



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



52
2Ej

FALLA DE ORIGEN

ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE
ENERGIA ELECTRICA AL SISTEMA
DE BOMBEO CUTZAMALA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A
VICTOR TORRES SALVADOR

ASESORES:

ING. ARMANDO GRANDE GONZALEZ (CFE)

ING. ESTEBAN CORONA ESCAMILLA (FES-C)



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLÁN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Alternativa de suministro de energía eléctrica al Sistema de
Bombeo Cutzamala".

que presenta el pasante: Victor Torres Salvador
con número de cuenta: 8407239-5 para obtener el TÍTULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista ; en colaboración con :

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 10 de Febrero de 1995.

PRESIDENTE	Ing. Javier Hernández Vega	<u>[Firma]</u>
VOCAL	Ing. Esteban Corona Escamilla	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	Ing. Ricardo Ramírez Verdeja	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	Ing. Casildo Rodríguez Arciniega	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Jaime Rodríguez Martínez	<u>[Firma]</u>

DEDICATORIAS

A Dios

Por prestarme la vida y con ello, la oportunidad de mostrarle una de mis metas, en esta maravillosa existencia de ilusiones, logros y lucha constante.

A mi mamá

Por su diario sacrificio, por su apoyo y comprensión, y sobre todo, por inculcarme los principios de firmeza, honradez y rectitud. A ella con gran admiración y respeto.

A mi papá

Porque me há dado los ejemplos suficientes, para poderme abrir paso en todas mis actividades emprendidas.

A mis hermanos

Por su contribución a la armonía familiar. A ellos con todo mi cariño, deseando que consideren que los grandes logros, dependen en gran medida de uno mismo.

A mis tíos y primos

Por el apoyo moral que de ellos hé recibido, en momentos difíciles de mi vida.

A mis amigos

A todos y cada uno de ellos, porque hán sido y son, una gran fuente de apoyo en mi caminar.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Porque al paso de sus aulas, obtuve los conocimientos para mi formación profesional, exigiendome a cambio solamente: esfuerzo y dedicación.

Al Ing. Armando Grande González

Porque sin su apoyo no hubiera sido posible la elaboración del presente trabajo de tesis...mi más sincero agradecimiento.

Al Ing. Irineo García Cervantes

Por darme la oportunidad de realizar mi servicio social y prácticas profesionales en la Comisión Federal de Electricidad, actividades que me permitieron colaborar en el proyecto que presento como tesis.

Al Maestro en Ciencias Gilberto Enriquez Harper

Por las facilidades otorgadas para elaborar la presente tesis, en las instalaciones de la Unidad de Ingeniería Especializada (UIE) de C.F.E, auxiliandome de sus excelentes recursos humanos y técnicos.

Al Ing. Esteban Corona Escamilla

Por su disposición y asesoría para el presente trabajo de tesis.

A la Comisión Nacional del Agua (CNA)

Por la información otorgada, misma que fué de mucha utilidad para complementar este trabajo.

Al honorable jurado

Por sus valiosas atenciones para la presente tesis.

ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA AL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA

JUSTIFICACION:

El Sistema de Bombeo Cutzamala, proporciona a la zona metropolitana de la Ciudad de México 19 m^3 por segundo, cantidad que representa el 27% de lo que se consume en esta zona. El suministro de energía eléctrica a las plantas de bombeo del Sistema Cutzamala se realiza actualmente de la subestación Donato Guerra (DOG), a través de líneas de transmisión las cuales enlazan directamente el bus de 115 kV de esta subestación, con las subestaciones de las plantas de bombeo. Como medida preventiva, ante una contingencia mayor, en la cual no se dispusiera de la alimentación eléctrica proveniente de la SE. DOG; la zona metropolitana de la Ciudad de México dejaría de recibir los 19 m^3 por segundo. En este trabajo se plantea la alternativa de contar con otra fuente adicional de suministro de energía eléctrica a las plantas de bombeo.

OBJETIVO:

Analizar la factibilidad de disponer en el corto plazo con una alternativa adicional de suministro de energía eléctrica para aumentar el grado de confiabilidad en la operación del Sistema de Bombeo Cutzamala, y de esta manera, cubrir la eventualidad de no disponer temporalmente de la energía eléctrica proveniente de la subestación Donato Guerra.

CONTENIDO

Índice	4
Prólogo	9
CAPITULO 1	PROBLEMATICA Y ALCANCE.
1.1 Antecedentes	11
1.2 Ruta de solución	13
1.2.2 Opciones de suministro	13
1.2.2 Disciplinas de estudio requeridas	14
1.3 Entidades participantes en el proyecto.....	18
1.4 Herramientas utilizadas para el análisis	18
1.5 Actividades por desarrollar y áreas responsables	19
1.6 Alcance del proyecto a realizar	21
CAPITULO 2	CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN.
2.1 Situación Geográfica	22
2.2 Elementos Constitutivos	24
2.3 Situación Actual	28
2.3.1 Central Ixtapantongo	30
2.3.2 Central Santa Bárbara	31
2.3.3 Central Tingambato	33
2.4 Líneas de transmisión y Subestaciones Reductororas	35
2.5 Características de las protecciones	38

CAPITULO 3 CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA.

3.1 Problemática en el abastecimiento de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México	43
3.2 Descripción General del Sistema Cutzamala	48
3.2.1 Primera etapa	51
3.2.2 Segunda etapa	51
3.3.3 Tercera etapa	52
3.3 Planta Potabilizadora	54
3.4 Obra electromecánica del Sistema Cutzamala	56

CAPITULO 4 ASPECTOS COMPRENDIDOS PARA LA REALIZACION DEL ESTUDIO DE LA ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA AL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA Y PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO.

4.1 Estudios requeridos	59
4.2 Características generales y aplicaciones de simulador de sistemas de potencia (PSS/E)	60
4.2.1 Introducción	60
4.2.2 Características generales del programa PSS/E	60
4.2.3 Aplicaciones principales del programa PSS/E	61
4.3 Conclusiones	65

CAPITULO 5 GENERALIDADES SOBRE EL MOTOR DE INDUCCION Y SU REPRESENTACION EN EL SIMULADOR PSS/E

5.1 Introducción	66
5.2 Componentes básicos del motor de inducción	66
5.3 Principios de operación	70
5.3.1 Motor de corriente alterna	70
5.3.2 Motor de inducción jaula de ardilla	72

5.4	Parámetros usados	73
5.5	Pruebas comerciales aplicadas a un motor de inducción	75
5.6	Circuitos del motor de inducción y diagramas vectoriales	76
5.7	Diagrama circular del motor de inducción	78
5.8	Control del arranque de los motores jaula de ardilla	80
5.8.1	Arranque a tensión plena	81
5.8.2	Arranque a tensión reducida	81
5.9	Protección de los motores de inducción	82
5.10	Modelado del motor de inducción en el PSS/E	84
5.10.1	Obtención de los parámetros indicados en la figura 5.8	86
5.10.2	Comportamiento del motor de inducción	86
5.10.3	Ejemplo de aplicación	88
5.11	Analogía existente entre el motor de inducción y el transformador	93
5.11.1	Circuito equivalente aproximado	94
5.11.2	Circuito equivalente del motor de inducción	96
 CAPITULO 6 ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO EN LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION PARA EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA.		
6.1	Resumen	99
6.1.1	Condiciones normales de operación	102
6.1.2	Condiciones de operación en estado de emergencia	102
6.2	Consideraciones asumidas en los estudios	102
6.3	Desarrollo.....	105
6.3.1	Opción 2. Planta de bombeo PB5 alimentada por la central Geotérmica Los Azufres	105

6.3.2 Opción 3. Suministro eléctrico proporcionado por unidades del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán	105
6.4 Planta de bombeo PB5 alimentada por la Central Geotérmica Los Azufres	105
6.4.1 Considerando la condición de que se disponga del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra	105
6.4.1.1 Condiciones de operación en estado estable	106
6.4.1.2 Comportamiento dinámico	106
6.4.2 Considerando la condición de que no se disponga del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra	107
6.4.2.1 Condiciones de operación en estado estable	107
6.4.2.2 Comportamiento dinámico durante el arranque de los motores de la planta PB5	115
6.5 Suministro eléctrico proporcionado por unidades del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán	121
6.5.1 Considerando la disponibilidad del bus de 115 KV de la S.E. Donato Guerra	121
6.5.1.1 Condiciones de la red de transmisión en estado estable previas al inicio del arranque de los motores del Sistema de Bombeo Cutzamala	121
6.5.1.2 Comportamiento dinámico de la red de transmisión durante el arranque de los motores del Sistema de Bombeo Cutzamala	136
6.5.2 Considerando que no existe disponibilidad física del bus de 115 KV de la S.E. Donato Guerra	150
6.5.2.1 Condiciones de la red de transmisión en estado estable, previas al inicio del arranque de los motores del Sistema de Bombeo Cutzamala	150
6.5.2.2 Comportamiento dinámico de la red de transmisión durante el arranque de los motores de las plantas PB2, PB3 y PB4	158
6.6 Conclusiones.....	168
6.6.1 Particulares de cada caso.....	168

CAPITULO 7 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN CAMPO E INVERSIONES REQUERIDAS

7.1 Actividades para conectar la planta Santa Bárbara, a la red de 115 KV	170
7.1.1 Actividades sin afectar regimen de generación (4 horas)	170
7.1.2 Actividades afectando regimen de generación (2 a 6 horas)	171
7.2 Requerimientos para la conversión de voltaje de 150 KV a 115 KV en Santa Bárbara	172
7.2.1 SE's y LT's	172
7.2.2 Protecciones	172
7.2.3 Generador	172
7.2.4 Transformador	178
7.2.5 Conclusiones	178
7.3 Etapa 1	178
7.3.1 Requerimientos para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán	178
7.3.1.1 Requerimientos para Santa Bárbara e Ixtapantongo	178
7.4 Etapa 2	180
7.4.1 Requerimientos en Santa Bárbara	180
7.4.2 Requerimientos en Ixtapantongo	180
7.4.3 Requerimientos en la central Tingambato	181
7.4.4 Requerimientos en subestación Donato Guerra	182
7.5 Análisis económico de las opciones de suministro	182
7.5.1 Suministro a través de la S.E Agustín Millán II(opción 1)	182
7.6 Inversiones requeridas para adecuar la red eléctrica asociada al SHMA	185
Conclusiones generales	188
Recomendaciones	189
Bibliografía	191

PROLOGO

Todo vive por el agua, los primeros filósofos le dieron un lugar predominante en la formación del mundo junto al fuego, el aire, la tierra. Hoy la ciencia natural confirma que la vida brotó del agua. Todo puede morir también por el agua : cuando arroya, inunda, ahoga y sobre todo cuando falta .

En el presente los habitantes de la zona metropolitana de la Ciudad de México viven su más grande reto frente a la naturaleza, para encontrar la forma de lograr que este elemento que se antoja imprecadero, eterno, no falte ante el crecimiento de la población.

Para ello ha sido necesario buscar y conducir el recurso de más allá de las fronteras del propio Valle, pues la solución al abastecimiento perforando pozos en los acuíferos locales, desde hace mucho tiempo dejó de serlo, para convertirse en un grave problema al provocar el hundimiento de la Ciudad con los consiguientes efectos negativos en las estructuras y calidad del agua.

Hoy en día la Comisión Nacional de Agua (CNA), realiza la mayor y más compleja obra de captación y potabilización : el Sistema Cutzamala, cuya finalidad es introducir a la zona metropolitana de la Ciudad de México 19 m^3 por segundo, para beneficiar a sus millones de habitantes.

Su concepción, desarrollo técnico y realización, han implicado enormes esfuerzos de quienes en él han participado y desde luego ha significado un gran reto para la ingeniería mexicana.

Las inversiones en el Sistema Cutzamala han sido cuantiosas, pero más costoso sería para la Nación dejar extinguir, por la carencia del vital líquido, la Ciudad que ha sido esencia de la cultura nacional y hoy por hoy el centro motor del país.

Independientemente de los componentes extranjeros de importación directa como motores, válvulas esféricas y algunos accesorios electromecánicos de las plantas de bombeo que sólo representan el 5% de la inversión; los estudios, proyectos, obras materiales que ha requerido la ejecución del Sistema Cutzamala, son el resultado de la tecnología nacional en donde la participación de instituciones públicas y empresas nacionales junto con el esfuerzo compartido de profesionales, técnicos y obreros mexicanos, han hecho posible esta magna realización de gran trascendencia y sentido social para ésta y futuras generaciones .

El Sistema de Bombeo Cutzamala está integrado por seis plantas de bombeo de las cuales cinco se encuentran actualmente en funcionamiento. En éstas se cuenta con motores de inducción de hasta 22 000 HP. El aspecto eléctrico es importante, ya que por medio de él se provee de la energía eléctrica necesaria a todas las plantas de bombeo de este sistema.

