido o de emergencia según se haya activado	Enviar señal de paro rápido al controlador de unidad.	Controlador recibe señal de paro rápido	0	Seguirá sincronizada la máquina al sistema pues el controlador no recibió la orden de paro parcial
1	Se dio la orden de paro parcial	S, PE	Cerrar alabes móviles	Potencia activa < 3MW y Potencia reactiva < 3MVares	70 Seg.	S, PE
2	Fin etapa 1, Potencia activa < 3MW y Potencia reactiva < 3MVares	S, PE	Abrir interruptor generador	Se desacopla la máquina del sistema eléctrico nacional	2 Seg.	PE, el operador debe abrir manualmente el interruptor del generador.
E2	Fin etapa 2		ENERGIZADA (Etapa estable)	Sigue interruptor de campo cerrado y con tensión en el estator.	∞	

**Cuadro 13.** Plan de mando sobre la máquina durante el paro rápido.

<b>PARO RÁPIDO</b>						
<u>ETAPA</u>	<u>CONDICIONES REQUERIDAS</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</u>	<u>COMANDO</u>	<u>RESULTADO COMANDO</u>	<u>MTE 2</u>	<u>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</u>
E1	No haya activa secuencia de paro de emergencia	PE	LISTA (Estado estable)	La máquina está girando energizada y conectada a la red.	∞	
1	Está activa secuencia de paro rápido.		Cerrar alabes móviles	Potencia activa < 3MW y Potencia reactiva < 3MVares	1 Min	S, PE
2	Fin etapa 1, Potencia activa y reactiva se mantengan estables debajo de los 3MW y 3 Mvares respectivamente	S, PE	Abrir interruptor del generador.	Se desacopla la máquina del sistema eléctrico.	10 Seg	S, PE, el operador debe abrir manualmente el interruptor del generador.
3	Fin etapa 2, controlador detecta que el interruptor de máquina está abierto.	S, PE	Abrir interruptor de campo.	La máquina queda girando sin voltaje en sus terminales.	10 Seg	S, PE, El operador debe abrir manualmente el interruptor de campo.
4	Fin etapa 3, controlador detecta que el interruptor de campo está abierto.	S, PE	Apagar regulador, Poner limitador de apertura en 0%.	Se bloquea el regulador de velocidad y no hay entrada de agua a la turbina.	5 Min	S, PE
5	Fin etapa 4, Velocidad < 90% de la nominal	PE	Encender lubricación forzada, cerrar la válvula esférica.	La válvula esférica se cierra y entra lubricación forzada por el cojinete superior.	20 Min	S, PE, el operador debe cerrar manualmente la válvula esférica y encender la lubricación forzada.
6	Fin etapa 5, distribuidor cerrado por completo.	PE	Etapa de verificación	Se verifica que la velocidad sea < 10% de la nominal.	20 Min.	PE

<b>PARO RÁPIDO (CONTINUACIÓN)</b>						
<b>ETAPA</b>	<b>CONDICIONES REQUERIDAS</b>	<b>ACCIÓN ALTERNATIVA 1</b>	<b>COMANDO</b>	<b>RESULTADO COMANDO</b>	<b>MTE 2</b>	<b>ACCIÓN ALTERNATIVA 2</b>
8	Fin etapa 7.	S, PE	Etapa de verificación.	Se verifica que la velocidad sea < 1% de la nominal.	10 Min	PE
9	Fin etapa 8 y velocidad < 1% de la nominal.	PE	Apagar lubricación forzada, desaplicar frenos.	Lubricación forzada apagada y frenos liberados.	10 Min.	S
10	Fin etapa 9	S, PE	Cerrar válvula de aislamiento, apagar refrigeración.	Válvula de aislamiento cerrada y refrigeración desactivada.	5 Min	S
E2	Fin etapa 10.		PARADA (Etapa estable)		∞	

**Cuadro 14.** Plan de mando sobre la máquina durante el paro de emergencia.

<b>PARO DE EMERGENCIA</b>				
<b>ETAPA</b>	<b>CONDICIONES REQUERIDAS</b>	<b>COMANDO</b>	<b>RESULTADO COMANDO</b>	<b>MTE 2</b>
E1	Se dio automáticamente o por parte del operador la orden de paro de emergencia	LISTO (Etapa estable)	La máquina está conectada a la red eléctrica nacional.	∞
1	Se activó satisfactoriamente la secuencia de paro de emergencia	Abrir interruptor de campo	Interruptor de campo abierto	1 Seg
2	Se activó satisfactoriamente la secuencia de paro de emergencia	Abrir interruptor de máquina	Máquina desacoplada del sistema eléctrico nacional	1 Seg
3	Se activó satisfactoriamente la secuencia de paro de emergencia	Apagar y bloquear regulador de velocidad	Regulador de velocidad bloqueado y apagado	5 Seg
4	Fin etapa 3	<i>Etapa que siempre se cumple</i>		
5	Fin etapas 1, 2 y 4	Se cierra limitador de apertura.	No hay entrada de agua a la turbina	5 Min
6	Fin etapa 5, Velocidad no mayor al 90% de la nominal	Encender lubricación forzada, cerrar válvula esférica.	Válvula esférica cerrada y lubricación forzada aplicada.	10 Min

<b>PARO DE EMERGENCIA (CONTINUACIÓN)</b>				
<b>ETAPA</b>	<b>CONDICIONES REQUERIDAS</b>	<b>COMANDO</b>	<b>RESULTADO COMANDO</b>	<b>MTE 2</b>
8	Fin etapa 7	Aplicar frenos	Frenos aplicados	10 Min
9	Fin etapa 8	Etapas de verificación de que la velocidad sea menor al 1% de la nominal	Velocidad de la máquina menor al 1 % de la nominal	10 Min
10	Fin etapa 9	Apagar lubricación forzada y desaplicar frenos.	Frenos desapplicados y lubricación forzada apagada.	5 Min
11	Fin etapa 10	Apagar refrigeración y cerrar válvula de aislamiento	Refrigeración apagada y válvula de aislamiento cerrada	5 Min
E2		PARADA (Etapas estables)		∞

#### **NOTAS DEL PARO DE EMERGENCIA:**

- En este tipo de paro no hay acciones alternativas al incumplimiento de una etapa pues es un tipo de paro extremo donde al incumplirse alguna etapa tendrá que tomarse alguna acción extrema por parte de los ingenieros de la planta tal como hacer la operación manualmente.
- Las etapas 1, 2, 3 enunciadas en la tabla se realizan simultáneamente. La etapa 4 se ejecutará solo cuando la etapa 3 haya terminado. Una vez terminadas las etapas 1, 2 y 4 se procederá a continuar en orden consecutivo con las siguientes etapas.
- No se cuenta con prerrequisitos para la ejecución de esta secuencia por ser un tipo de paro extremo que debe ejecutarse inmediatamente.
- Si desde cualquier otra secuencia o estado se da la orden de "Paro de Emergencia" se comenzará a ejecutar la secuencia del paro de emergencia desde la etapa en que se haya producido la orden. Por ejemplo, si en alguna secuencia se da la orden de paro de emergencia estando solo la válvula esférica abierta sin

haber todavía comenzado a girar la máquina, se comenzará la secuencia de paro de emergencia a partir de la etapa 6.

- La etapa 4 siempre se cumple pues está disponible para poner de ser necesario el contrachorros en la programación.

### **3.2 TIPO DE PARO SEGÚN LA ETAPA Y LA CAUSA**

Con esta tabla se pretende tabular los distintos paros de la máquina según la etapa que se esté desarrollando en ese momento en el programa Digivis, ya sea en el arranque de la máquina o en plena generación.

Nótese en la tabla que las protecciones del paro de emergencia son activadas, en su mayoría, una vez se tiene energizada la máquina porque los problemas eléctricos generalmente pueden poner en riesgo el buen funcionamiento de la misma.

Puede también verse del cuadro 15 que es mas conveniente realizar paros rápidos cuando se presentan problemas mecánicos debido a que los paros de emergencia exigen mayores demandas al generador. Por lo tanto el paro de emergencia sólo se ejecuta en casos extremos como fallas eléctricas.

Es claro que una buena protección de la máquina ayudará a un alargamiento de su vida útil, por lo que se ha tenido en cuenta que en ninguna de las etapas de funcionamiento la máquina esté desprotegida. Si ocurre algún fallo en etapas posteriores a la del fallo, este será detectado por el controlador y se ejecutará la respectiva secuencia de paro.

**Cuadro 15.** tipos de paro según la etapa que se esté ejecutando en el digivis durante el arranque.

Tipo de paro	Etapa										
	0	1	2	3	4	E1	5	E2	6	7	
Paro Parcial								J, K	J, K	J, K	
Paro Rápido	G, H, I		C, D, E, F	C, D, E, F, H, I	C, D, E, F, G, H, I	C, D, E, F, G, H, I	C, D, E, F, G	C, G	C, G	C, G	
Paro Emergencia	B, L, O, P, Q, U	B, L, O, P, Q, U	B, L, O, P, Q, U	U	U	U	U	A, M, N, P, Q, R, S, T, U	A, M, N, P, Q, R, S, T, U	A, M, N, P, Q, R, S, T, U	

En el Cuadro 15 la nomenclatura utilizada es:

A: Se disparó interruptor de 220 KV

B: Falla de rotor a tierra.



- C: Flujo de agua bajo en radiadores
- D: Flujo de agua bajo en cojinete guía inferior
- E: Flujo de agua bajo en cojinete turbina inferior
- F: Flujo de agua bajo en cojinete guía superior
- G: Presión de regulador baja
- H: Nivel de aceite bajo en cojinete guía inferior
- I: Nivel de aceite bajo en cojinete turbina
- J: Sobrecarga térmica de la unidad
- K: Temperatura alta en el devanado de baja tensión del transformador de potencia
- L: Relé diferencial de generador
- M: Relé de potencia inversa
- N: Relé de falla a tierra
- O: Relé de baja impedancia
- P: Relé de sobretensión
- Q: Relé de baja tensión
- R: Relé de baja excitación
- S: Relé de secuencia negativa
- T: Sobrecorriente en transformador de excitación
- U: Flujo de agua bajo en radiadores

En este capítulo se mostró que se tienen acciones bien definidas y previamente planeadas para el accionamiento del generador. Estas acciones se siguen de acuerdo a la etapa que se esté realizando. En los siguientes capítulos se mostrará con mas detalle el arranque y diferentes paros de la máquina por medio de diagramas GRAFCET, con el fin de hacer más evidente el comportamiento de la máquina en sus diferentes etapas.

## 4 ARRANQUE DE LA MÁQUINA.

*En este capítulo se muestra el desarrollo de los diagramas GRAFCET nivel 1 y 2 para el arranque de la máquina. Cada uno de estos diagramas se ilustrará con sus respectivas aclaraciones y nomenclatura.*

Para simplificar la nomenclatura y mejorar el entendimiento de los diagramas se hará referencia a las listas A, B, C Y D que a continuación se muestran. Estas listas enuncian las condiciones para pasar las etapas estables.