En este trabajo se involucra la aplicación de estudios técnicos modernos de análisis para determinar la solución óptima de suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala. Estudios realizados por personal altamente capacitado que día con día incrementa su desarrollo profesional dando solución a problemas relacionados con la ingeniería eléctrica. La tesis fué realizada en la Unidad de Ingeniería Especializada de la Comisión Federal de Electricidad, utilizando la información del proyecto realizado, en el que tuve la oportunidad de colaborar.

El presente trabajo está constituido por siete capítulos en los cuales se hace una descripción detallada de los aspectos técnicos que son necesarios analizar. Se incluyen también, conclusiones y recomendaciones para la solución del problema planteado. A continuación se indica brevemente el contenido de cada capítulo:

En el capítulo 1 se hace mención de la problemática actual existente en el Sistema de Bombeo Cutzamala. Así también se analizan las diferentes opciones que podrían solucionar el problema planteado.

En el capítulo 2 se hace referencia a las características generales del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán debido a que, por su cercanía con la red del Sistema de Bombeo, se considera como opción para solucionar el presente problema.

En el capítulo 3 se proporciona la información correspondiente al Sistema de Bombeo Cutzamala: trayectoria del agua para su conducción a la zona metropolitana de la Ciudad de México, plantas de bombeo que lo conforman, obra electromecánica, planta potabilizadora, etcétera.

En el capítulo 4 se hace referencia al programa digital utilizado, herramienta útil para el análisis y simulación del arranque de los motores instalados en el Sistema de Bombeo Cutzamala; procedimiento considerado como indicado para el estudio del presente problema .

En el capítulo 5 se contemplan algunas generalidades sobre los motores de inducción, así como su representación y simulación en el programa digital utilizado. Este tipo de motores son los que se encuentran instalados en el Sistema de Bombeo Cutzamala.

En el capítulo 6, se realiza el estudio del comportamiento dinámico de los motores de inducción en cada una de las opciones consideradas. Este capítulo representa la parte principal de este trabajo. Se determinan los requerimientos para el arranque exitoso de los motores.

El capítulo 7 proporciona información relacionada con las actividades realizadas en campo así como el análisis económico para la implantación de la alternativa alterna de suministro eléctrico al Sistema de Bombeo Cutzamala. También se contemplan las conclusiones y recomendaciones para una adecuada secuencia de operación de los motores instalados en este sistema, ante una condición de emergencia.

CAPITULO I

PROBLEMATICA Y ALCANCE

1.1 ANTECEDENTES.

La subestación Donato Guerra fué concebida con el propósito fundamental de suministrar energía eléctrica a las plantas de bombeo del Sistema Cutzamala, tal y como se muestra en el diagrama 1.1. Cuenta con una relación de transformación de 400/115 kV con líneas de transmisión de doble circuito a los motores que se encuentran en las plantas de bombeo. En la figura 1.1 se ilustra el esquema de la red integral del Sistema Cutzamala.

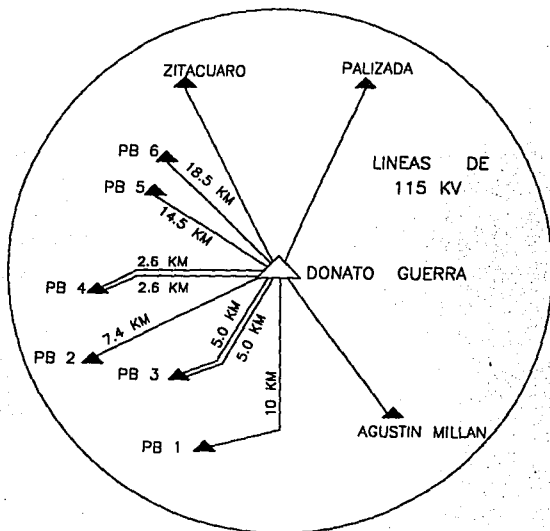


Diagrama 1.1

SISTEMA CUTZAMALA
RED INTEGRAL DE DOMINIO DE AGUA POTABLE

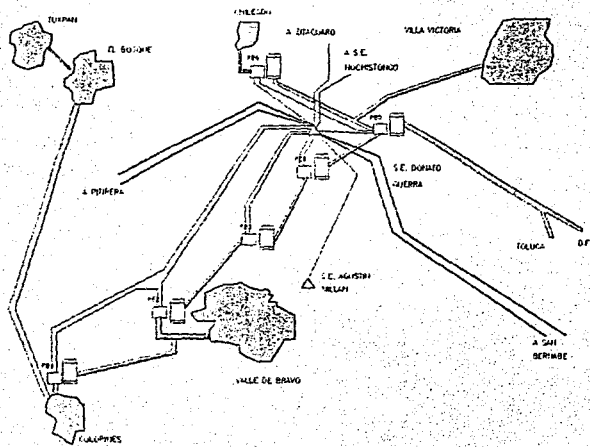


FIGURA 1.1

Aunque el Sistema tiene una fuente de alimentación con suficiente capacidad, tiene la desventaja de no contar con otra fuente de suministro alterna en caso de que ocurra una eventualidad en la subestación Donato Guerra.

Este planteamiento reviste gran importancia, pues de suceder algún evento extraordinario en la subestación Donato Guerra se perdería el suministro de energía al Sistema Cutzamala. Las consecuencias que tendría la interrupción de energía eléctrica por un periodo mayor de 24 horas del abastecimiento de agua potable al área metropolitana de la Ciudad de México repercutiría en graves problemas de tipo social, económico y de salud para los habitantes de esta Ciudad .

Es por ello la necesidad de realizar un proyecto que permita contar con una opción alterna de suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala.

1.2 RUTA DE SOLUCION.

Se tienen en específico tres opciones para tratar de resolver la problemática arriba planteada que son:

1.2.1 OPCIONES DE SUMISTRO ELECTRICO PARA EL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA.

Considerando la infraestructura existente en la región tanto de generación como de transmisión, los tiempos involucrados, volumen de obra e inversiones requeridas, después de un análisis se decidió centrar la atención en las opciones de suministro de energía eléctrica siguientes:

1a. opción Suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala a partir de la S.E Agustín Millán II con relación de transformación 150/115 kV y 225 MVA de capacidad. Esta obra esta considerada en el POISE para el año 1996.

2a. opción Suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala a partir de la planta geotérmica los Azufres y/o de la S.E Nochistongo (suministro parcial a la planta de bombeo No. 5)

Esta opción es la que de acuerdo con la infraestructura de la red de transmisión puede ser llevada a la practica de inmediato.

3a. opción Suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala operando el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán de 150 a 115 kV de manera permanente.

La primera opción nos resolvería el problema en el largo plazo. Volviendo a nuestro objetivo, esta opción queda descartada ya que se debe dar solución en el corto plazo, es decir, para su disposición en caso de emergencia.

La fuente de suministro de energía eléctrica que se considera como alternativa en este estudio, está conformada por las unidades generadoras del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán por su red de transmisión asociada interconectada con las plantas de bombeo y de la planta geotérmica los Azufres. Ambas alternativas se estudiarán por separado, para fines de análisis.

Lo anterior implica la interconexión del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y de la central geotérmica los Azufres con la red asociada a las plantas de bombeo del Sistema de Bombeo Cutzamala. En el diagrama 1.2 se presenta la red actual y en el diagrama 1.3 el propuesto.

Como se mencionó anteriormente, el SHMA opera a tensión normal de 150 kV y el Sistema de Bombeo Cutzamala opera a tensión normal de 115 kV. Por lo anterior, se ha propuesto como alternativa de solución, operar las plantas del Sistema Miguel Alemán a tensión de 150 kV a la tensión más cercana posible a 115 kV por medio del movimiento del tap de los transformadores elevadores de las plantas generadoras así como del voltaje de generación de las mismas.

El análisis por realizar requiere de la participación de diferentes disciplinas de estudio, como son:

1.2.2 DISCIPLINAS DE ESTUDIO REQUERIDAS.

- a) Distribución de la potencia activa, reactiva y control de voltaje en el estado de operación normal y contingente en las redes eléctricas de transmisión, subtransmisión y distribución, asociadas en el área de interés.
- b) Análisis de la dinámica y secuencia de operación del arranque de los motores del sistema de bombeo.
- c) Análisis de la secuencia de maniobras, flexibilidad y seguridad del sistema eléctrico bajo diferentes condiciones de operación.
- d) Determinación de las modificaciones requeridas en el sistema eléctrico.
- e) Análisis del comportamiento electromecánico de las unidades de generación hidroeléctrica bajo las diferentes condiciones de operación requeridas: a voltaje reducido, en el corto plazo y régimen permanente.
- f) Determinación de los esquemas de control, comunicaciones y protección de las instalaciones, para las condiciones de operación requeridas.

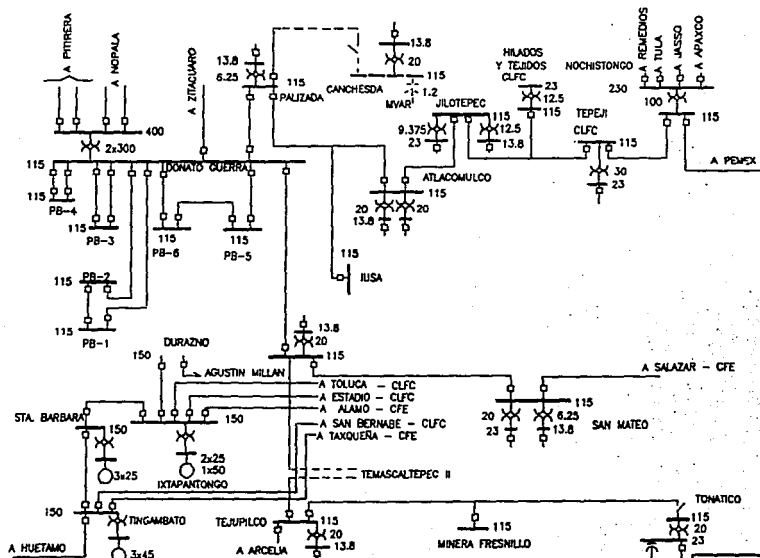


Diagrama Unifilar 1.2

TESIS

Realizó: V.Torres

Revisó: Ing.A.Grande

Revisó: Ing.E.Corona

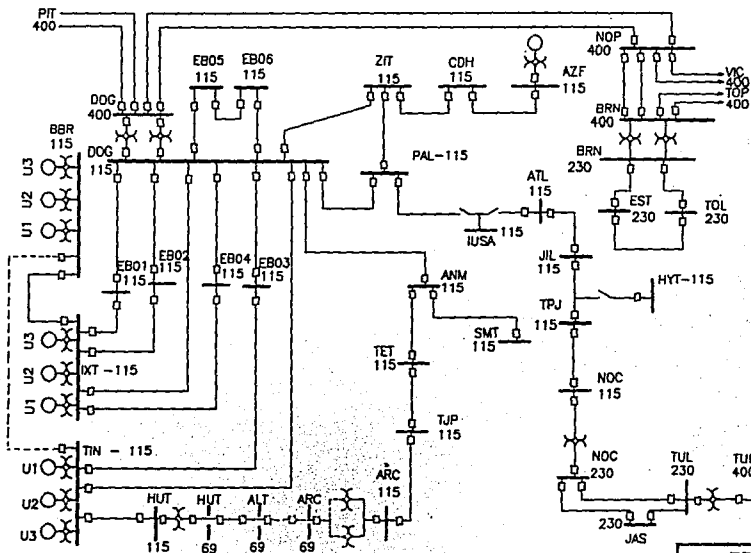


Diagrama Unifilar 1.3

TESIS	
Realizd:	V.Torres
Revisd:	Ing.A.Grande Ing.E.Carona

Por otra parte, es conveniente puntualizar que el POISE* contempla una solución alternativa para el año de 1996 por medio de la S.E. Agustín Millán II con una relación de transformación de 150/115 kV y 225 MVA que nos permitiría suministrar energía eléctrica alterna al Sistema Cutzamala y a la subestación Donato Guerra proveniente del Sistema Miguel Alemán.

Aunque esta obra nos resuelve el problema en un periodo de mediano plazo, el proyecto de operar las unidades del SHMA a tensión aproximada a 115 kV, resulta muy atractivo económicamente ya que de ser posible su operación en las condiciones expuestas, daría la oportunidad de prescindir de la subestación Agustín Millán II, representando un beneficio considerable para la C.F.E.

Como se mencionó anteriormente la opción que se considera más viable por sus características geográficas y económicas, es la referente a la interconexión del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán con el Sistema de Bombeo Cutzamala. Para darnos una idea de las características de funcionamiento del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, es necesario hacer una descripción del mismo. En el siguiente capítulo se proporciona la información necesaria referente al Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Las unidades del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán disponen de transformadores con una relación de 138/150 kV. La red del sistema de bombeo opera en el nivel de voltaje de 115 kV, lo cual representa el primer inconveniente de enlazar el Sistema de Bombeo Cutzamala con el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. Ante tal situación se propuso el siguiente procedimiento para solucionar el presente problema.

- a) Movimiento de los cambiadores de tap's en los transformadores de las unidades del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, de 150/138.75 kV, con lo cual aún estamos excedidos en voltaje.
- b) En el momento de sincronizar la red de 115 kV, operar a voltaje de generación de 0.85 p.u con lo cual lograríamos un voltaje de alrededor de 120 kV en el secundario del transformador.
- c) Analizar si los motores de Sistema de Bombeo arrancan satisfactoriamente con la red de transmisión propuesta en condiciones de emergencia.
- d) Analizar operación adecuada (sin problema) de las unidades del Sistema Miguel Alemán considerando que su voltaje de generación estaría ajustado a 0.90 p.u de manera permanente.
- e) Validar lo anterior con estudios y pruebas de campo.

* Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico.

1.3 ENTIDADES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO.

De acuerdo con el interés, la naturaleza del proyecto y de los estudios a desarrollar para definir la mejor estrategia de operación en el corto y largo plazo, se requiere la colaboración de las entidades siguientes:

- a) Area de Transmisión, Transformación y Control Central.*
- b) Gerencia de Protecciones, Comunicaciones y Control.*
- c) Subarea de control Colorines.*
- d) Región de Generación Hidroeléctrica Ixtapantongo.*
- e) División de Distribución Centro Sur.*
- f) Unidad de Ingeniería Especializada.*
- g) Gerencia de programación de Sistemas Eléctricos.*
- h) Subgerencia de Operación Sistema Cutzamala.*

1.4 HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA EL ANALISIS.

Una vez establecida la ruta de trabajos, a partir de la información obtenida en campo y de la proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, se procedió a formar los archivos de datos correspondientes a la red de transmisión y de motores del Sistema de Bombeo Cutzamala. Los estudios se efectuaron con herramientas de cálculo, siendo la principal el Simulador de Sistemas Eléctricos de Potencia: PSS/E (Power System Simulator for Engineers).

Los aspectos involucrados por estudiar mediante la simulación, se enuncian como:

- Modelado del motor de inducción.*
- Arranque del motor de inducción, considerando parámetros reales y curvas de los fabricantes.*
- Cálculo de líneas (parámetros de líneas).*
- Modelado del generador.*
- Modelado del regulador de voltaje.*

- *Condiciones de demanda máxima, mínima, media.*
- *Estudios de dinámica .*
- *Cálculo de valores de corto circuito, para revisión de capacidades interruptivas.*

1.5 ACTIVIDADES POR DESARROLLAR Y AREAS RESPONSABLES.

- 1.- Descripción funcional y estado actual de las instalaciones del Sistema Cutzamala para el Bombeo de Agua Potable a la Cd. de México.
Responsable: Subgerencia de Operación Sistema Cutzamala.
- 2.- Descripción del sistema eléctrico actual para el suministro de energía eléctrica al Sistema Cutzamala.
Responsable: Area de Transmisión, Transformación y Central.
- 3.- Descripción funcional y estado actual de las instalaciones del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.
Responsable: Subgerencia de generación Hidroeléctrica Ixtapantongo.
- 4.- Descripción funcional de la operación integrada del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y del Sistema Cutzamala.
Responsable: Subarea de Colorines.
- 5.- Estudio del comportamiento del sistema eléctrico de la región, transmisión, subtransmisión y distribución, para las diferentes condiciones en operación, en estado estable, bajo condición normal y de contingencia.
Responsable: Gerencia de Programación de Sistemas Eléctricos.
- 6.- Estudio del comportamiento dinámico en las diferentes condiciones de operación para el arranque de los motores de las estaciones de bombeo del Sistema Cutzamala
Responsable: Unidad de Ingeniería Especializada.
- 7.- Determinación de las obras e inversiones requeridas para llevar a cabo en su caso, la construcción, modificación y/o rehabilitación de la red de transmisión asociada a cada una de las opciones bajo estudio.
Responsable: Area de Transmisión y Transformación Central.
- 8.- Determinación de las obras, equipo e inversiones requeridas para llevar a cabo la operación a 115 kV de Sistema de generación Hidroeléctrico Miguel Alemán.
Responsable: Subgerencia de Generación Hidroeléctrica Ixtapantongo.
- 9.-Determinación de las obras, equipos, materiales e inversiones asociadas a las protecciones, comunicaciones y control de las opciones bajo estudio.

- 10.- **Análisis del comportamiento Electromecánico de las unidades de generación del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán operando en 115 kV para la condición de pruebas, régimen de corto plazo y permanente de operación.**
Responsable: Subgerencia de generación Hidroeléctrica Ixtapantongo.
Subarea de control Colorines.
Area de Transformación, Transmisión y Control Central.
Unidad de Ingeniería Especializada.
Gerencia de Protecciones, Comunicaciones y Control.
- 11.- **Definición de los procedimientos de operación en las diferentes opciones bajo estudio. Se consideran procedimientos de operación en estado normal y en estado de emergencia.**
- 12.- **Definición del procedimiento y/o políticas de la operación integral del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y el Sistema de Bombeo Cutzamala para las diferentes condiciones de operación: normal y de emergencia.**
Responsable: Subarea de Control Colorines.
- 13.- **Determinación de las obras, equipo, materiales e inversión para llevar a cabo, la conversión de voltaje de operación de 150 a 115 kV y del esquema de compensación en la red de distribución.**
- 14.- **Coordinación del proyecto y Reporte Ejecutivo del mismo.**
Responsable: Gerencia de programación de Sistemas Eléctricos.

1.6 ALCANCE DEL PROYECTO A REALIZAR.

De acuerdo con la complejidad del proyecto y la de los estudios a desarrollar, para definir la mejor estrategia de operación del Sistema Cutzamala en un caso de emergencia, como se mencionó anteriormente, se requirió de la participación de diversas entidades de la Comisión Federal de Electricidad.

Después de haber establecido la opción más viable, se procedió al estudio del comportamiento dinámico de los motores durante la etapa de arranque, considerando que los motores de inducción del Sistema de Bombeo Cutzamala son el elemento a energizar a través de la nueva opción y de esta manera verificar su correcto funcionamiento.

Precisamente, el estudio del comportamiento dinámico de los motores de inducción instalados en el Sistema de Bombeo Cutzamala, es el que merece mayor atención, por lo que se hace necesario profundizar en las características de operación de los mismos al utilizar la 2da. y 3er. opciones.

Como en todo proyecto, se debe cuidar el rubro económico, el Sistema de Bombeo Cutzamala deberá permanecer con cambios mínimos en su constitución al operar ante la nueva alternativa, es por esto que se deben emplear los recursos existentes, tanto por parte de CFE como de CNA. El primero proporcionando la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los motores y el segundo proveyendo el vital líquido a la zona metropolitana de la Ciudad de México, sin interrupción ante la emergencia existente.

En el capítulo 6 se reportan los resultados de estado estable y dinámico obtenidos al haber realizado el estudio de los motores tomando en cuenta que el Sistema Cutzamala está siendo alimentado por las opciones seleccionadas.

CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN

2.1 SITUACION GEOGRAFICA

Por los años de 1930 a 1938 se presentaron deficiencias muy serias en el suministro de energía eléctrica para la Ciudad de México y zonas circunvecinas, que dieron motivo a preocupación por parte de los principales consumidores y del gobierno para encontrar la forma de obtener fuentes de energía capaces de hacer frente a la demanda que se sentía crecer cada vez con más intensidad.

Esa situación fué la que en realidad dió origen a la C.F.E , cuyo director, en el año de 1937, encontró muy ventajosos para resolver esa crisis, los recursos hidroeléctricos del río Tlilostoc, después de haber estudiado las posibilidades que ofrecían el río Balsas y el río Acapulco, entre otros que también fueron estudiados entonces.

Entre 1938 y 1944 se construyeron todas las obras y se instalaron los equipos requeridos para poner en funcionamiento la primera unidad en Ixtapantongo.

Este Sistema está ubicado en la zona Noroeste del Estado de México y se encuentra integrado por seis plantas ubicadas de manera escalonada. Estas plantas son fuente de energía eléctrica destinada a satisfacer las necesidades de la ciudad de México y Entidades Federativas circunvecinas al Sistema (80 y 170 MW, respectivamente)

En este Sistema se aprovecha la corriente de los ríos Malacatepec, Valle de Bravo e Ixtapan del Oro, todos pertenecientes al Estado de México y los ríos Tuxpan y Zitácuaro, del Estado de Michoacán. Los ríos mencionados son afluentes del Cutzamala, que a su vez lo es del río Balsas.

El notable desarrollo industrial del Valle de México en los últimos años, se debe en buena parte, a la energía generada en el Sistema Miguel Alemán, que ha contribuido a suministrar energía abundante y barata a la zona central del país. En la figura 2.1 se muestra la situación geográfica de este Sistema.

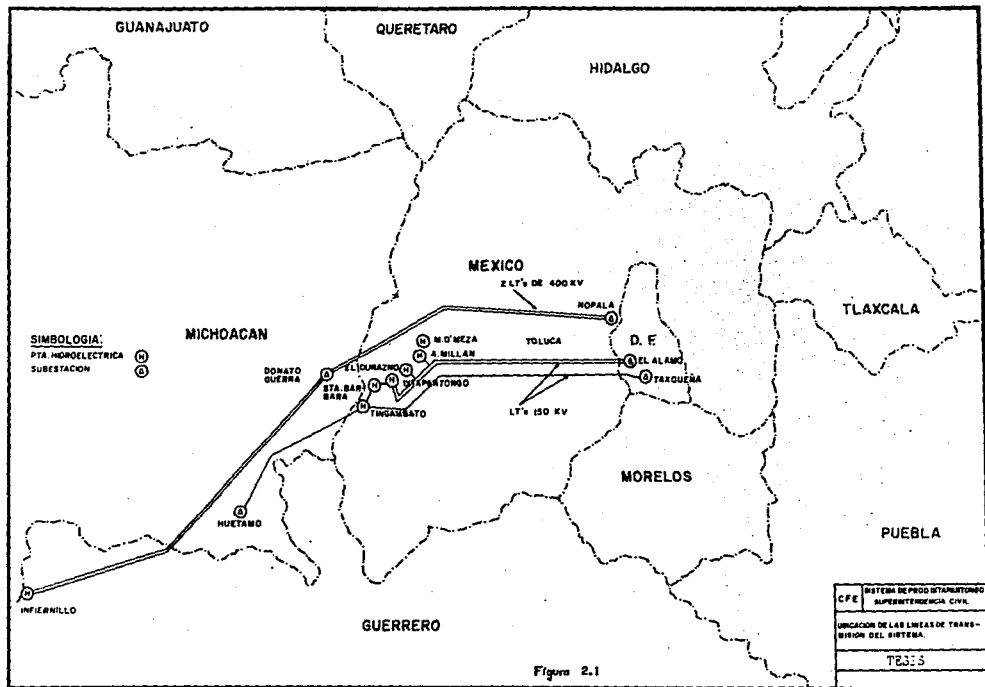


Figura 2.1

2.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

Para el aprovechamiento de las aguas de estos ríos se han construido diversas obras que en forma general se pueden citar como sigue:

Presa Villa Victoria .- Ubicada en el río Malacatepec a una altitud de 2 605 m.s.n.m. Almacenamiento de $210 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cortina de tipo gravedad de mampostería y tierra con altura de 18 m. La obra de toma fué diseñada para una capacidad de $9 \text{ m}^3/\text{seg.}$, es de concreto reforzado y mampostería. El agua es conducida para su aprovechamiento a las plantas de Ing. Héctor Martínez D'Meza y Agustín Millán.



Figura 2.2 Presa Villa Victoria.

Planta Ing. Héctor Martínez D'Meza: carga neta de 376 m, 1 turbina tipo Peltón con seis toberas potencia de 39000 CV, 428 rpm, y caudal de $8.80 \text{ m}^3/\text{seg.}$, generador de eje vertical, capacidad de 25500 kW, tensión de 13.2 kV, factor de potencia de 0.90 y frecuencia de 60 c/seg., la subestación en el exterior de la casa de máquinas tiene tres transformadores monofásicos de 9 333 KVA.

Planta Agustín Millán: carga neta 268 m, 1 turbina tipo Francis, con potencia de 30 700 CV 600 rpm y caudal de $8 \text{ m}^3/\text{seg.}$, generador de eje vertical con capacidad de 18 900 kW Tensión de 13.8 kV, factor de potencia de 0.90 y frecuencia de 60 c/seg.

Presa Valle de Bravo.- Ubicada sobre el río del mismo nombre a una altitud de 1830m.s.n.m Almacenamiento de $400 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cortina de 48 m. de altura, de enrocamiento con corazón impermeable, longitud en la corona de 148 m., en la construcción de esta obra fueron utilizados $170\,000 \text{ m}^3$ de enrocamiento y $125\,000 \text{ m}^3$ de arcilla compactada. La obra de toma fue diseñada para una capacidad de $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$ consta de una torre de concreto de 45 m. de altura tipo canal, lateral, revestido de concreto reforzado, con una longitud de corona de 94.4m y capacidad para un gasto de $1200 \text{ m}^3/\text{seg.}$ descarga al río Tilostoc.



Figura 2.3 Presa Valle de Bravo.