### **LISTA A**

- ✓ No secuencia de paro
- ✓ Voltajes de control disponibles
- ✓ Voltajes de servicios auxiliares normal
- ✓ Selectores en posición normal
- ✓ Junta inflable de mantenimiento desapplicada
- ✓ Turbina lista
- ✓ Nivel de aceite cojinete superior normal
- ✓ Nivel de aceite cojinete inferior normal
- ✓ Relés de disparo en forma reseteada
- ✓ Sistema de frenos listos
- ✓ Presión sistema de aceite turbina listo
- ✓ Regulador de velocidad listo
- ✓ Válvula esférica lista

- ✓ Regulador de voltaje listo
- ✓ Refrigeración lista
- ✓ Válvula mariposa cerrada
- ✓ Sistema de inundación drenaje listo
- ✓ No falla compresor general
- ✓ Nivel de tanque normal
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado
- ✓ Interruptor unidad listo
- ✓ No falla potencial en reguladores
- ✓ Nivel de aceite tanque acumulador normal
- ✓ Distribuidor completamente cerrado
- ✓ Flujo de agua de refrigeración del generador y turbina normal

#### **LISTA B**

- ✓ No secuencia de paro activa
- ✓ Voltajes de control disponibles
- ✓ Voltajes de servicios auxiliares normales
- ✓ Selectores posición normal
- ✓ Relés de disparo reseteados
- ✓ Sistema de frenos listos
- ✓ Regulador de voltaje listo
- ✓ No falla compresor general
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado
- ✓ Interruptor listo
- ✓ No falla potencial reguladores

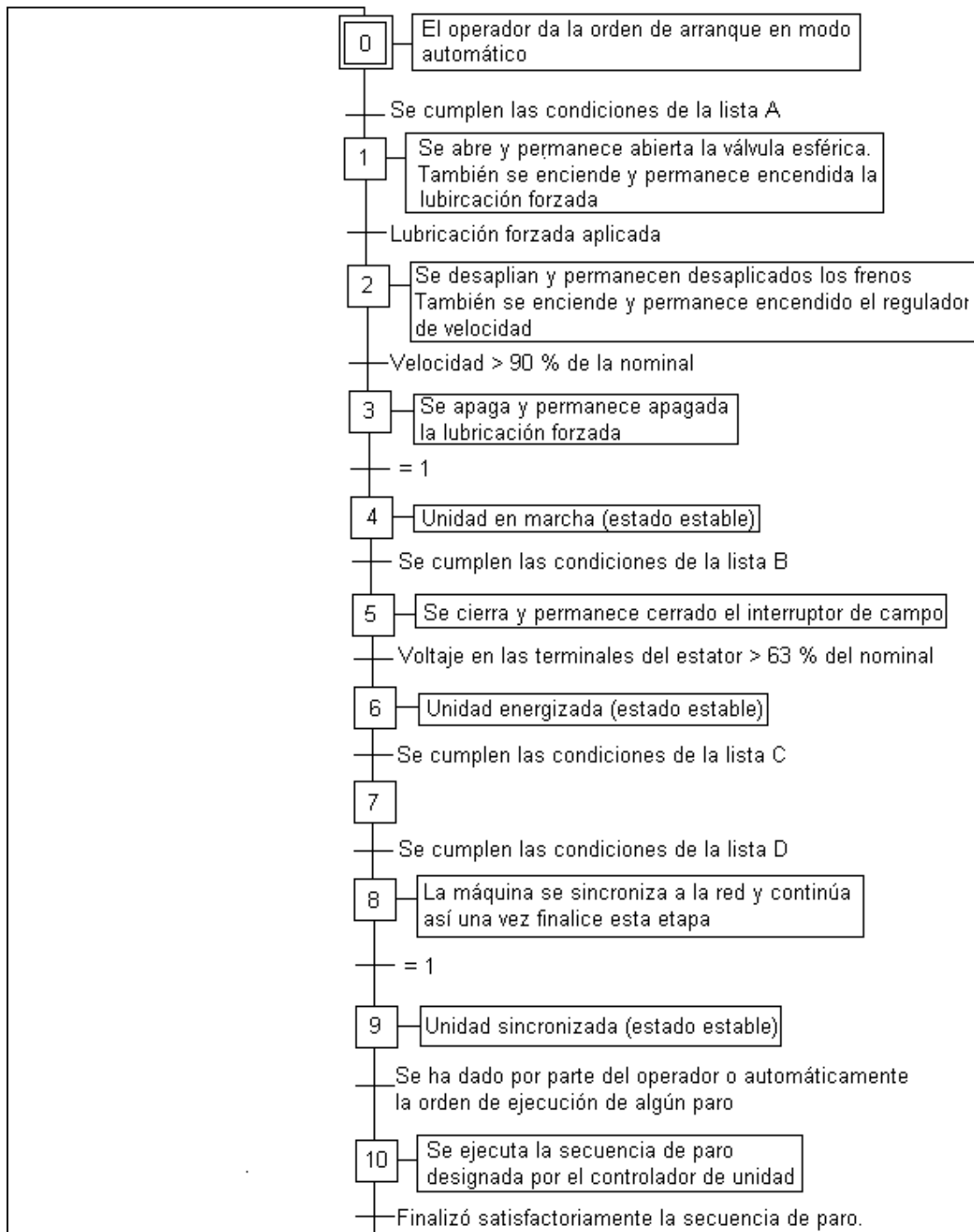
### **LISTA C**

- ✓ No existan secuencia de paro activas
- ✓ Voltajes de control disponibles
- ✓ Voltajes de servicios auxiliares disponibles
- ✓ Selectores en posición normal
- ✓ Relés de disparo reseteados
- ✓ Frenos listos
- ✓ No falla compresor general
- ✓ CO<sub>2</sub> no descargado
- ✓ Interruptor máquina listo
- ✓ No falla potencial reguladores

### **LISTA D**

- ✓ Sincronizador listo
- ✓ Seccionador generador listo

#### 4.1 GRAFCET 1 ARRANQUE DE LA MÁQUINA



#### 4.1.1 Notas aclaratorias del GRAFCET 1 de arranque.

- ✓ En la etapa 0 el operador selecciona el modo automático, porque si selecciona el modo paso a paso se realizará la misma secuencia, pero en cada etapa el operador deberá dar la orden de continuar.
  
- ✓ En la etapa 0 el operador selecciona el modo automático, pero el Digivis ofrece la opción de escoger hasta qué etapa estable se desea llevar la máquina. Así para cada etapa estable (4, 6 y 9) se deberá dar la orden de continuar, según la etapa hasta la que se quiera llegar. Esto se aclarará en el GRAFCET 2 de la secuencia de arranque.
  
- ✓ En la etapa 4 se detendrá la secuencia si el operador seleccionó el modo automático y la opción marcha en el programa Digivis. Así mismo la secuencia se detendrá en las etapas 6 y 9.
  
- ✓ El voltaje nominal del generador es 13800 V. Para que se dé la transición entre las etapas 5 y 6, se requiere que el voltaje sea mínimo de 8694 V
  
- ✓ La velocidad nominal de la máquina es 514 RPM. Para que se dé la transición entre las etapas 2 y 3, se requiere que la velocidad sea mínimo de 462.6 RPM
  
- ✓ La secuencia de arranque termina en la etapa 9. Las etapas siguientes son para cerrar el GRAFCET y mostrar como se regresa a la etapa 0.
  
- ✓ El cuadro 16 muestra las acciones a seguir en caso de no ser franqueada alguna transición.

**Cuadro 16.** Pasos a seguir en caso de no franquearse alguna transición en el arranque.

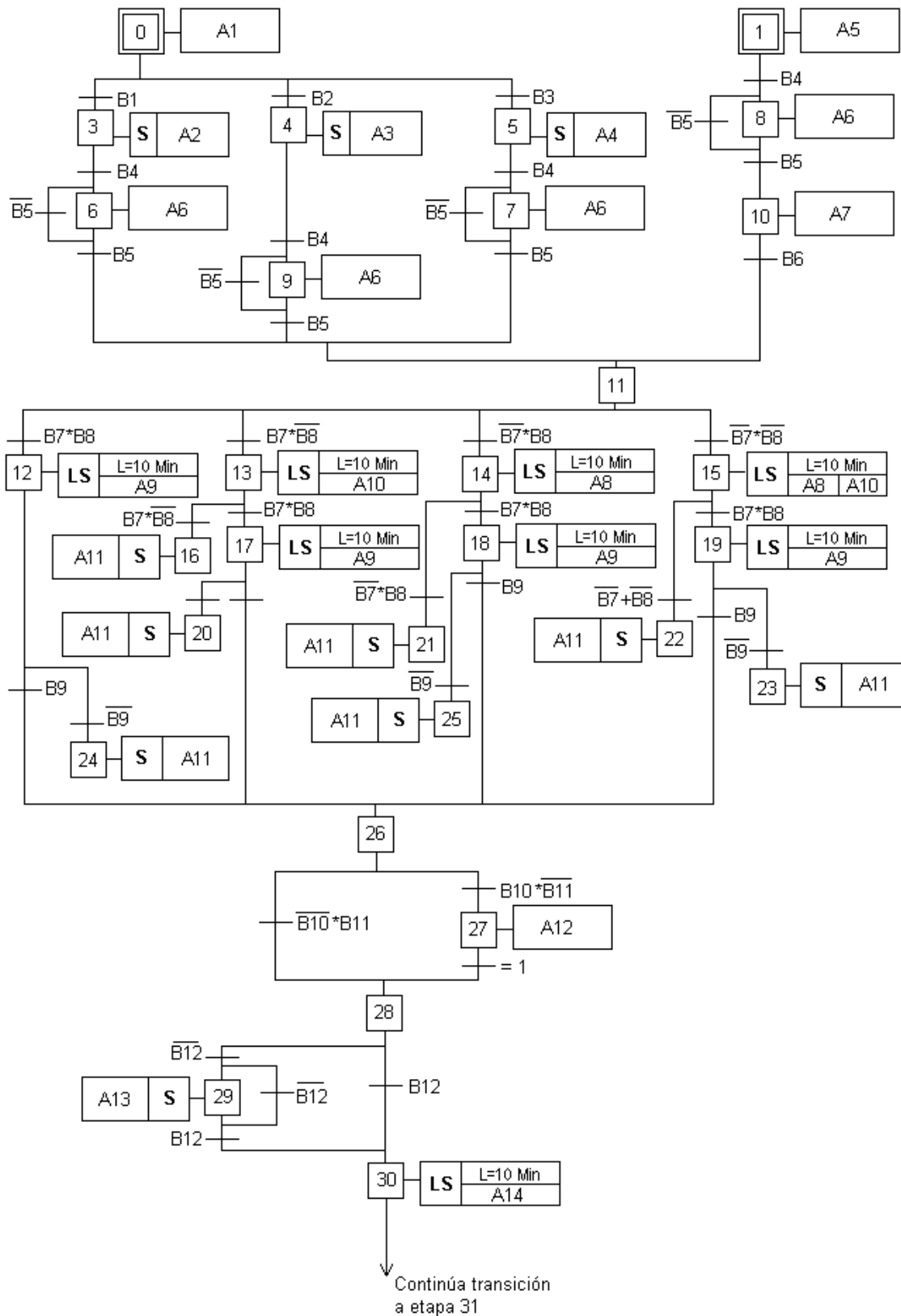
<b>TRANSICIÓN ENTRE ETAPAS</b>	<b>ACCIÓN DE INCUMPLIMIENTO</b>
0-1	No = 1
1-2	No = 2 y Va = 1
2-3	No = 3 y Va = 1
3-4	Siempre se cumple
4-5	No = 5 y Va = 4
5-6	No = 6 y Va = 4
6-7	No = 7 y Va = 6
7-8	No = 8 y Va = 6
8-9	Siempre se cumple

En el cuadro 16 se usa la siguiente nomenclatura:

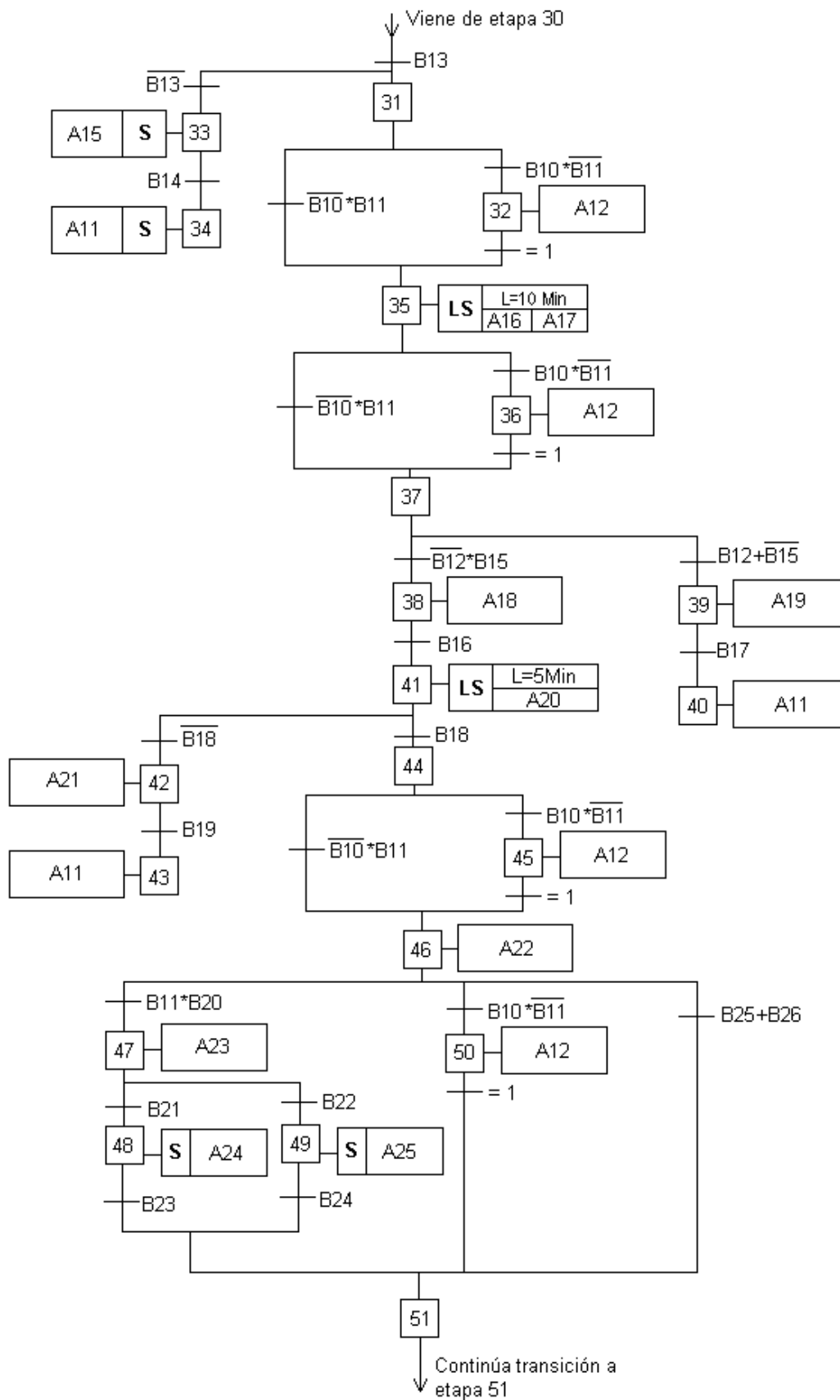
**No = #**  $\Rightarrow$  No pasa a la etapa #

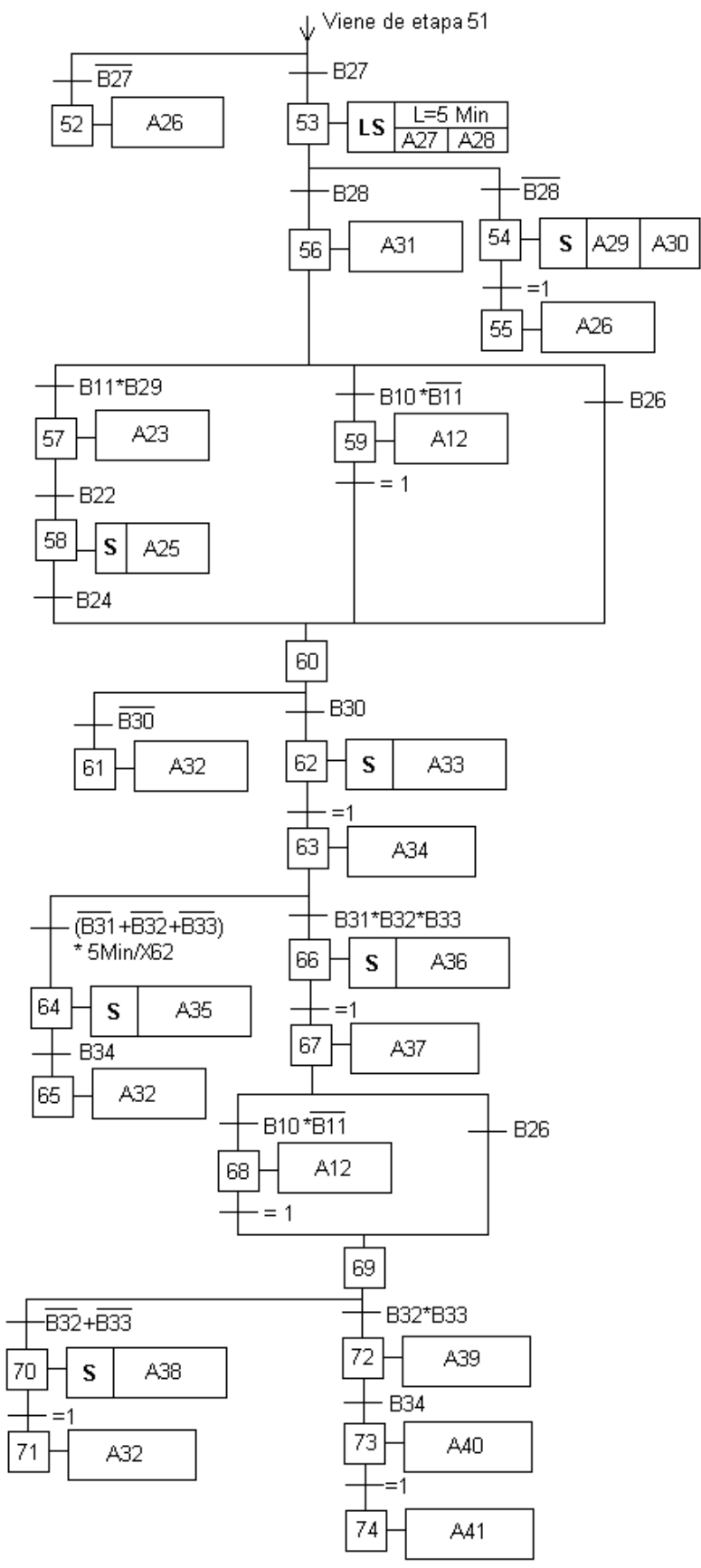
**Va = #**  $\Rightarrow$  Va a la etapa #

## 4.2 GRAFCET 2 ARRANQUE DE LA MÁQUINA









#### **4.2.1 Convención del GRAFCET 2 de arranque de la máquina.**

A1: Operador de la máquina envía orden de arranque automático al controlador de unidad

A2: Controlador memoriza la orden de llevar la secuencia hasta el estado estable de marcha

A3: Controlador memoriza la orden de llevar la secuencia hasta el estado estable de energizada

A4: Controlador memoriza la orden de llevar la secuencia hasta el estado estable de sincronizada

A5: Operador de la máquina envía orden de arranque paso a paso al controlador de unidad

A6: Controlador de unidad revisa cumplimiento de la lista A.

A7: Operador da la orden de continuar secuencia de arranque

A8: Abrir válvula de aislamiento

A9: Encender refrigeración

A10: Cerrar válvula de alivio

A11: Controlador dirige la máquina a la etapa 0 de la secuencia de arranque.

A12: Operador da la orden de continuar con la secuencia de arranque.

A13: Aplicar frenos

A14: Abrir válvula esférica

A15: Cerrar válvula esférica

A16: Encender lubricación forzada

A17: Desaplicar frenos

A18: Chequea estado del regulador de velocidad

A19: Ejecuta subprograma. (Ver GRAFCET subprograma 1)

A20: Encender regulador de velocidad

- A21: Ejecuta subprograma (Ver GRAFCET subprograma 2)
- A22: ETAPA ESTABLE (Unidad en marcha)
- A23: Operador da la orden de continuar secuencia hasta otra etapa estable.
- A24: Controlador memoriza la orden de llevar la secuencia hasta el estado estable de energizada
- A25: Controlador memoriza la orden de llevar la secuencia hasta el estado estable de sincronizada.
- A26: Controlador dirige la máquina a la etapa 46 de la secuencia de arranque.
- A27: Apagar lubricación forzada
- A28: Cerrar interruptor de campo
- A29: Abre interruptor de campo
- A30: Enciende lubricación forzada
- A31: ETAPA ESTABLE (Unidad energizada)
- A32: Controlador dirige la máquina a la etapa 56 de la secuencia de arranque.
- A33: Se enciende sincronizador
- A34: Se supervisa frecuencia, voltaje y fase de las ondas de voltaje de la red y del generador.
- A35: Apagar sincronizador
- A36: Cerrar interruptor del generador
- A37: ETAPA ESTABLE (Unidad sincronizada)
- A38: Abrir interruptor del generador
- A39: ETAPA ESTABLE (Unidad con potencia activa mínima)
- A40: Controlador de unidad ejecuta en su totalidad el paro seleccionado.
- A41: Controlador dirige la máquina a la etapa 0 de la secuencia de arranque.
- B1: Operador de la máquina selecciona llegar hasta el estado estable de marcha
- B2: Operador de la máquina selecciona llegar hasta el estado estable de energizada

B3: Operador de la máquina selecciona llegar hasta el estado estable de sincronizada

B4: Comunicaciones OK

B5: Se cumple lista A de condiciones

B6: Se dio orden de continuar secuencia de arranque

B7: Válvula de aislamiento abierta

B8: Válvula de alivio cerrada

B9: Refrigeración encendida

B10: Está activa secuencia paso a paso de arranque

B11: Está activa secuencia automática de arranque

B12: Frenos aplicados

B13: Válvula esférica abierta completamente

B14: Válvula esférica cerrada completamente

B15: Lubricación forzada encendida

B16: Regulador de velocidad desbloqueado

B17: Finalizó etapa 39

B18: Velocidad > 90% de la nominal

B19: Finalizó etapa 42

B20: En la etapa 0 del GRAFCET de arranque de la máquina, se ordenó llegar hasta la etapa estable de marcha

B21: Operador seleccionó llegar hasta la etapa estable de energizado.

B22: Operador seleccionó llegar hasta la etapa estable de sincronizada

B23: Controlador de unidad memorizó la orden de llegar en la secuencia hasta la etapa estable de máquina energizada

B24: Controlador de unidad memorizó la orden de llegar en la secuencia hasta la etapa estable de máquina sincronizada

B25: En la etapa 0 del GRAFCET de arranque de la máquina, se ordenó llegar hasta la etapa estable de energizada.