El agua es conducida para su aprovechamiento a la planta El Durazno, cuyas características son las siguientes: Carga neta de 105 m., 2 turbinas tipo Francis, con potencia de $30\,420 \text{ CV c/u}$, dos generadores de eje vertical, con capacidad de $9\,000 \text{ kW c/u}$, tensión de 13.2 kV, factor de potencia de 0.90 y frecuencia de 60 c/seg. total de capacidad instalada 18 000 KW.

Presa Tilostoc.- Ubicada en la confluencia de los ríos Malacatepec y Valle de Bravo (Formadores del Tilostoc) con almacenamiento de $14 \times 10^6 \text{ m}^3$, cortina de 20 m. de altura y mampostería, con detellón y revestimiento de concreto. Vertedor con capacidad de $900 \text{ m}^3/\text{seg.}$ Esta presa tiene por objeto regularizar y decantar las aguas de la cuenca libre del río Malacatepec, disminuyendo la acumulación de azolve en los vasos aguas abajo de Colorines, Ixtapantongo, Santo Tomás y Pinzanes.

Presa Tuxpan. - Ubicada sobre el rio del mismo nombre en el estado de Michoacán. Almacenamiento de $20 \times 10^6 \text{m}^3$ a una altitud de 1 765 m.s.n.m. Cortina con corazón de arcilla compactada y enrocamiento en ambos lados, altura de 22 m. y longitud en la corona de 589 m. Vertedor con capacidad para $1000 \text{m}^3/\text{seg}$. Las aguas de este vaso son llevada hasta la presa El Bosque.

Presa El Bosque . - Ubicada sobre el río Zitácuaro en el Estado de Michoacán. Cortina de enrocamiento y corazón de arcilla compactada, con filtros de grava y arena, detellón de concreto reforzado; tiene una altura de 70 m. en su zona más profunda y una longitud en la corona de 600m. Capacidad de almacenamiento de $220 \times 10^6 \text{m}^3$. Vertedor con capacidad de $1000 \text{m}^3/\text{seg}$. Las aguas de esta presa son llevadas al vaso regulador de Colorines. Esta presa tuvo serios problemas producidos por la filtración en ambas márgenes. En el año de 1958, con el embalse en la cota 1739.8, el gasto máximo por filtración alcanzó $10 \text{m}^3/\text{seg}$ aproximadamente. La solución del problema permitió reducir las filtraciones a $4 \text{m}^3/\text{seg}$., con el agua a la misma elevación. Este resultado se logró por medio de una pantalla de inyecciones de $110\ 000 \text{m}^3$, $60\ 000 \text{m}$ de longitud de perforación y $35\ 000$ toneladas de productos de inyección. La pantalla se realizó en dos años .

Presa Colorines . - Presa reguladora con capacidad de almacenamiento $2 \times 10^6 \text{m}^3$ a una altitud de 1676 m.s.n.m., cortina de enrocamiento, con pantalla de concreto aguas arriba. Este vaso recibe las aguas de las presas Valle de Bravo, Tilostoc y El Bosque. De este vaso el agua es conducida para su aprovechamiento a la planta Ixtapantongo cuyas características son las siguientes :

Presa Ixtapantongo. - Almacenamiento de $1.9 \times 10^6 \text{m}^3$. Cortina de enrocamiento de 28 m. de altura, con pantalla impermeable de concreto reforzado. Vertedor de demasías con una capacidad de 800m^3 .

		<u>Unidades 1 y 2</u>	<u>Unidad 3</u>
Turbinas .-	Tipo	Francis	Francis
	Eje	Vertical	Vertical
	potencia	39 000 HP	69 500 HP
	Velocidad	600 rpm	500 rpm
Generadores .-	Eje	Vertical	Vertical
	Potencia	28000kW	50000kW
	FP	0.90	0.90
	Voltaje	13.2 kV	13.2kV
	Fases	3	3
	Ciclos/seg.	60	60

La carga neta, para las turbinas, es de 328 m. La capacidad total instalada es de 106 000 KW.

De este vaso las aguas son conducidas para su aprovechamiento a la planta de Santa Bárbara cuyas características son las siguientes: Carga neta de 246.3 m, 3 turbinas tipo Francis, con potencia de 33000 HP c/u, caudal de 11.5 m³/seg. y velocidad de 500 rpm, tres generadores de eje vertical con capacidad de 22 525 kW c/u, tensión de 13.8 kV, factor de potencia de 0.85 y frecuencia de 60 c/seg. La capacidad total instalada es de 67 575 kW.

Presa Santo Tomás. - Esta presa sirve de regularizadora principal, pues además de recibir las aguas ya reguladas que salen de la planta Santa Bárbara, se controlan totalmente las aguas de río Ixtapan del Oro que se reúne al Tilostoc precisamente en el extremo aguas arriba del vaso formado. La cortina es del tipo de enrocamiento con corazón impermeable y transiciones de grava y arena, altura de 52 m. ancho y longitud de la corona, 10m y 140m respectivamente. Las aguas de esta presa son llevadas a la presa de los Pinzanes .

Presa de Los Pinzanes .- Capacidad de almacenamiento total de 4.06 x 10⁶m³. La presa esta formada por una cortina tipo enrocamiento colocada a volteo con una pantalla impermeable, agua arriba, formada por una losa de concreto reforzado y otra de concreto asfáltico. El volumen total de la cortina fué de 308 000 m³, de los cuales 303 000 m³ son de enrocamiento. La capacidad de la obra de excedencia es de 50m³/seg. Las aguas de esta presa son llevadas para su aprovechamiento a la planta Tingambato, cuyas características son las siguientes: 3 turbinas tipo Francis con una potencia de 72 000 HP c/u , con una velocidad de 600/720 rpm ,carga estática de 380m. y un gasto de diseño de 15.7 m³/seg. Generadores: 3 unidades de eje vertical con una capacidad de 50 000 KVA c/u, con un factor de potencia de 0.9, tensión de 13.2 kV entre fases y una frecuencia de 60 c/seg. La capacidad total instalada es de 135 MW.

Capacidad total instalada del Sistema:

<u>Planta</u>	<u>Capacidad Instalada.</u>
Ing. Héctor Martínez D'Meza	25 200 KW
Agustín Millán	18 900 KW
El Durazno	18 000 KW
Ixtapantongo	106 000 KW
Santa Bárbara	67 575 KW
Tingambato	135 000 KW
TOTAL:	370 675 KW

2.3 SITUACION ACTUAL

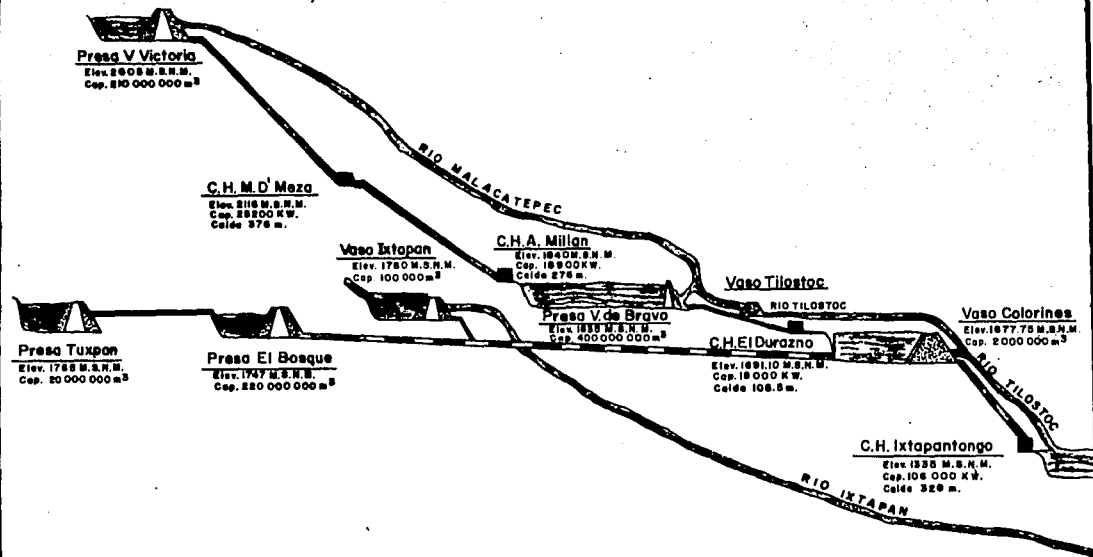
Originalmente, como se ha señalado hasta aquí, el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, esta integrado por seis plantas generadoras, las tres de menor capacidad (Martínez D'Meza, Agustín Millán y El Durazno), están paradas y sin generación desde 1981; y la central Durazno desde 1984, debido a la entrega, por parte de la Comisión Federal de Electricidad, del agua de las presas Villa Victoria ($220 \times 10^6 \text{m}^3$) y Valle de Bravo ($400 \times 10^6 \text{m}^3$) a la S.A.R.H (plan Cutzamala) para bombeo a la Ciudad de México, estas mismas centrales están sin personal y cerradas, vigiladas en visitas frecuentes por personal del Sistema .

Las restantes tres centrales se encuentran en operación y generan dos turnos por día; quedando eliminado y sin generación el turno nocturno. El agua utilizada para la generación del Sistema (Centrales Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato) proviene principalmente de la presa El Bosque, con una capacidad de $202 \times 10^6 \text{m}^3$ más los afluentes naturales río Ixtapan (con promedio anual de $1.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$) y río Tilostoc (con promedio anual de $2.5 \text{ m}^3/\text{seg.}$); todos estos gastos confluyen al vaso regulador de Colorines, aprovechándose desde este punto para generación en cascada de las centrales.

En la figura 2.4 se puede observar el esquema hidráulico del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán .

La operación y mantenimiento del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán se encuentra a cargo de un grupo de ingenieros y técnicos que atienden las áreas mecánica, eléctrica y civil, empleando unos 145 trabajadores para el área de operación y 230 para la de mantenimiento. En el área de servicios y apoyo se cuenta con 161 trabajadores que cubren las necesidades administrativas del Sistema.

Fundamentalmente en el funcionamiento de este Sistema, es el departamento de Control Central, el que realiza las funciones de un despacho de carga local, tales como la planeación y programación a nivel local de los regimenes de generación, llenado y vaciado de almacenamientos, recibe y transmite toda la información de operación de/o hacia las centrales hidroeléctricas, además, de ser el principal enlace entre el Sistema Miguel Alemán y la región de generación hidroeléctrica Ixtapantongo.



ABREVIATURAS

V. R. VASO REGULADOR
C. H. CENTRAL HIDROELECTRICA

Esquema Hidráulico

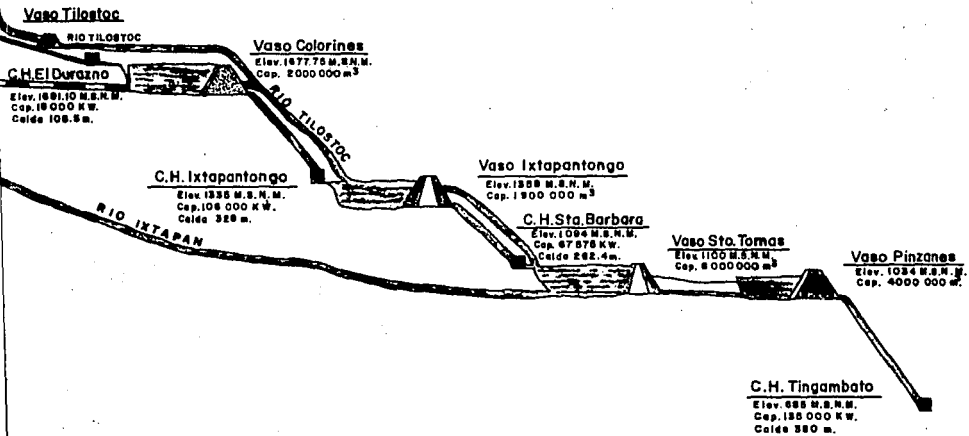


Figura 2.4

2.3.1 CENTRAL IXTAPANTONGO.

La central Ixtapantongo esta formada por dos grupos de 28000 KW cada uno, y un tercer grupo de 45000 KW haciendo un total de 101 000 KW.

Las turbinas hidráulicas de los dos primeros grupos son del tipo Francis de eje vertical de una potencia nominal de 39540 CV, con un caída neta de diseño de 313.4 m. a 600 rpm y fueron fabricadas por The Baldwin Locomotive Works de Eddystone, Pa. están acopladas directamente a alternadores Westinghouse de 31000 KVA, 0.85 F.P, 13.8 KV con excitatrices principal y auxiliar sobre la misma flecha.

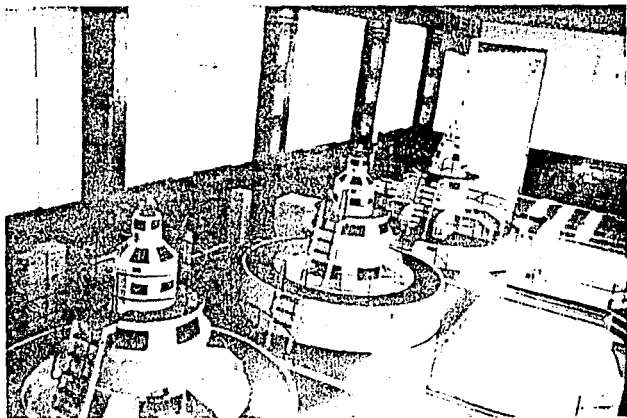


Figura 2.5 Unidades Generadoras de Ixtapantongo.