B26: En la etapa 0 del GRAFCET de arranque de la máquina, se ordenó llegar hasta la etapa estable de sincronizada

B27: Se cumple la lista B de condiciones.

B28: Voltaje en bornes del generador > 63 % del nominal.

B29: En la etapa 0 del GRAFCET de arranque de la máquina, se ordenó llegar hasta la etapa estable de energizada

B30: Se cumple la lista C de condiciones.

B31: Voltaje de red igual al voltaje del generador.

B32: Frecuencia de red igual a frecuencia del generador.

B33: Onda de voltaje del generador en fase con onda de red.

B34: Sincronizador apagado

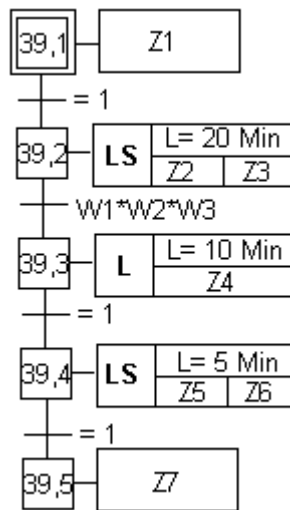
B32: Potencia activa > 0MW

B33: Limitador de apertura abierto más del 95%

B34: Se le dio al controlador de unidad la orden de ejecutar algún tipo de paro.

#### **4.2.1.1 Subprograma 1 De Arranque**

Este subprograma está asociado a la etapa 39 de la secuencia de arranque de la máquina, y denotado en las convenciones como A19



Donde:

Z1: Está activa etapa 39 de secuencia de arranque

Z2: Cerrar válvula esférica

Z3: Cerrar distribuidor

Z4: Aplicar frenos

Z5: Apagar bombas de refrigeración

Z6: Cerrar válvula de aislamiento

Z7: Finaliza etapa 30 de secuencia de arranque

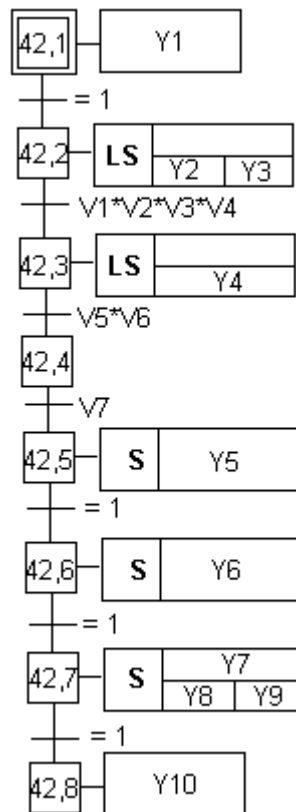
W1: Posición del distribuidor < del 2% de abertura

W2: Válvula esférica cerrada

W3: Velocidad < del 1 % de la nominal

#### 4.2.1.2 Subprograma 2 De Arranque

Este subprograma está asociado a la etapa 42 de la secuencia de arranque de la máquina, y denotado en las convenciones como A21



Donde:

Y1: Está activada etapa 42 de la secuencia de arranque

Y2: Cerrar distribuidor

Y3: Apagar regulador de velocidad

Y4: Cerrar válvula esférica

Y5: Aplicar frenos

Y6: Apagar lubricación forzada

Y7: Desaplicar frenos

Y8: Apagar refrigeración

Y9: Cerrar válvula de aislamiento

Y10: Finaliza etapa 42 de arranque de la máquina

V1: Limitador de apertura < 3% de apertura máxima

V2: Velocidad < 90% de la nominal



V3: Regulador de velocidad bloqueado

V4: Presión de lubricación forzada normal

V5: Válvula esférica cerrada

V6: Velocidad < 10% de la nominal

V7: Velocidad < 1% de la nominal

#### **4.2.2 Notas aclaratorias del GRAFCET 2 de arranque.**

- ✓ Las etapas memorizadas se desmemorizan cuando se realizan las distintas secuencias de paro descritas en la etapa 73.
- ✓ Las etapas de inicio del GRAFCET son mutuamente excluyentes, así si se selecciona comenzar la secuencia por la etapa 0, no podrá arrancarse desde la etapa 1 y viceversa.
- ✓ Un error en la ejecución de la secuencia llevará el sistema hasta la última etapa estable atravesada. Cuando esto ocurre, la evolución del mando se detiene en la etapa estable y se esperan ordenes del operador.
- ✓ Cuando se ha seleccionado comenzar la secuencia en la etapa 1, las ordenes de continuar se hacen desde la plataforma Digivis.

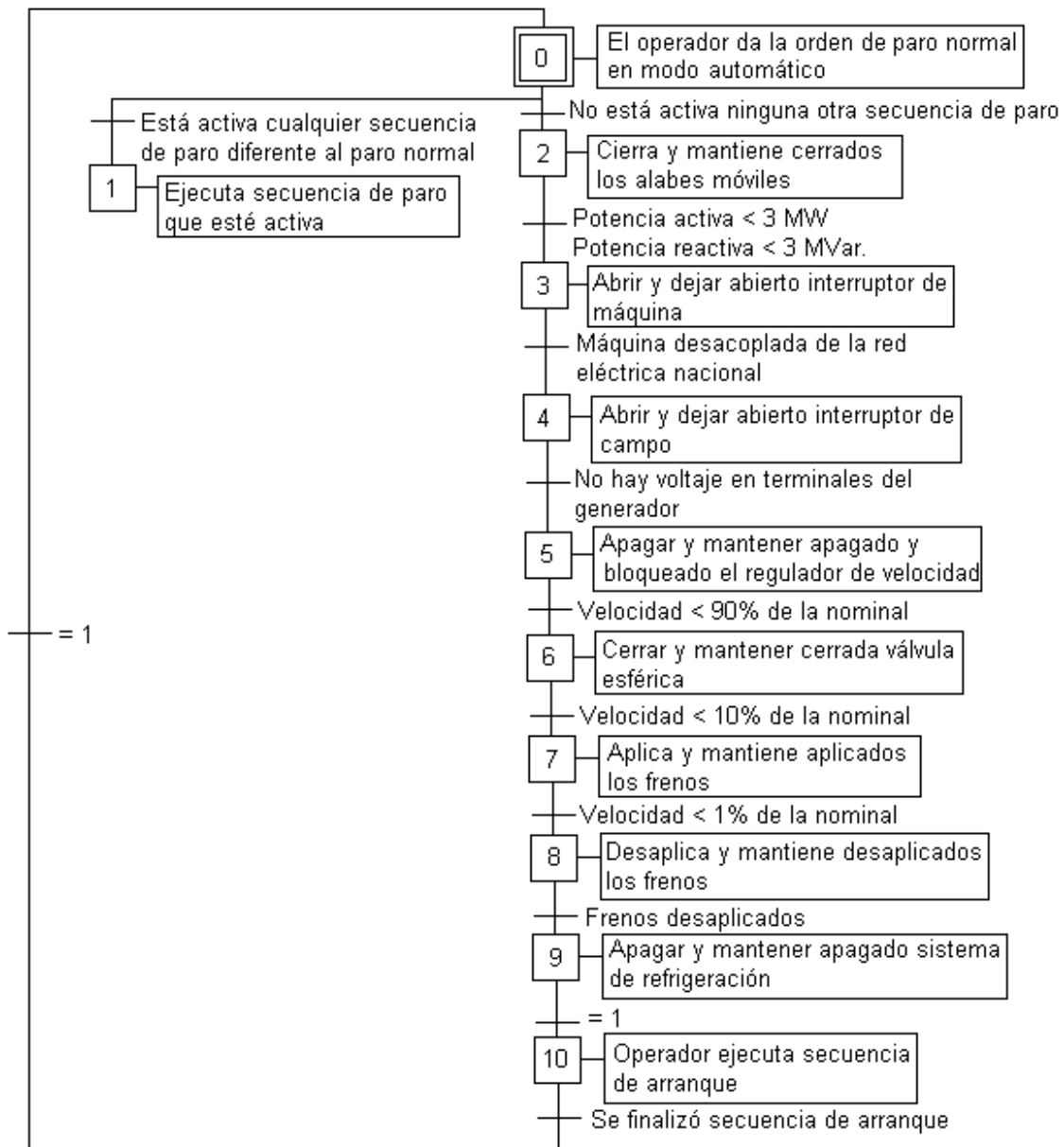
En este capítulo se ha expuesto de forma técnica los GRAFCET 1 y 2 de arranque de las máquinas modernizadas, cada uno de ellos con sus respectivas notas aclaratorias.

En el próximo capítulo se hará una descripción similar a la aquí hecha, pero para el paro normal de las máquinas.

## 5 PARO NORMAL DE LA MÁQUINA.

En este capítulo se muestra el desarrollo de los diagramas GRAFCET nivel 1 y 2 para el paro normal de la máquina. Cada uno de estos diagramas se ilustrará con sus respectivas aclaraciones y nomenclatura.

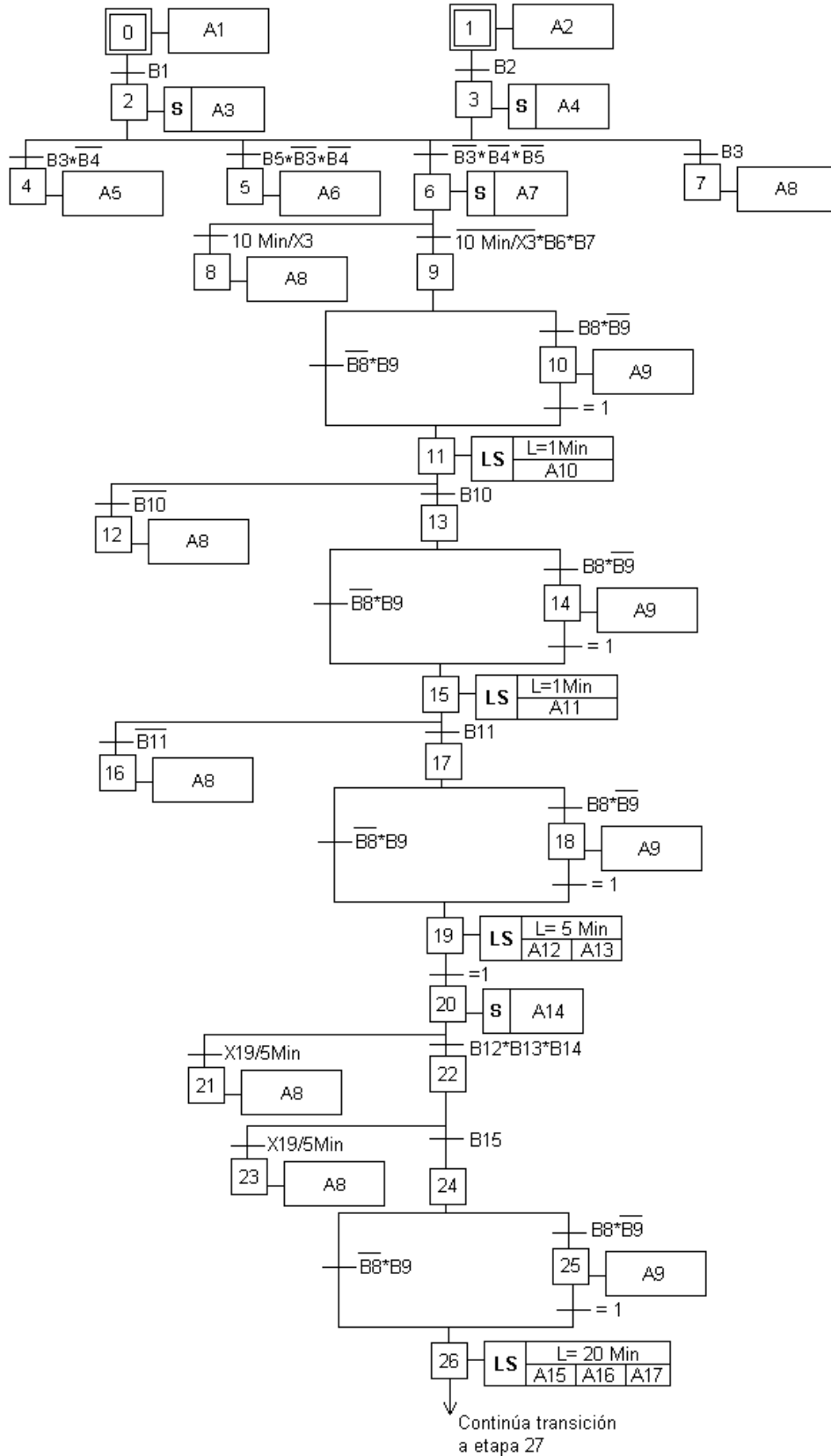
### 5.1 GRAFCET 1 PARO NORMAL DE LA MÁQUINA

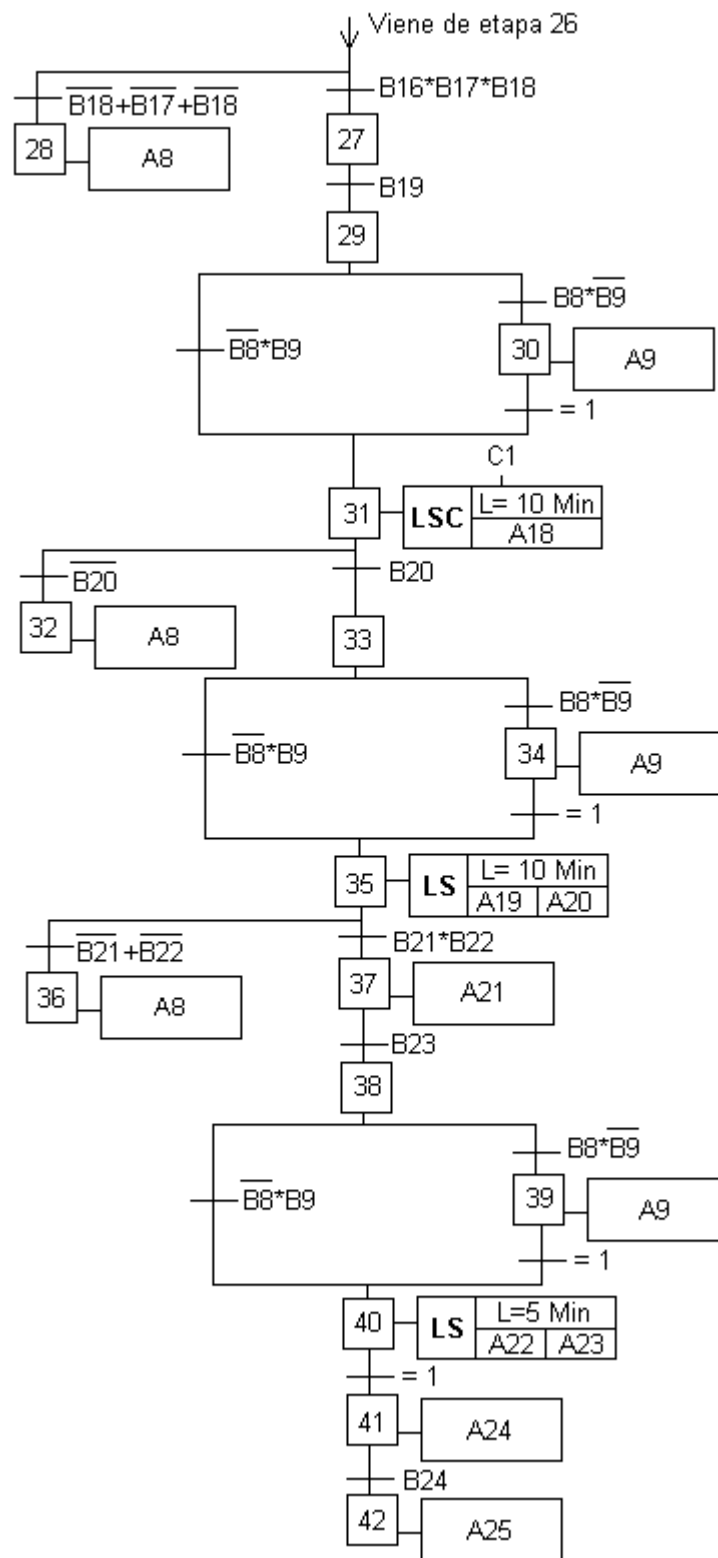


### 5.1.1 Notas aclaratorias al GRAFCET 1 de paro normal de la máquina

- ✓ En la etapa 0 se selecciona el modo de paro normal en automático porque el programa Digivis ofrece la opción de parar paso a paso. Para logra esto último es necesario que en cada etapa se de la orden de continuar la secuencia. Esto se verá mejor en el GRAFCET 2 para el paro normal.
- ✓ La orden que se da en la etapa 0 se hace de forma manual, por lo que la secuencia GRAFCET se queda en esta etapa esperando la orden del operador.
- ✓ La secuencia de paro normal va hasta la etapa 9. En la etapa 10 se quiere mostrar que la secuencia de paro se relaciona con la secuencia de arranque descrita en el capítulo 4 para así cerrar el ciclo del proceso.
- ✓ La etapa 10 es la ejecución de la secuencia GRAFCET de arranque la cual fue descrita en el capítulo 4.
- ✓ Nótese como en la etapa 1 se le da prioridad a cualquier otro tipo de paro si así lo decide el controlador de acuerdo a la programación. Esto con el fin de proteger los sistemas de la máquina.

## 5.2. GRAFCET 2 PARO NORMAL DE LA MÁQUINA





### **5.2.1 Convención del GRAFCET 2 de paro normal de la máquina**

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

### **5.2.2 Notas aclaratorias al GRAFCET 2 de paro normal de la máquina**

- ✓ Las acciones que fueron memorizadas durante el desarrollo del GRAFCET y no se desmemorian al finalizar el GRAFCET, se desmemoriarán durante la ejecución de la secuencia de arranque.
- ✓ No se grafica la secuencia de paro de emergencia a la cual se hace referencia en el GRAFCET, pues la secuencia de paro de emergencia se encuentra descrita en detalle en el capítulo 6.
- ✓ La ejecución de un paro de emergencia desde cualquier etapa del paro normal inicia el paro de emergencia. Luego de ello se recorre la secuencia de paro de emergencia hasta llegar a la etapa del paro normal en la que se disparó el paro de emergencia.
- ✓ Las etapas 0 y 1 son de realización manual, es decir, el operador de la máquina decide por cual de las dos arrancar y da la orden al controlador de unidad.
- ✓ La primera convergencia después de arrancar el GRAFCET, ya sea por la etapa 0 o 1, muestra como se le da prioridad a cualquier otra secuencia de paro diferente a la de paro normal. Esto se implementó para proteger las máquinas frente a cualquier eventualidad que se presente.
- ✓ La orden A9 que aparece en diferentes etapas es de realización manual, es decir que el operador debe darle la orden al controlador de unidad de continuar la secuencia. Nótese que se hace preciso dar dicha orden cuando se ha seleccionado la opción de hacer el paro normal de forma paso a paso.



✓ La secuencia de paro normal finaliza en la etapa 40, pero se han agregado las etapas 41 y 42 para cerrar el ciclo del GRAFCET y mostrar como se relaciona el paro normal con el de arranque, explicado en el capítulo 4.

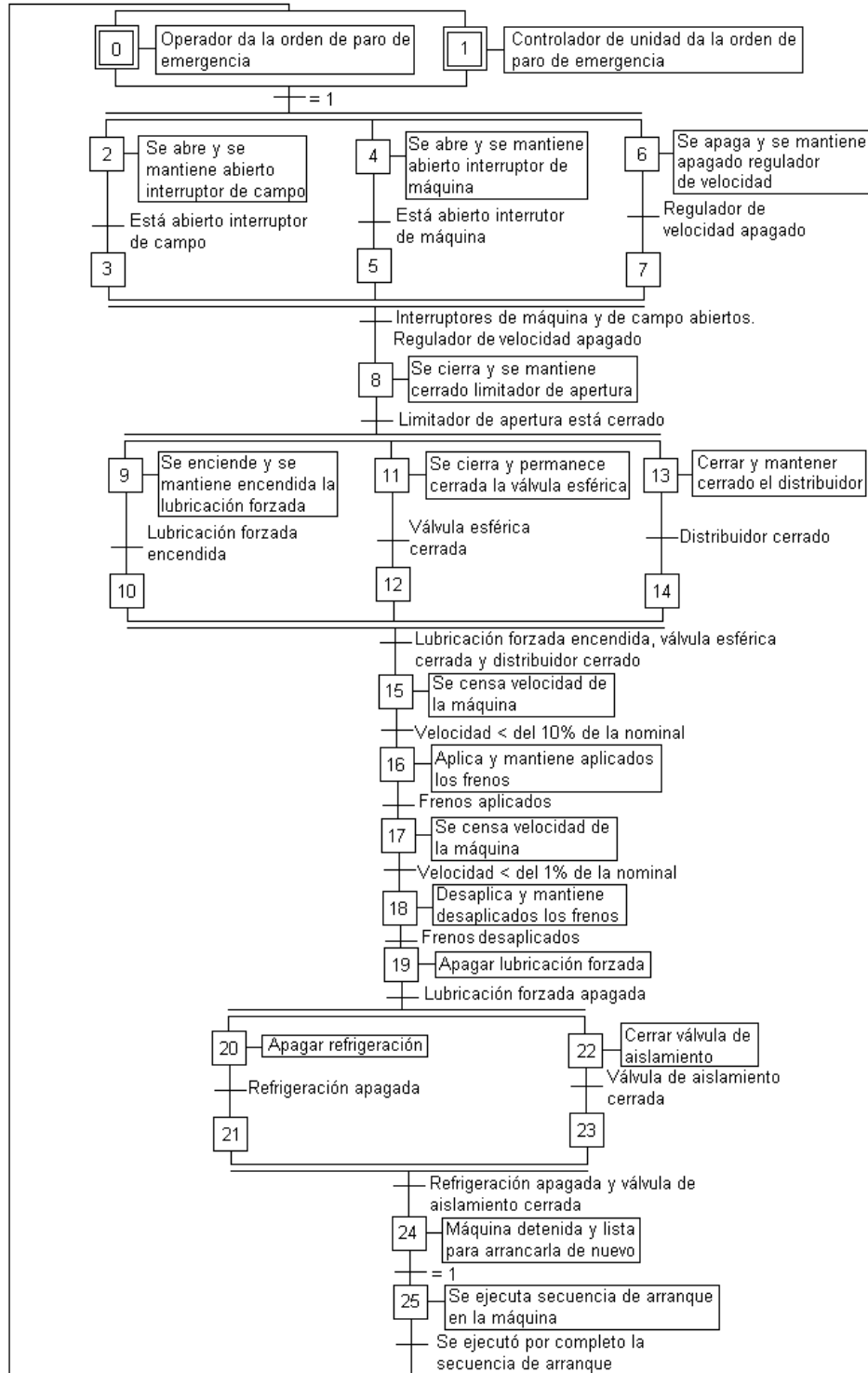
En este capítulo se ha expuesto de forma técnica los GRAFCET 1 y 2 del paro normal de las máquinas modernizadas, cada uno de ellos con sus respectivas notas aclaratorias.