El tercer grupo lo constituye una turbina Voith de 76 000 CV y 500 rpm, de eje vertical que impulsa un generador Oerlikon de 50 000 KVA, 0.90 F.P y 13.8 KV, también con excitatrices sobre la misma flecha.

Las válvulas principales de los grupos 1 y 2 que conectan las tuberías de presión con los caracoles de las turbinas son del tipo de mariposa operadas por servomotores de aceite a presión. La válvula de la turbina número tres, es del tipo esférico con objeto de reducir a valores aceptables.

Para evitar la sobrepresión en las tuberías y la sobrevelocidad en las unidades generadoras, se instalaron reguladores de presión (válvulas de alivio) conectadas directamente a los caracoles y operadas por los mecanismos de regulación de velocidad de las turbinas.

Cada uno de los grupos generadores de Ixtapantongo está conectado directamente a su respectivo banco de transformación en lo que ha dado en llamarse arreglo unitario. La línea eléctrica entre los grupos generadores se hace por tanto en alta tensión (150 KV) sin ninguna interconexión a la tensión de generación. Este arreglo presenta las ventajas de una mayor economía y simplicidad de la instalación cuando, como en el caso del Sistema Miguel Alemán, la mayor parte de la potencia tiene que enviarse a grandes distancias, es decir transformarse a una tensión elevada para su transmisión.

Con este arreglo unitario se ha evitado el uso de interruptores de gran capacidad de desconexión al voltaje de generación, así como las barras, reactores, desconectoras, cables, etc, que son necesarias cuando no se usa la conexión unitaria, aparatos que por regla general deben instalarse dentro de la casa de máquinas. Tiene el inconveniente de que complica las tomas de energía para usos propios y servicios locales a tensión de generación, pero este inconveniente es de menor importancia en comparación con sus ventajas.

2.3.2 CENTRAL SANTA BARBARA.

La planta de Santa Bárbara esta inmediatamente aguas abajo de la planta de Ixtapantongo. Las turbinas de los tres grupos son idénticas entre sí, contruidas por la casa Allis Chalmers para una caída útil de 246.3 m. y para desarrollar una potencia de 33458CV, son del tipo de reacción, de eje vertical, de construcción similar a las unidades 1 y 2 de Ixtapantongo, de las que difieren en que los sellos de agua (prensa estopas) son de anillos de carbón, las válvulas principales de admisión son operadas eléctricamente, y en que carecen de reguladores de presión, que no fue necesario instalar debido a la longitud, relativamente corta, de las tuberías de presión.

Los alternadores de la marca Westinghouse, pueden suministrar 26 500 KVA, con un sobrecalentamiento de 60° C, y hasta 31 500 KVA con sobrecalentamiento de 80° C, lo que es admisible para el aislamiento tipo B con el que están contruidos los devanados de estos alternadores.

Esta doble designación de la potencia de los generadores con aislamiento clase B, se aprovechó en Santa Bárbara para proporcionar en forma más adecuada la potencia de los alternadores a la de las turbinas que los impulsan, como consecuencia de la experiencia con la primera unidad de Ixtapantongo, en la que se observó que el generador tiene una capacidad de generación que excede a la de su turbina.

Con Santa Bárbara se inició en el Sistema Miguel Alemán, el uso de charolas de asbesto-cemento para soportar los cables de control dentro de la casa de máquinas, procurando reducir a un mínimo la instalación de cables de control en canalizaciones con tubo conduit. Los cables principales que soportan la energía de los generadores a los transformadores elevadores, están alojados en un túnel que llega hasta los terrenos de la subestación. Están soportados en estructuras sencillas de acero angular con algunos miembros de latón con objeto de evitar el efecto magnético causado por la corriente en los cables. Este fenómeno magnético se observó en las estructuras soporte de Ixtapantongo, y aunque el calor generado no pone en peligro el aislamiento de los cables, se consideró conveniente evitarlo en Santa Bárbara.

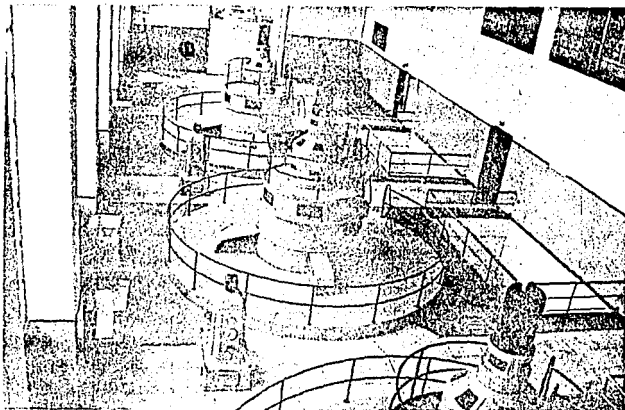


Figura 2.6 Unidades generadoras de Santa Bárbara

2.3.3 CENTRAL TINGAMBATO.

Tingambato tiene tres unidades generadoras de 45 000 KW cada una, en total 135000KW, lo que la hace la más grande central del Sistema. Se trata de una planta en caverna (subterránea) razón por la cual sus instalaciones eléctricas y mecánicas difieren marcadamente de las que se han hecho en otras plantas del Sistema.

Por otra parte, Tingambato sólo está ligada eléctricamente con las otras centrales a través de la red de Cia de Luz. No existe una interconexión directa a la tensión de 154 KV.

Las tres turbinas de esta planta son del tipo de reacción, fabricadas por la casa Neyrpic de Francia, para una caída de diseño de 380 m., un caudal de $15.7 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y una potencia de 72000 CV, a la velocidad de 600 rpm.



Figura 2.7 Unidades generadoras de Tingambato.

La instalación subterránea permitió reducir a un mínimo la longitud de las tuberías de presión que alimentan a las turbinas, por cuya razón fue posible evitar el uso de reguladores de presión (válvulas de alivio) en esta central.

Las válvulas principales son del tipo esférico, con servomotores hidráulicos operados por el agua a presión de las tuberías.

La subestación elevadora se encuentra en el exterior y muy cercana a la salida del túnel de acceso a la planta. Está compuesta por tres bancos elevadores con transformadores monofásicos de 18000 KVA cada uno, tipo Oafa e interruptores de extinción de arco por aire comprimido. La conexión eléctrica entre bancos y línea de transmisión, se hace con un doble juego de barras a 150 kV, en un arreglo similar al de Ixtapantongo, con un interruptor de liga al que puede sustituir a cualquier otro interruptor de la subestación que tenga que ponerse fuera de servicio por maniobra de reparación o mantenimiento.

De la subestación de Tingambato parten dos líneas de transmisión hasta la subestación Taxqueña de la Ciudad de México, como ya habíamos señalado.

Dentro de la casa de máquinas subterránea de Ixtapantongo, se encuentran los tableros de control principal y auxiliares de la planta, así como los transformadores para servicio propio, que se han seleccionado del tipo seco (sin aceite aislante) por razón de seguridad.

La construcción subterránea de esta central, y el clima caluroso de la región, han obligado a montar una instalación complicada para ventilación y enfriamiento del aire. Se ha determinado que la temperatura de la roca, en la que esta enclavada la casa de máquinas es de 30° C y que el calor generado dentro de la casa de máquinas es del orden de 812 000 calorías por hora.

2.4 LINEAS DE TRANSMISION Y SUBESTACIONES REDUCTORAS.

Si se exceptúan las cargas locales, una buena parte de la energía producida en el Sistema Miguel Alemán es transportada hasta la Ciudad de México, a 150 kV, para alimentar el anillo a 85 kV de la Cia. de Luz y Fuerza por intermedio de las subestaciones transformadoras de El Alamo y Taxqueña que reducen la tensión de 150kV a 85 kV.

De la planta de Ixtapantongo salen tres líneas de transmisión paralelas, con dos circuitos cada una y que terminan en la subestación El Alamo. Estos seis circuitos transmiten la energía producida en las plantas de Ixtapantongo y Santa Bárbara la energía de la planta Tingambato, se transmite por una línea, de dos circuitos, que llega a la subestación Taxqueña, tal y como se muestra en el diagrama No.2.2.

ESQUEMA UNIFILAR

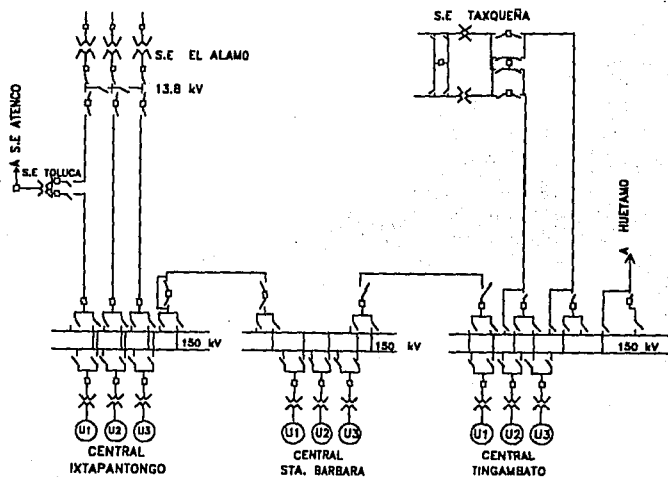


Diagrama No. 2.2.

A continuación se resumen las características más importantes de estas líneas.

IXTAPANTONGO-EL ALAMO.	<u>Línea 1</u>	<u>Línea 2</u>
Longitud	116.50 km	118.12 km
Peso de las torres de acero galvanizado	21.17T/km	23.0T/km
Conductor de cobre 321 MCM, hueco, diseño ANACONDA 954	366	346

TINGAMBATO-TAXQUEÑA

Longitud	147.85 km
Peso de las torres de acero galvanizado	16.1T/km
Cantidad de torres	404
Conductor de aluminio con alma de acero	795 MCM (drake)

El uso de conductores de aluminio en las líneas de Tingambato, refleja la preferencia en los últimos años, por los conductores de aluminio, que ha resultado más económico que los de cobre, debido al alto precio de este metal.

Tanto la subestación reductora de El Alamo, como Taxqueña, constan de un banco de transformadores monofásicos, para cada circuito de transmisión, es decir, que en El Alamo hay cuatro bancos transformadores y en Taxqueña dos, siguiendo un arreglo unitario línea-banco transformador. Las características de transmisión en estas subestaciones, pueden apreciarse con claridad en la tabla . 2.1.

**CARACTERISTICAS DE LOS TRANSFORMADORES
EN EL ALAMO Y TAXQUEÑA**

Subestación Banco No.	Rel. Transf. kV	Tipo de transformador	Capacidad de transformación por transformador	Capacidad de transformación por banco
ALAMO				
1	131.5/93/13.8	10-OA/FA	a 131.5 kV	a 131.5 kV
2	"	"	16000/18667 a 93 kV	a 8000/56000 a 93 kV
3	"	"	20000/23336 a 13.8 kV	60000/70000 a 13.8 kV
TAXQUEÑA				
1	135/92	10-OA/FA	19200/24000	57600/72000
2	135/92	10-OA/FA	19200/24000	57000/72000

TABLA 2.1

La capacidad total instalada en El Alamo es de 280 000 KVA, y en Taxqueña 144 000 KVA. En ambas subestaciones se cuenta con un transformador monofásico de reserva .

Los dos primeros bancos de El Alamo, tienen interruptores americanos de gran volumen de aceite. Los bancos 3 y 4 de El Alamo, y todos los de la subestación de Taxqueña tienen interruptores Brown Boveri de extinción del arco por aire comprimido.

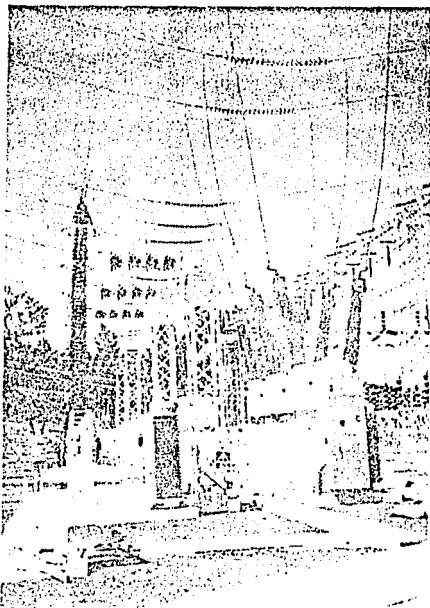


Figura 2.8 Interruptores de gran volumen de aceite.

2.5 CARACTERISTICAS DE LAS PROTECCIONES

A grandes rasgos los tipos de protección que se han adoptado en los diferentes elementos del Sistema, son los siguientes:

Generadores.- Relevador diferencial de corriente y acción rápida para fallas entre fases. Relevador de voltage 64G para fallas a tierra, conectado en el secundario de un transformador de distribución cuyo primario aterriza al neutro del generador. Alarma para detectar aterrizamiento del sistema de excitación. Protección contra pérdida de excitación o contra potencia inversa. Protección por sobrecorriente o (en el caso de Tingambato) por relevador de impedancia con elementos de tiempo, como respaldo para fallas externas del generador que no se libren oportunamente. Descarga automática de gas carbónico dentro del generador, en caso de incendio. Señal de alarma y paro de las unidades por alta temperatura en las chumaceras, u otras fallas.

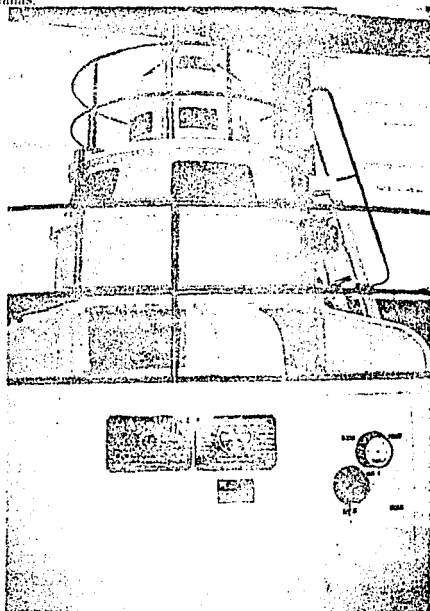


Figura 2.9 Generador.

Transformadores.-Protección diferencial de corriente con restricción de armónicas, para impedir que, dicho relevador opere cuando se energizan los transformadores. La zona de operación de este relevador abarca hasta el neutro del generador, de tal manera que esta protección actúa como respaldo de la que proporciona el relevador diferencial del generador. Se incluyen alarmas por temperatura alta y en algunos casos protección del tipo Bucholz. Al neutro de los bancos se han conectado relevadores de sobrecorriente que dan protección de respaldo para fallas en las barras y líneas de transmisión.

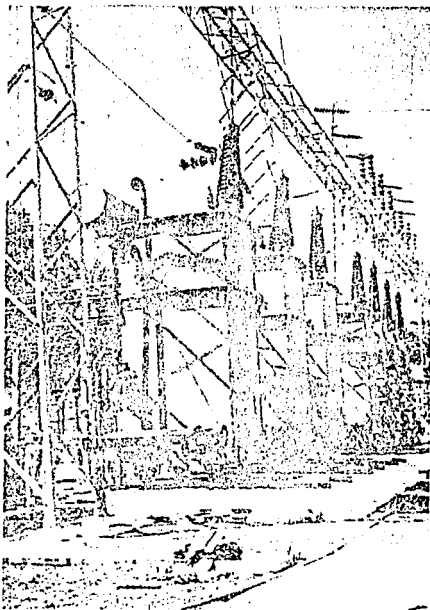


Figura 2.10 Transformador.

La tabla No 2.2 muestra las características de los transformadores elevadores del Sistema Miguel Alemán, e indica claramente la tendencia de la C.F.E hacia el uso de transformadores del tipo OA.

CARACTERISTICAS DE LOS TRANSFORMADORES ELEVADORES DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN

Planta Banco No.	Rel. Transf. kV	Tipo de transformador	Capacidad de transformación por transformador KVA	Capacidad de transformación del banco. KVA	Capacidad en reserva para toda la planta.
Ixtapantongo					
1	150/13.2	10-FOW	10333	31000	10333
2	"	"	"	"	"
3	"	"	16667	50000	"
Sta Bárbara					
1	150/13.2	10-OA	9000	27000	9000
2	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"
Tingambato					
1	150/13.2	10-OA/FA	14400/18000	43200/54000	14400/18000
2	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"

TABLA 2.2

Línea de transmisión.- La línea Santa Bárbara-Ixtapantongo, está protegida por relevadores piloto con línea metálica ; las líneas Ixtapantongo-El Alamo, por relevadores de impedancia-distancia; y las líneas Tingambato-Taxqueña por onda portadora (carrier)piloto con relevadores de comparación de fases. Se espera que esta protección evite operaciones innecesarias de los interruptores de línea por fallas externas a las mismas.

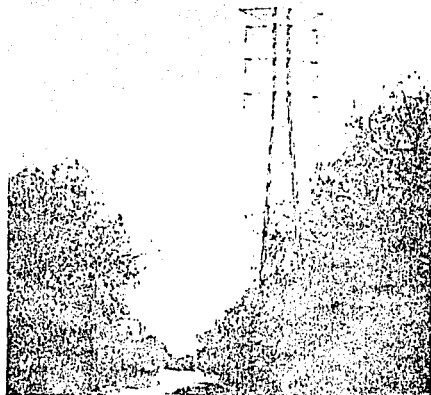


Figura 2.11 Línea de transmisión.

En la tabla No. 2.3 se muestran las características generales de las máquinas (turbinas y generadores) utilizados en el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

TURBINAS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMÁN

PLANTA NUMERO	Caída neta	caudal m ³ /seg	Potencia C.V	Velocidad r.p.m	Tipo	Reg. Presión
Ixtapantongo						
1	313.4	10.72	39540	600	Reacción	Sí
2	"	"	"	"	"	"
3	311	20.35	76000	500	"	"
Sta.Bárbara						
1	246.3	11.5	33458	600	Reacción	No
2	"	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"	"
Tingambato						
1	380	15.7	72000	600	Reacción	No
2	"	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"	"

TABLA 2.3a

GENERADORES DEL SISTEMA MIGUEL ALEMÁN

PLANTA NUMERO	Potencia KW	KVA	Tensión KV	Relac. c.cir. P.U	Mom Vol G D2 T-m2
Ixtapantongo					
1	28000	31000	13.2	1.03	169
2	"	"	"	"	"
3	45000	"	"	1.25	575
Sta.Bárbara					
1	22525	26500	13.8	1.16	203
2	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"
Tingambato					
1	45000	50000	13.8	1.18	210
2	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	"

TABLA 2.3b

CAPITULO III

CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA.

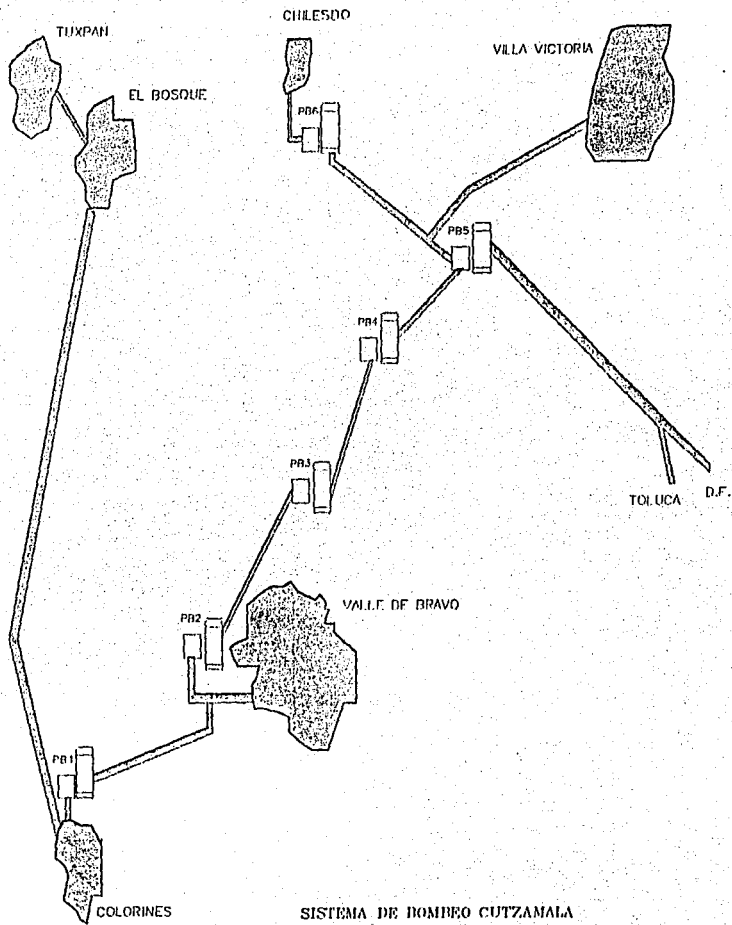
3.1 PROBLEMATICA EN EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE A LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO.

La tarea hidráulica de abastecer de agua a la zona metropolitana de la Ciudad de México, debe atender por una parte, la demanda anual que provoca el incremento poblacional estimado en miles de habitantes, y por otra reducir la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento subterráneas en el valle de México .

Es importante destacar que la zona metropolitana de la Ciudad de México no cuenta con sitios adecuados para regularizar el agua de lluvia, por estar asentada la población en la parte más baja del valle, las precipitaciones medias son de 730 mm. anuales en promedio, concentradas en 4 meses del año, que dan una recarga al acuífero del orden de los 725 millones de metros cúbicos anuales, existiendo una sobreexplotación de más del 100% de la recarga, causa fundamental de los hundimientos, lo que hace necesario ejecutar proyectos que permitan la importación de agua de cuencas externas que coadyuven a disminuir dicha sobreexplotación mediante la cancelación de pozos. En la figura 3.1 se puede ver el esquema de este sistema de bombeo.

Hasta 1988 el suministro de agua potable fue de aproximadamente $64 \text{ m}^3/\text{seg.}$, provenientes de las siguientes cuencas:

- 44 m³/seg. subsuelo del valle de México.*
- 7 m³/seg. Sistema Lerma.*
- 12 m³/seg. Sistema Cutzamala.*
- 1 m³/seg. aprovechamientos superficiales.*



SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA

independientemente de los caudales de re-uso de agua que serán del orden de 3 m³/seg., para cubrir ciertas necesidades de servicio público, riego de parques y jardines y algunos usos industriales.

De este abastecimiento, a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, através de la CNA (Comisión Nacional del Agua), le corresponde proporcionar un caudal de 28 m³/seg., mediante 15 acueductos con más de 300 pozos en operación, la presa Madín y el Sistema Cutzamala, teniéndose programado al año 2000 seguir proporcionando 2m³/seg. cada año para cubrir el incremento poblacional y 1m³/seg./año para cancelación de pozos a fin de reducir la sobreexplotación. Estos caudales se darán con importación de agua de fuentes externas cercanas al valle de México y mediante el re-uso.

En esta tarea de abastecimiento de agua, un programa importante y permanente es la conservación de los caudales ya suministrados, para lo cual se lleva acabo la rehabilitación y/o sustitución de pozos y la conservación de las plantas de bombeo y acueductos. Anualmente se rehabilitan o sustituyen pozos que suministran en promedio el 15% del volumen captado.

Otro programa que cobra singular importancia para el manejo adecuado del acuífero en el valle de México, es el de cancelar pozos para disminuir la sobreexplotación a que se ha sometido, y cuyas repercusiones se manifiestan con los hundimientos y agrietamientos del suelo, afectaciones en las estructuras, deterioro de la calidad de agua, así como cierto trastorno ecológico.

A principios de la década de los 70's, en el valle de México se incrementó la extracción de aguas subterráneas por medio de pozos y norias, motivada por la creación de gran cantidad de industrias y fraccionamientos que rápidamente se desarrollaron originando nuevas necesidades de agua potable, tanto en el Distrito Federal como en los 11 municipios del Estado de México, que para ese entonces ya se encontraban conurbados a la capital, lo que hizo necesario el planteamiento del abastecimiento de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México, mediante cuencas externas diferentes a las del Lerma, la que para entonces ya presentaba signos de sobreexplotación.

A partir de entonces, se continúan los estudios de abastecimiento de agua potable iniciados por la extinta Comisión Hidrológica de la cuenca del valle de México, que incluían diversas alternativas desde captaciones cercanas al valle de México, hasta cuencas hidrológicas tan lejanas como la del Río Papaloapan, prevaleciendo en estos análisis el dejar reservas para los usos locales y futuros.

Se correlacionaron caudales disponibles, longitud del recorrido, desniveles respecto a los puntos de captación y entrega, energía para su operación, topografía, calidad del agua, tenencia de la tierra, aspectos tecnológicos, cambio del uso de agua y sus consecuencias.

Las regiones más viables para este abastecimiento con fuentes externas corresponden a las cuencas de : Cutzamala y Temascaltepec al Oeste, Tecolutla y Oriental Libres al Este, Amacuzac al Sur y Tula (Taxhimay) al Norte, con caudales de 19, 5 , 14.5 , 7 , 14.2 y 2.8 m³/seg respectivamente, con lo que se estimó podrán cubrir las demandas del vital líquido hasta el año 2000.

De las cantidades anteriores, se puede observar que la mayor corresponde al Sistema Cutzamala, de ahí la importancia de asegurar su funcionamiento y proporcionar el vital líquido a la Ciudad de México.

En la figura 3.2 se muestra el esquema representativo de la dependencia de agua potable de cuencas externas, hacia la Ciudad de México, para así poder dar solución al problema de abastecimiento de agua potable a tan importante zona del país.