En el próximo capítulo se hará una descripción similar a la aquí hecha, pero para el paro de emergencia de las máquinas.

## 6. PARO DE EMERGENCIA DE LAS MÁQUINAS.

En este capítulo se muestra el desarrollo de los diagramas GRAFCET nivel 1 y 2 para el paro de emergencia de la máquina. Cada uno de estos diagramas se ilustrará con sus respectivas aclaraciones y nomenclatura.

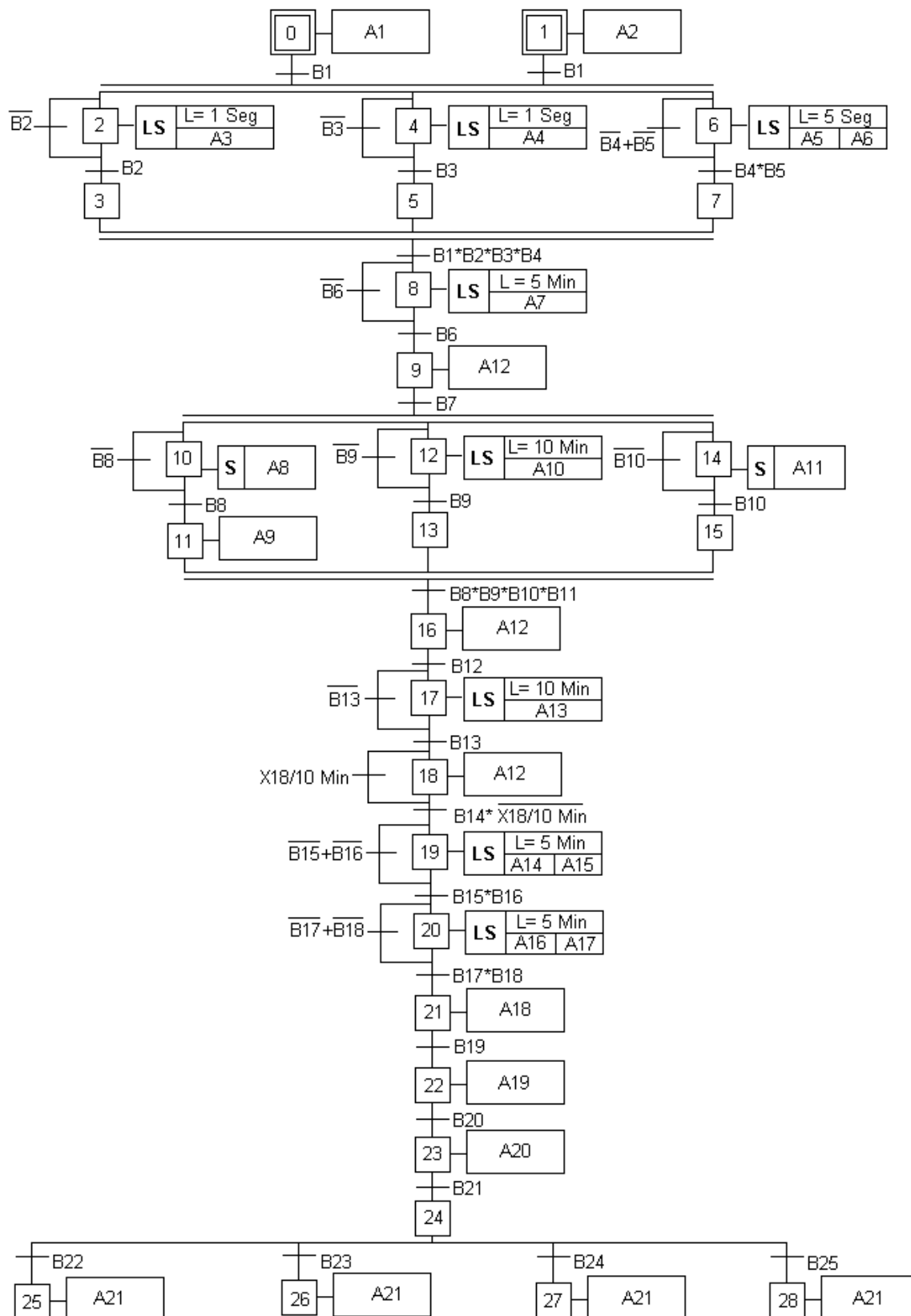
### 6.1 GRAFCET 1 PARO DE EMERGENCIA DE LA MÁQUINA



### **6.1.1 Notas aclaratorias al GRAFCET 1 de paro de emergencia de la máquina**

- ✓ La etapa 0 es de realización manual, es decir que el operador a voluntad activa el paro de emergencia cuando detecta alguna falla grave que amerite enviar la máquina a dicha secuencia.
- ✓ Luego de activar manualmente la etapa 0 o se haya activado automáticamente la etapa 1, va a una transición que siempre se cumple, pues no se necesitan prerequisites para que corra la secuencia, pues precisamente el objetivo de la misma es proteger la máquina frente a eventualidades que puedan poner en riesgo su funcionamiento en un futuro.
- ✓ Cuando por algún motivo no puede cumplirse alguna etapa, la secuencia se queda esperando en la etapa hasta que se solucione el problema manualmente. Esto se verá más claramente en el GRAFCET 2 del paro de emergencia.
- ✓ La secuencia de paro de emergencia termina en la etapa 24, donde se queda la máquina hasta que se dé la orden de arranque (ver capítulo 4) y antes de esto, se haya corregido el problema que llevó la máquina a ejecutar el paro de emergencia.
- ✓ El paro de emergencia puede darse no solo una vez se haya terminado la secuencia de arranque sino que también puede darse al ocurrir alguna falla en algún tipo de paro.

## 6.2 GRAFCET 2 PARO DE EMERGENCIA DE LA MÁQUINA



### **6.2.1 Convención del GRAFCET 2 de paro de emergencia de la máquina**

A1: Operador envía a controlador de unidad orden de ejecutar paro de emergencia.

A2: Ocurre falla grave que envía al controlador de unidad la orden de ejecutar paro de emergencia.

A3: Abrir interruptor de campo

A4: Abrir interruptor de máquina

A5: Bloquear regulador de velocidad

A6: Apagar regulador de velocidad

A7: Cerrar limitador de apertura

A8: Encender lubricación forzada

A9: Monitorear presión de la lubricación forzada

A10: Cerrar válvula esférica

A11: Cerrar distribuidor

A12: Monitorear velocidad de la máquina

A13: Aplicar frenos

A14: Apagar lubricación forzada

A15: Desaplicar frenos

A16: Cerrar válvula de aislamiento

A17: Apagar refrigeración de la máquina

A18: Se solucionan los problemas que ocasionaron el paro de emergencia

A19: Rearmar las alarmas que se dispararon causando el paro de emergencia

A20: Operador ejecuta secuencia de arranque

A21: Ir a la etapa 1 del paro de emergencia

B1: Controlador recibe la orden de ejecutar secuencia de paro de emergencia

B2: Interruptor de campo abierto

B3: Interruptor de máquina abierto

- B4: Regulador de velocidad bloqueado
- B5: Regulador de velocidad apagado
- B6: Limitador de apertura cerrado
- B7: Velocidad de la máquina < 90% de la nominal
- B8: Lubricación forzada encendida
- B9: Válvula esférica cerrada completamente
- B10: Distribuidor cerrado completamente
- B11: Presión de lubricación forzada en rangos normales
- B12: Velocidad de la máquina < 10% de la nominal
- B13: Frenos aplicados
- B14: Velocidad de la máquina < 1% de la nominal
- B15: Lubricación forzada apagada
- B16: Frenos desaplicados
- B17: Refrigeración de la máquina apagada
- B18: Válvula de aislamiento cerrada
- B19: Se solucionaron los problemas que ocasionaron el paro de emergencia
- B20: Se rearmaron las alarmas que se dispararon
- B21: Se ejecutó en la totalidad el arranque de la máquina
- B22: Ocurre falla grave que el controlador reconoce como causante de paro de emergencia
- B23: Error en la secuencia de paro rápido
- B24: Error en la secuencia de paro normal
- B25: Error en la secuencia de paro parcial

### **6.2.2 Notas aclaratorias al GRAFCET 2 de paro de emergencia de la máquina**

- ✓ Si la secuencia se queda dando vueltas sobre una misma etapa (así está configurado el sistema), será necesaria la intervención de los ingenieros u operadores para solucionar el problema manualmente y hacer que se continúe la secuencia normalmente.
- ✓ Cuando por alguna razón no se puede finalizar la secuencia de paro de emergencia, se produce una alarma en la sala de control indicando cual es la falla que está impidiendo la culminación de la secuencia, para que así los ingenieros puedan proceder a solucionar el problema.
- ✓ La etapa 0 del GRAFCET del paro de emergencia debe ser activada manualmente, y solamente cuando a consideración del ingeniero u operador se esté poniendo en riesgo la integridad de la máquina.
- ✓ La etapa 1 del GRAFCET se activa automáticamente cuando el controlador de unidad detecta que hay algún riesgo para a operación de la máquina. Esta selección del riesgo se hace de acuerdo a una programación previa del controlador.
- ✓ La etapa 21 debe sobre pasarse manualmente con la supervisión de un ingeniero.
- ✓ La etapa 22 es de vital importancia para tener las condiciones de arranque (Ver GRAFCET 2 de arranque de la máquina).
- ✓ La secuencia de arranque que se enuncia en la etapa 23 se hace de acuerdo al GRAFCET de arranque descrito en el capítulo 4.
- ✓ La divergencia presentada luego de la etapa 24 es con el fin de cerrar el GRAFCET del paro de emergencia en las etapas 0 y 1 que son las del inicio del GRAFCET. Además esta divergencia se presenta también con el fin de mostrar de forma general las diferentes causantes del paro de emergencia.

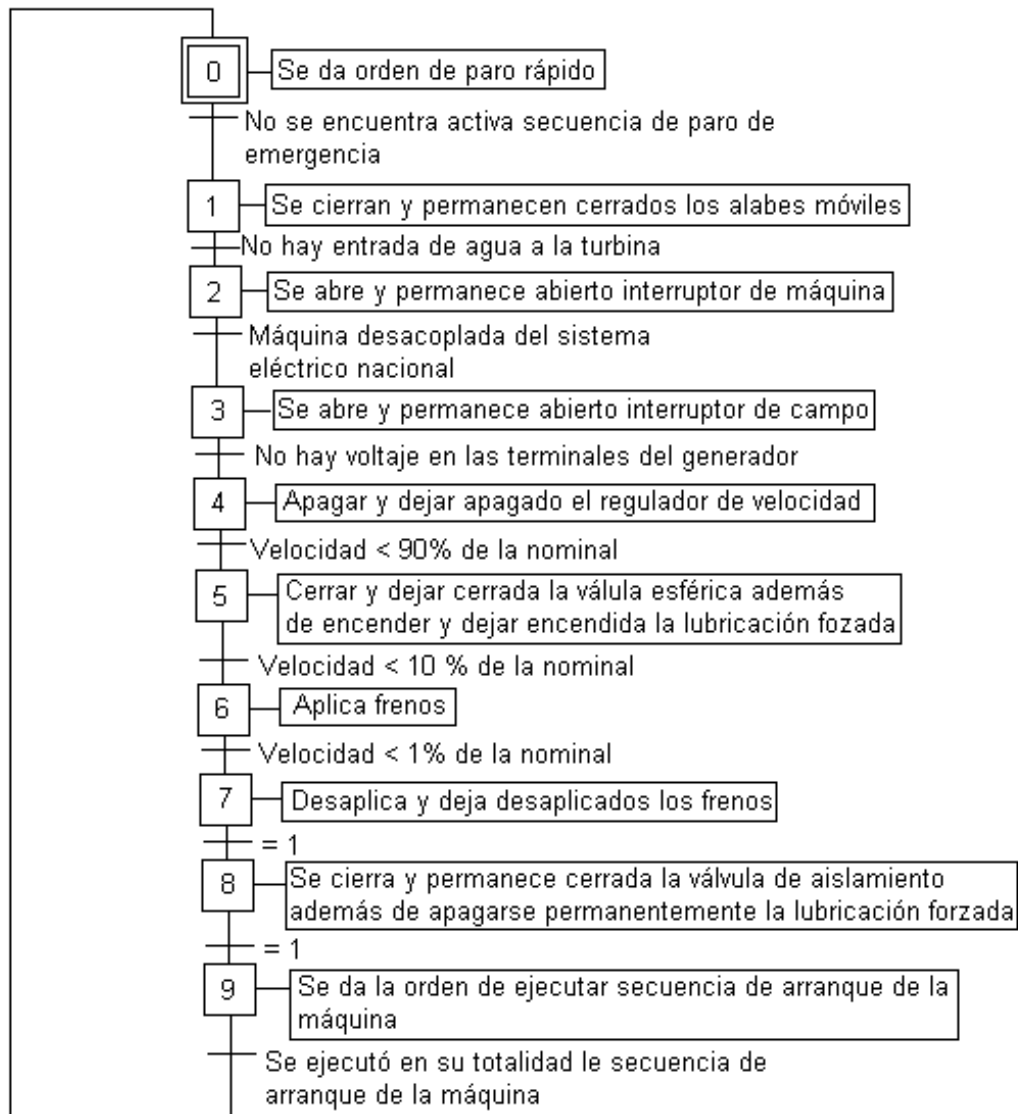
En este capítulo se ha expuesto de forma técnica los GRAFCET 1 y 2 del paro de emergencia de las máquinas modernizadas, cada uno de ellos con sus respectivas notas aclaratorias. En el próximo capítulo se hará una descripción similar a la aquí hecha, pero para el paro rápido de las máquinas.



## 7. PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA.

En este capítulo se muestra el desarrollo de los diagramas GRAFCET nivel 1 y 2 para el paro rápido de las máquinas. Cada uno de estos diagramas se ilustrará con sus respectivas aclaraciones y nomenclatura.

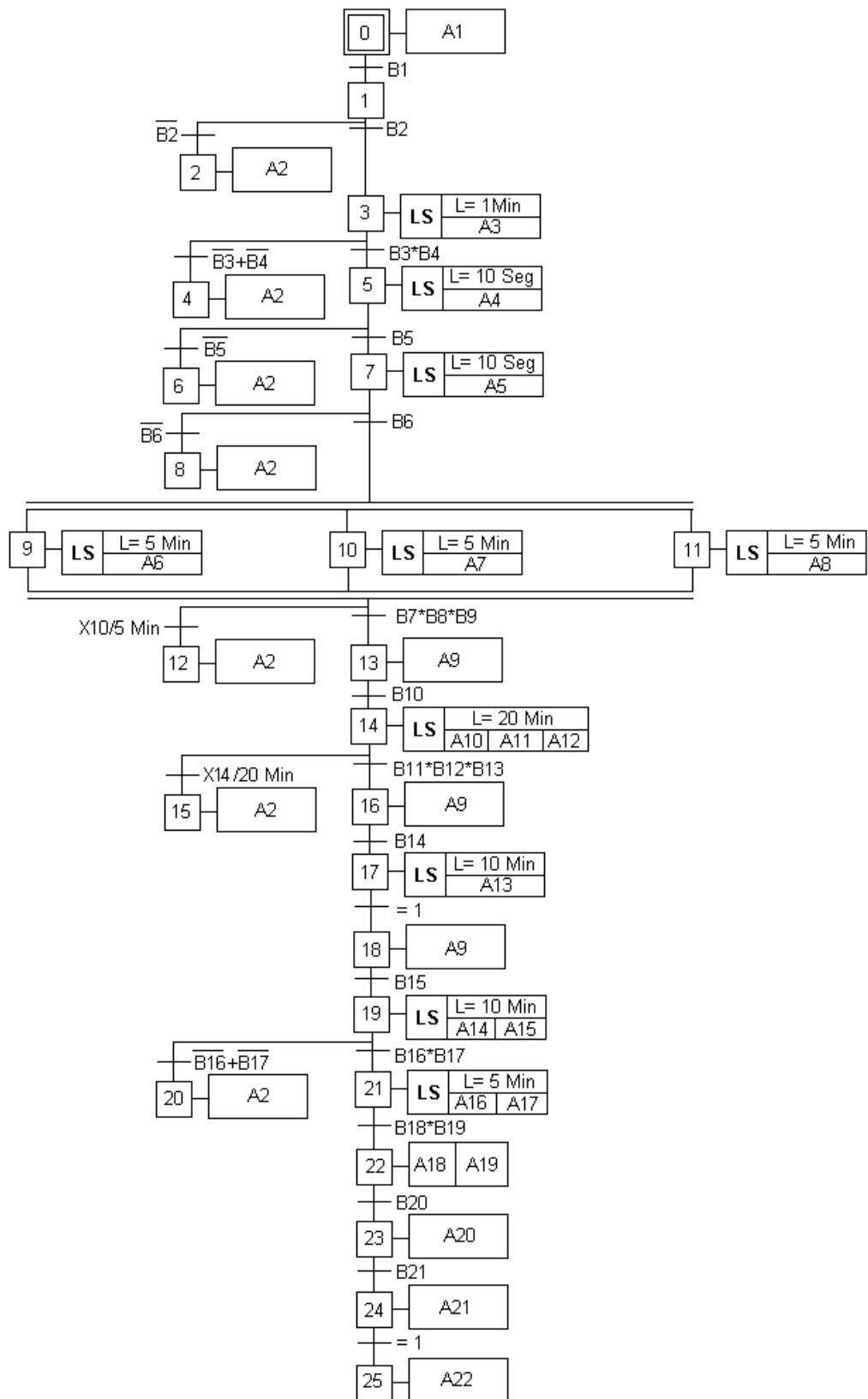
### 7.1 GRAFCET 1 PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA



### **7.1.1 Notas aclaratorias al GRAFCET 1 de paro rápido de la máquina**

- ✓ La imposibilidad de ejecutar cualquier etapa por cualquier motivo, hará que la máquina ejecute el paro de emergencia. Esto se evidenciará en el GRAFCET 2 del paro rápido de la máquina (Capítulo 7,2).
- ✓ Cada etapa está limitada por un tiempo, el cual será expuesto en el GRAFCET 2 de paro rápido de la máquina (Capítulo 7,2).
- ✓ La etapa 0 se activa cuando ocurre alguna falla que según la configuración del sistema, amerite ejecutar el paro rápido de la máquina para así proteger la integridad de la misma.
- ✓ La secuencia de paro rápido culmina en la etapa 8, pero se han agregado las demás etapas para cerrar el GRAFCET.
- ✓ En la transición de la etapa 9 a la etapa 0 se muestra que solo se activa el paro rápido una vez haya finalizado la secuencia de arranque. En caso de presentarse cualquier eventualidad durante el arranque, la máquina realizará el paro que en la secuencia de arranque (Capítulo 4) se muestra, de acuerdo a la etapa que se esté ejecutando en ese instante.

## 7.2 GRAFCET 2 PARO RÁPIDO DE LA MÁQUINA



### **7.2.1 Convención del GRAFCET 2 de paro rápido de la máquina**

A1: Ocurre falla grave que envía la orden al controlador de unidad de ejecutar paro rápido.

A2: Ejecutar secuencia de paro de emergencia

A3: Cerrar alabes móviles

A4: Abrir interruptor de máquina

A5: Abrir interruptor de campo

A6: Cerrar limitador de apertura

A7: Apagar regulador de velocidad

A8: Bloquear regulador de velocidad

A9: Monitorear velocidad de la máquina

A10: Encender lubricación forzada

A11: Cerrar válvula esférica

A12: Cerrar distribuidor

A13: Aplicar frenos

A14: Apagar lubricación forzada

A15: Desaplicar frenos

A16: Cerrar válvula de aislamiento

A17: Apagar sistema de refrigeración

A18: Se solucionan los problemas que ocasionaron el paro rápido

A19: Rearmar las alarmas que se dispararon causando el paro rápido

A20: Se da la orden de ejecutar la secuencia de arranque

A21: Ocurre falla grave que el controlador reconoce como causante de paro rápido

A22: Ir a la etapa 0 de la secuencia de paro rápido

B1: comunicaciones están OK

B2: Controlador recibió orden de ejecutar secuencia de paro rápido

B3: Potencia activa < 3 MW

- B4: Potencia reactiva < 3 Mvar,
- B5: Interruptor de máquina abierto
- B6: Interruptor de campo abierto
- B7: Limitador de apertura cerrado
- B8: Regulador de velocidad apagado
- B9: Regulador de velocidad bloqueado
- B10: Velocidad < 90% de la nominal
- B11: Presión de la lubricación forzada en rangos normales
- B12: Válvula esférica completamente cerrada
- B13: Distribuidor completamente cerrado
- B14: Velocidad < 10% de la nominal
- B15: Velocidad < 1 % de la nominal
- B16: Frenos desaplicados
- B17: Lubricación forzada apagada
- B18: Válvula de aislamiento cerrada
- B19: Bombas de refrigeración apagadas
- B20: Se rearmaron las alarmas y disparos presentados en el paro rápido
- B21: Se ejecutó en la totalidad el arranque de la máquina

### **7.2.2 Notas aclaratorias al GRAFCET 2 de paro rápido de la máquina**

- ✓ La etapa 0 se realiza en forma automática, luego de que el controlador de unidad reconoce alguna falla grave que según su configuración, envíe la máquina al paro rápido, para evitar así poner en peligro la integridad de la máquina.
- ✓ La imposibilidad de franquear alguna etapa en el paro rápido, envía la máquina a ejecutar el paro de emergencia para así proteger los sistemas.