Independientemente de los esfuerzos que en esta materia realiza el sector público, se requiere implantar la obligación a las industrias de tratar sus aguas residuales y recircularlas en sus procesos, si es su deseo permanecer en el Valle de México.

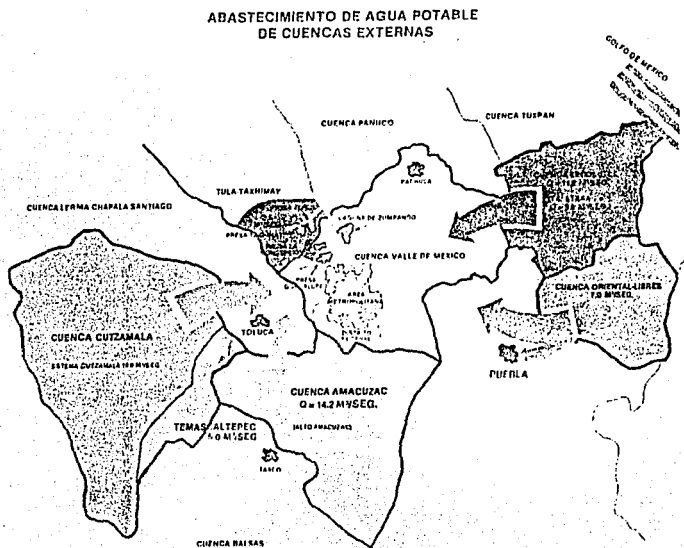


Figura 3.2. Abastecimiento de agua potable de cuencas externas.

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA CUTZAMALA.

El sistema consiste en el aprovechamiento de siete presas de almacenamiento y de derivación, correspondientes a la cuenca alta del río Cutzamala, la construcción de un vaso de regulación horaria y un acueducto de 127 km, que incluye 19 km de túneles y 7.75 km de canal, la construcción de una planta potabilizadora con capacidad de 24m³/seg., seis plantas de bombeo para vencer un desnivel de hasta 1100 metros, cuya operación requiere de una energía de hasta un total de 1650 millones de KWH por año, y 24 km de túneles dentro de la zona metropolitana de la Ciudad de México que corresponden a los ramales Norte y Sur de 12.5 y 11.5 km respectivamente para la distribución de agua a los municipios conurbados del Estado de México y el Distrito Federal.

Su ejecución se inició en 1976 programándose en tres etapas constructivas de 4, 6 y 9 m³/seg. respectivamente. Las aguas de este Sistema son las mismas que anteriormente se utilizaron para generación de energía eléctrica; únicamente se realizó un cambio en su uso, dejando reservas de 3 m³/seg. y otro tanto para atender las demandas locales, tanto actuales como futuras que requiere el desarrollo agrícola e industrial de la región.

Se requiere desde luego, el cuidado de las zonas de captación y la preservación de la calidad del agua, efectuando obras que no sólo eviten dañar el sistema ecológico, sino que tiendan a mejorarlo.

Existe siempre un gran problema a resolver en este sentido: el habitante de la Ciudad en su gran mayoría, ve el agua potable como un derecho, como parte de su "hábitat"; por otra parte, el habitante de las zonas de captación, considera la explotación y transporte del recurso, como un despojo; conciliar es el reto y la responsabilidad; hacer conciencia en los habitantes de la Ciudad del gran esfuerzo que conlleva el suministro de agua potable, que reclama correspondencia por parte del usuario, en cuanto a su cuidado, buen uso y pago del servicio.

En la figura 3.3 se muestra el croquis del Sistema de Bombeo Cutzamala y en la figura 3.4 el perfil de éste mismo.

Las plantas de bombeo de este Sistema, para decirlo en una analogía, permiten elevar el contenido de 19 tinacos de agua de 1000 litros cada uno a una altura de 1100 metros, equivalente a siete y media veces la altura de la Torre Latinoamericana y recorrer 127 km., distancia equivalente al trayecto de ida y vuelta de la carretera México - Cuernavaca, todo ello para poder suministrar 19000 litros cada segundo.

CROQUIS DEL SISTEMA CUTZAMALA

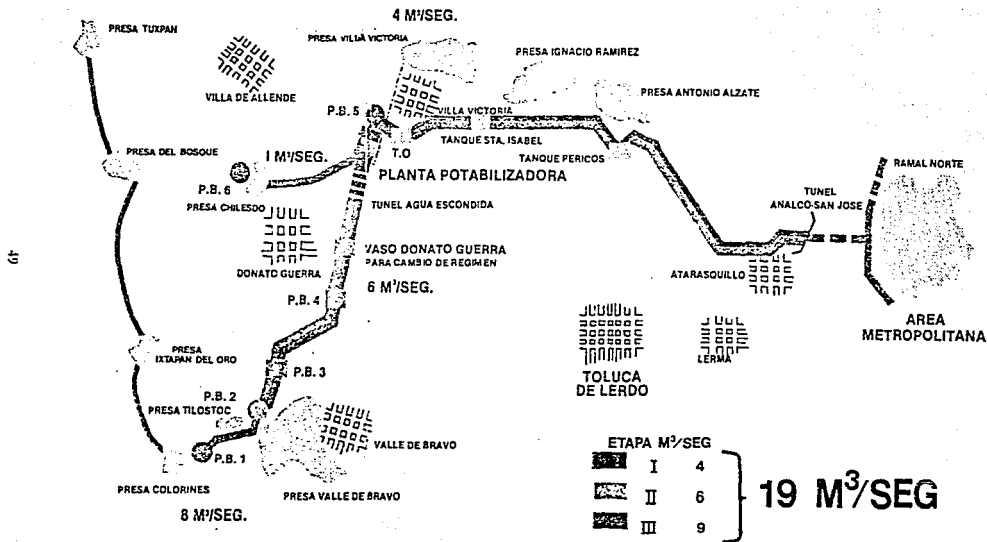


FIGURA 3.3

PERFIL DEL SISTEMA CUTZAMALA

05

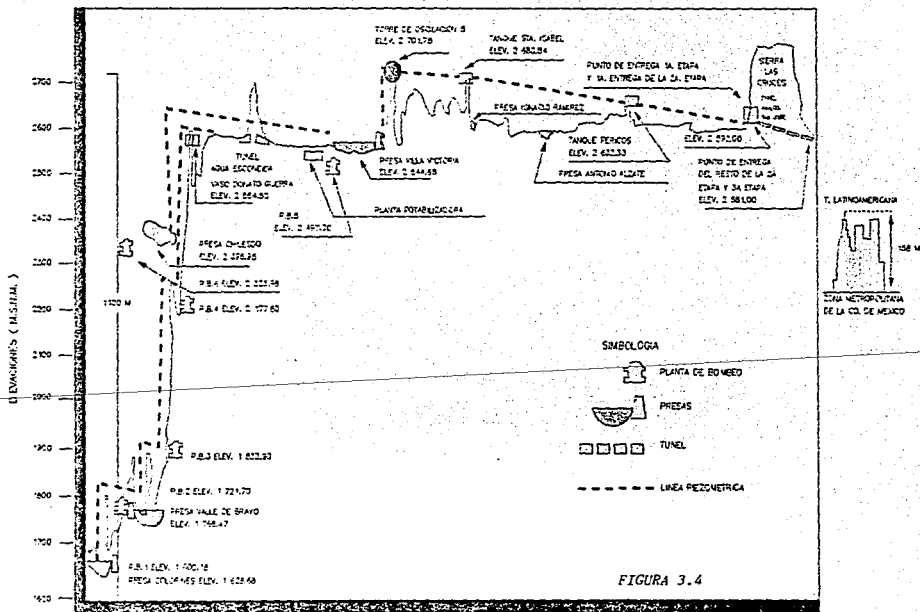


FIGURA 3.4

3.2.1 PRIMERA ETAPA.

La primera etapa en operación desde 1982, aporta $4 \text{ m}^3/\text{seg.}$, procedentes de la presa Villa Victoria, que se conducen a través del canal Martínez de Meza, de 12 km. a la Planta Potabilizadora de Berros y posteriormente se realiza su bombeo a la Planta No.5, venciendo una carga total de 174 metros para conducir el agua a través de un acueducto de tubería de concreto preesforzado de 2.50 m. de diámetro y $12 \text{ m}^3/\text{seg.}$ de capacidad, en una longitud de 77 km., atravesando la Sierra de las Cruces en la parte Noroeste del área metropolitana mediante el túnel Atarrasquillo-Dos Ríos, que conduce también las aguas del alto Lerma, iniciándose en Dos Ríos la distribución del agua.

3.2.2 SEGUNDA ETAPA.

La segunda etapa, en operación desde julio de 1985, consiste en la captación y conducción de $6 \text{ m}^3/\text{seg.}$ de la presa Valle de Bravo hasta la Planta Potabilizadora de Berros, con tuberías de acero de alta y baja presión cuyos diámetros fluctúan 1.83 y 3.27 m. en una longitud total de 3.7 km. y tubería de concreto preesforzado de 2.50 m. de diámetro con capacidad de $12 \text{ m}^3/\text{seg.}$, en una longitud de 14.5 km, así como las Plantas de Bombeo 2,3 y 4 para vencer cargas de 122, 350 y 350 metros, respectivamente.

En las Plantas de Bombeo 2, 3 y 4 se han instalado para la segunda etapa los primeros 3 equipos de $4 \text{ m}^3/\text{seg.}$ de un total de 6 que tendrá cada una de éstas.

También se construyó el vaso Donato Guerra con capacidad aproximada de $300\,000 \text{ m}^3$ que funcionará como regulador, enviando por gravedad hasta $19 \text{ m}^3/\text{seg.}$ a la Planta Potabilizadora para asegurar en ésta un suministro continuo durante las 24 horas, ya que el proyecto contempla el uso combinado de las presas Valle de Bravo y Colorines, para permitir la generación de energía eléctrica en las horas de mayor demanda.

A partir de esta obra, se conducen los caudales mediante un canal abierto de sección trapezoidal con longitud de 7.5 km. y capacidad de $24 \text{ m}^3/\text{seg.}$ hasta el portal de entrada del túnel Agua Escondida, de sección herradura de 4.2 m de longitud y 3.1 km.. Del portal de salida de este túnel se conduce el agua mediante tubería de concreto hasta el tanque receptor de aguas crudas de la planta potabilizadora.

3.2.3 TERCERA ETAPA.

La tercera etapa, permitirá captar $9 \text{ m}^3/\text{seg.}$, 8 en el vaso regulador de Colorines procedentes de la presa Tuxpan y el Bosque, en el Estado de Michoacán, e Ixtapan del Oro en el Estado de México, para lo cual se construyó la Planta de Bombeo No. 1, Colorines, con una capacidad de $20 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y carga de 157 m y $1 \text{ m}^3/\text{seg.}$ en la presa derivadora Chilesdo, cuya construcción ya se há logrado y que permite enviar a la Planta Potabilizadora hasta $5 \text{ m}^3/\text{seg.}$ durante la época de avenidas mediante la Planta de Bombeo No. 6 constituida por tres equipos para un gasto de $1.7 \text{ m}^3/\text{seg.}$ cada uno, contra una carga de 213 metros con capacidad total instalada de 16 890 HP disponiendo de sus respectivas torres de oscilación y sumergencia y tubería hasta la planta potabilizadora, con longitud de aproximadamente 11.5 km. La tubería de concreto de esta conducción está constituida por dos líneas con un tramo inicial de 1.37 metros y otro de 1.06 metros de diámetro cada una.

Durante esta tercera etapa hubo necesidad de construir la línea de conducción de 4 km. de Colorines a Valle de Bravo; la segunda tubería de 2.50 m de diámetro con capacidad de 12 $\text{m}^3/\text{seg.}$ entre Valle de Bravo y el túnel Analco-San José con 90 km de longitud; la puesta en marcha de los últimos tres equipos de bombeo de las plantas 2, 3 y 4 y la terminación de otros módulos de potabilización requeridos para el tratamiento.

Cada planta de bombeo cuenta con una torre de sumergencia y una de oscilación, la primera tiene como función proporcionar la carga y volumen que requieren los equipos de bombeo para su arranque y la segunda, evitar el golpe de ariete en la tubería de presión de acero que va de la planta de bombeo a la torre de oscilación, eliminando dicho golpe del resto de la conducción.

Estas torres de sumergencia y oscilación, son estructuras cilíndricas de concreto reforzado, de colado continuo, con alturas variables que fluctúan entre los 37 y 58 m, teniendo diámetros interiores de 10 m. y espesores en sus paredes hasta 1.60 m, que se han contruido en tiempo récord de 20 días continuos.

En las figuras 3.5 y 3.6 se ilustran las estructuras de las torres de sumergencia y oscilación respectivamente.