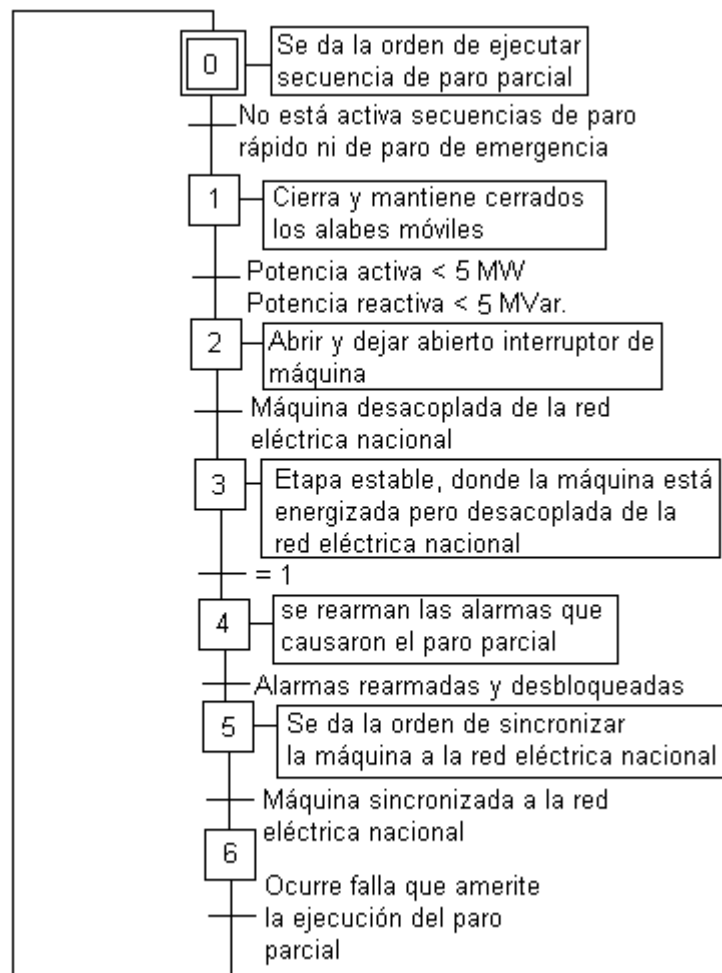
- ✓ La secuencia de paro rápido, tal como la reconoce el controlador de unidad, finaliza en la etapa 21.
- ✓ La etapa 22 debe ser franqueada de forma manual, pues en esta etapa es donde se reconocen las causas del paro rápido y se le da solución al problema.
- ✓ El objetivo de incluir las etapas 23 a 25 es cerrar el GRAFCET y mostrar cómo se relaciona el paro rápido con la secuencia de arranque.

En este capítulo se ha expuesto de forma técnica los GRAFCET 1 y 2 del rápido de las máquinas modernizadas, cada uno de ellos con sus respectivas notas aclaratorias. En el próximo capítulo se hará una descripción similar a la aquí hecha, pero para el paro parcial de las máquinas.

## 8. PARO PARCIAL DE LAS MÁQUINAS.

En este capítulo se muestra el desarrollo de los diagramas GRAFCET nivel 1 y 2 para el paro parcial de las máquinas. Cada uno de estos diagramas se ilustrará con sus respectivas aclaraciones y nomenclatura.

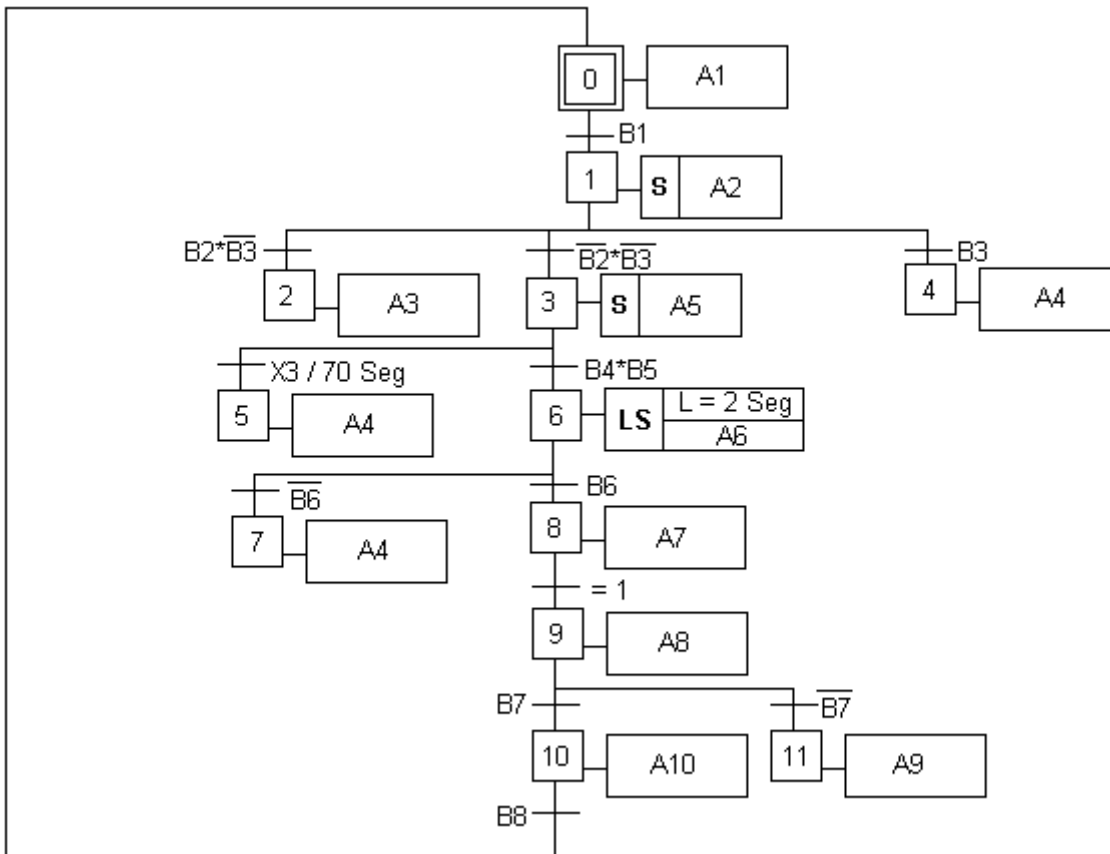
### 8.1 GRAFCET 1 PARO PARCIAL DE LA MÁQUINA



### 8.1.1 Notas aclaratorias al GRAFCET 1 de paro parcial de la máquina

- ✓ La orden de ejecución del paro parcial es dada automáticamente por el controlador de unidad, si se detecta alguna falla en la red eléctrica nacional que amerite la desconexión de la máquina del mismo.
- ✓ Cuando ejecuta el paro parcial, la máquina queda en la etapa estable (etapa 3) hasta que se dé la orden de sincronizarla nuevamente a la red.
- ✓ Para sincronizar nuevamente la máquina es necesario rearmar las alarmas que causaron el paro parcial.
- ✓ Un fallo en la ejecución del paro parcial llevará la máquina a paro de emergencia.

### 8.2 GRAFCET 2 PARO PARCIAL DE LA MÁQUINA





### **8.2.1 Convención del GRAFCET 2 de paro parcial de la máquina**

A1: Controlador de unidad detecta falla en la conexión de la máquina a la red eléctrica nacional.

A2: Controlador ejecuta secuencia de paro parcial

A3: Ejecuta toda la secuencia de paro rápido

A4: Ejecuta toda la secuencia de paro de emergencia

A5: Cerrar alabes móviles

A6: Abrir interruptor del generador

A7: Etapa estable. Unidad energizada.

A8: Se solucionan los problemas que ocasionaron el paro parcial

A9: Operador envía orden de ejecutar de paro normal

A10: Operador envía orden de sincronizar nuevamente la máquina a la red

B1: Controlador detectó falla en la conexión de la máquina al sistema eléctrico nacional

B2: Está activa secuencia de paro rápido

B3: Está activa secuencia de paro de emergencia

B4: Potencia activa < 5 % del máximo operativo (< 3.48 MW)

B5: Potencia reactiva < 5 % del máximo operativo (<1.69 Mvar)

B6: Interruptor del generador está abierto

B7: Se solucionaron los problemas en la máquina satisfactoriamente

B8: Máquina sincronizada a la red eléctrica nacional

### **8.2.2 Notas aclaratorias al GRAFCET 2 de paro rápido de la máquina**

- ✓ El paro parcial solo se puede ejecutar luego de estar la máquina sincronizada a la red eléctrica nacional, tal como se muestra la transición de la etapa 10 a la 0

- ✓ La orden de ejecutar el paro parcial es dada automáticamente por el controlador de unidad, tal como se puede apreciar en la etapa 1. Este paro se ejecuta después de que en la etapa 0 se haya detectado algún problema que amerite realizarlo.
- ✓ Siempre tiene primacía los paros rápidos y de emergencia frente al paro parcial.
- ✓ La imposibilidad de ejecutar alguna etapa de la secuencia de paro parcial, llevará la máquina al paro de emergencia.
- ✓ En la etapa 8 se queda la máquina girando y energizada hasta que no se reciba alguna orden por parte del operador.
- ✓ La etapa 9 se ejecuta manualmente, es decir, que el operador es el encargado de activar dicha etapa.

## 9. CONCLUSIONES

### **Respecto al GRAFCET:**

- ✓ Los diagramas GRAFCET son útiles para encontrar redundancias en los automatismos implementados que no cuentan con una documentación completa. Adicionalmente estos diagramas permiten visualizar las opciones con que cuenta el automatismo diseñado para la máquina cuando ocurre alguna eventualidad.
- ✓ Por medio de los diferentes GRAFCET se pueden encontrar fallas en el comportamiento de las máquinas durante su operación, conocer la causa de la falla y proponer soluciones.
- ✓ En esta aplicación los diagramas GRAFCET desarrollados permitirán reducir los tiempos de entrenamiento de operarios lo cual mejora los niveles de seguridad en la central y agiliza la búsqueda de fallas en las máquinas. Los diagramas GRAFCET desarrollados también permitirán introducir futuros cambios en el automatismo y actualización con fácil comprensión de los efectos.

### **Respecto a los GRAFCET desarrollados:**

- ✓ Cuando ocurra un paro de emergencia en alguna máquina, es aconsejable seguir las etapas de paro y verificar que ellas se cumplan en el GRAFCET correspondiente al paro. El objetivo de esto es verificar que todas las acciones de las etapas se ejecuten, de forma que se pueda realizar un diagnóstico de la causa del paro y un posterior arranque seguro.

✓ En el cuadro 15 se nota que el paro de emergencia está disponible principalmente en las etapas iniciales y finales del arranque. En estas etapas se efectúan las acciones relacionadas con variables eléctricas o de chequeo de la disponibilidad de los diferentes sistemas mecánicos. Debido a lo anterior, se recomienda siempre tener la posibilidad de ejecutar un paro de emergencia porque operar la máquina sin esta posibilidad es un riesgo que jamás se debe correr pues pondría en peligro las vidas de los operarios y la integridad de la central.

✓ El sistema de protección de las máquinas tiene características que garantizan buenos niveles de seguridad ya que:

- Contempla para cada etapa de las diferentes secuencias una acción alternativa en caso de haber alguna eventualidad.
- Tiene control redundante en algunas etapas.

Sin embargo en la secuencia del paro de emergencia al no contarse con acciones alternativas automáticas debe tenerse especial cuidado durante su ejecución, verificando el cumplimiento de cada una de las etapas.

✓ Adicionalmente se recomienda utilizar eficientemente esta información, actualizarla y mejorarla con base en los procesos de modernización que sufra la central durante su existencia.

## **BIBLIOGRAFÍA**

BALCELLS, JOSEP. Automatas programables. España. Marcombo. 1997

GALEANO, DAVID, Manual de Operación y control de la planta de Guadalupe IV. Planoteca Guadalupe IV EPM. 134 P.

PEIRÓ, TOMAS, Análisis y diseño gráfico de automatismos secuenciales GRAFCET (teoría). Universidad Politécnica de Valencia, España. 105 P.

Información técnica matriz de secuencia, EPM. Planoteca central de Guadalupe IV