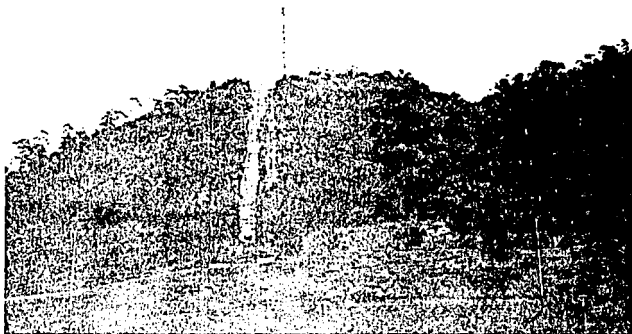


Figura 3.5 Torre de sumergencia.



Figura 3.6 Torre de Oscilación.

3.3 PLANTA POTABILIZADORA.

La Planta Potabilizadora del Sistema Cutzamala, hace posible que el agua suministrada a la zona metropolitana de la Ciudad de México, garantice la calidad determinada por las normas nacionales e internacionales .

En la figura 3.7 se muestra el croquis representativo de la planta potabilizadora.

El proyecto integral de la Planta Potabilizadora de Berros incluye 6 módulos de tratamiento, cada uno de ellos tiene capacidad para potabilizar 4000 L.P.S.

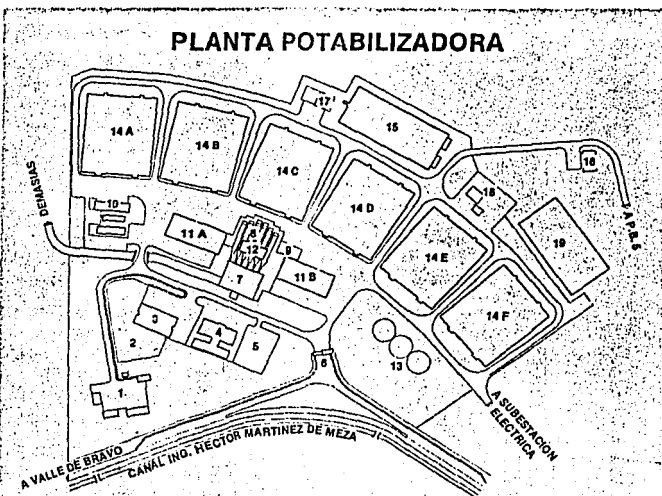
El agua cruda llega a un tanque de recepción (No 7 del croquis) de 6500 m³ formado por dos cámaras. Posteriormente pasa a unos canales Parshall (No 8 del croquis) donde el caudal es medido y se adicionan los siguientes reactivos: sulfato de aluminio que sirve como coagulante, y cloro para evitar el desarrollo de algas durante el proceso.

Concluida la floculación, el agua pasa a cuatro tanques denominados de sedimentación (14 del croquis) de 4000 m³ cada uno, los cuales cuentan con un conjunto de placas paralelas de asbesto-cemento con una separación de 5 cm e inclinadas 60 grados, las que propician y aceleran la precipitación de los grumos o flocus en suspensión. Estos grumos se depositan en forma de lodo del tanque de donde son extraídos mediante un sistema de succión suspendido de un flotador que recorre los tanques en sentido longitudinal.

Una vez sedimentados los lodos, el agua pasa a la sección de filtros (No 14 del croquis) consistente en 8 tanques con capacidad total aproximada de 8 000 m³, que contienen lechos de grava y arena sílica apoyados en un falso fondo constituido por losas con boquillas microranuradas por las cuales pasa el agua ya filtrada con calidad potable. Los lechos de arena y grava mencionados requieren ser lavados periódicamente mediante aire y agua que se inyecta en sentido inverso por las boquillas .

Posteriormente se adiciona cal al agua que sale de los filtros a fin de neutralizar efecto corrosivo, propiciado por la adición de los coagulantes inicialmente citados .

El agua potabilizada pasa a un tanque de recepción de aguas claras con capacidad total de 35 000 m³ (No 19 del croquis) que es al mismo tiempo el tanque de sumergencia de la Planta de Bombeo No 5, que envía el agua a la zona metropolitana.



NOMENCLATURA

- | | |
|--|---|
| 1. CAMPAMENTO DE CONSTRUCCION | 11. ALMACEN Y DOSIFICACION DE REACTIVOS |
| 2. ALMACEN DESCUBIERTO | 12. CLORACION |
| 3. ALMACEN CUBIERTO | 13. HELIPUERTO |
| 4. OFICINAS CENTRALES | 14. MODULO DE POTABILIZACION |
| 5. ESTACIONAMIENTO | 15. TANQUE SEPARADOR DE LODOS |
| 6. PORTICO | 16. ESTACION DE BOMBEO DE AGUA POTABLE |
| 7. TANQUE DE RECEPCION DE AGUAS CRUDAS | 17. ALMACEN DE ARENA Y ANTRACITA |
| 8. PATIO DE MEDIDORES | 18. ALMACEN DE DOSIFICACION DE CAL |
| 9. ALMACEN DE CLORO | 19. CARCAMO DE AGUAS CLARAS |
| 10. TALLERES | |

Figura 3.7 Croquis de la planta potabilizadora.

3.4 OBRA ELECTROMECHANICA DEL SISTEMA.

El Sistema Cutzamala cuenta con 35 bombas, teniendo 29 de ellas una capacidad unitaria de $4 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y el resto de $1.7 \text{ m}^3/\text{seg.}$, accionadas con motores eléctricos con potencia hasta de 22000 HP, siendo la potencia total instalada de 450 000 H P.

La energía para accionar estos motores y en general todas las instalaciones electromecánicas, es suministrada por la Comisión Federal de Electricidad, de sus sistemas Infiernillo- Nopala, existiendo una subestación principal denominada Donato Guerra que, reduce la tensión de 400 kV a 115 kV, con dos bancos de transformación desde donde se distribuye la energía a las plantas de bombeo, utilizando 80 km de líneas de transmisión de 115 kV. En cada planta para alimentar los motores se requirió de equipo eléctrico especial, consistente en tableros con tensión de 13.8 kV, tableros para servicios auxiliares en baja tensión, controladores programables electrónicos y subestaciones eléctricas para la reducción de la tensión de transformación de 115 kV a 13.8 kV.

En virtud de que la capacidad de los motores es muy grande y a fin de no provocar disturbios de importancia en los sistemas eléctricos al arranque de los mismos, se hizo necesaria la instalación de compensadores de potencia reactiva en las subestaciones de las Plantas de Bombeo 3, 4 y 5. La figura 3.8 ilustra una sección de la subestación Donato Guerra.

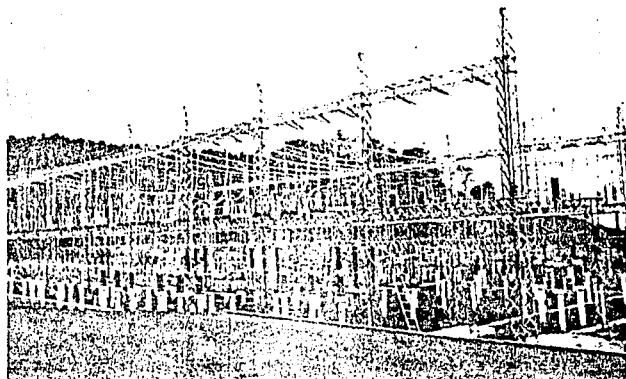


Figura 3.8 S E Donato Guerra.

Los elementos más importantes de este sistema son, sin duda alguna, los motores de inducción de gran capacidad empleados para dar movimiento al fluido. Estos se conectan en forma directa a bombas hidráulicas también de gran capacidad. Los primeros fueron construidos por la casa Jeumont Schneider y los segundos por CCM Sulzer. En el capítulo 6, se proporciona la información correspondiente a estos dispositivos, así como también, se analizan las características de funcionamiento de los motores ante la nueva alternativa de suministro de energía eléctrica a este importante sistema de bombeo. La figura 3.9 nos ilustra uno de los motores conectado a su respectiva bomba hidráulica y la figura 3.10 nos muestra el diagrama unifilar simplificado de la subestación eléctrica Donato Guerra.

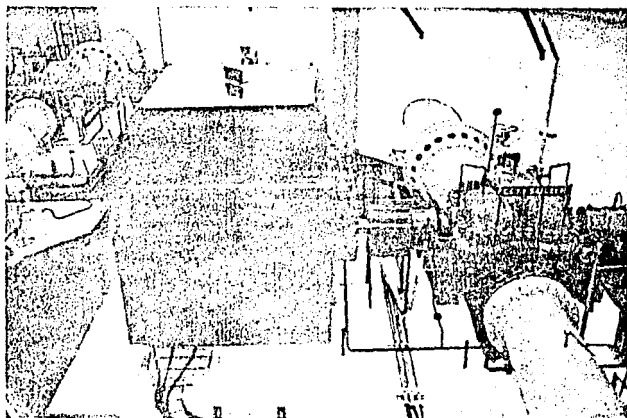


Figura 3.9 Acoplamiento motor de inducción-bomba hidráulica.

DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DE LA S.E. DONATO GUERRA

85

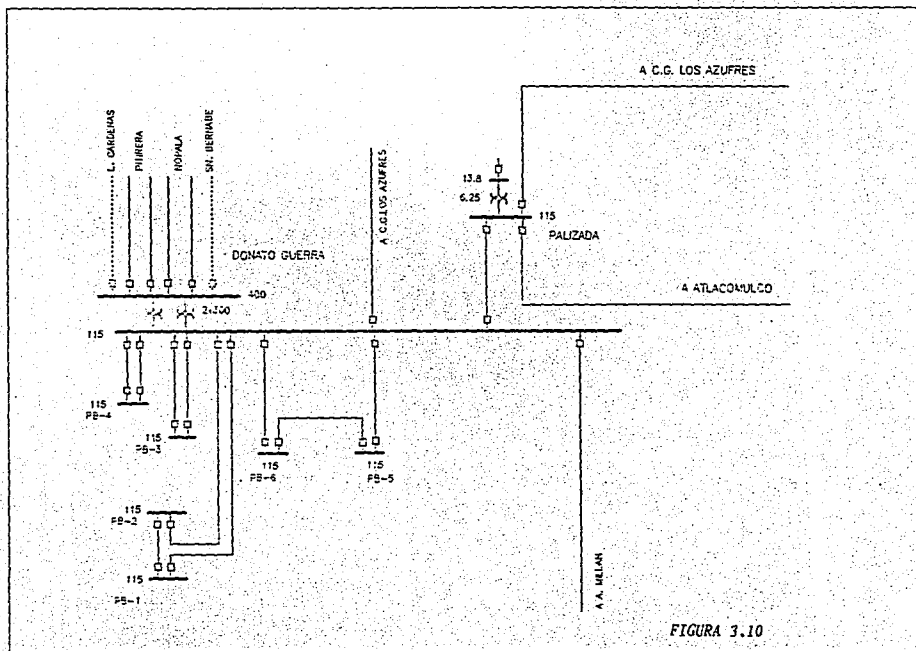


FIGURA 3.10

ASPECTOS COMPRENDIDOS PARA LA REALIZACION DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA AL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA Y PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO

4.1 ESTUDIOS REQUERIDOS

Para poder llevar a cabo el estudio de alternativa de suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala, es necesario realizar el análisis de las condiciones que se presentan tanto en estado estable como en estado dinámico. De esta manera, para estudiar las condiciones mencionadas, se hace uso del análisis de flujos de potencia el cual, es de gran utilidad para darnos a conocer las condiciones iniciales bajo las que se encuentra la red del sistema eléctrico.

Para analizar el estado dinámico, es indispensable efectuar los estudios correspondientes de estabilidad y así poder determinar y prever, las posibles situaciones que se pudieran presentar al momento de realizar el arranque de alguno de los motores o, la puesta en operación de algún dispositivo o elemento requerido dentro del sistema eléctrico.

Es por otro lado, de vital importancia tener un aceptable conocimiento de los aspectos fundamentales relacionados con el motor de inducción jaula de ardilla ya que éste, es el elemento más importante de las plantas de bombeo que conforman el Sistema Cutzamala. Es así como se hace necesario estudiar la manera como está compuesto dicho motor, sus principios de operación y la forma como representarlo dentro de un programa digital que nos permita así mismo, simular todas las situaciones requeridas para el trabajo que aquí se presenta.

Como se puede observar, son varios aspectos los que se deben tomar en consideración y estudiarlos, dándole a cada uno la importancia adecuada. Por lo tanto, se requiere de un programa digital que permita realizar todo lo anterior de una manera confiable y eficaz, para lo cual, se cuenta en el campo de la ingeniería eléctrica con el programa simulador de sistemas de potencia para ingenieros (PSS/E), lo que representa sin duda una magnífica y poderosa herramienta que hace posible efectuar toda esta clase de estudios entre otras cosas que en este capítulo, se describen de una manera global puesto que dicho programa tiene un buen número de aplicaciones y cada una de ellas a su vez, presenta sus respectivas variantes las cuales para poder analizarlas con más detalle, sería necesario realizar un trabajo completamente dedicado al funcionamiento del PSS/E. Por lo tanto, en la siguiente sección se describe en forma general

el programa y con un poco más de detalle, solamente aquellas actividades que se requieren para llevar a cabo el estudio sobre los motores del Cutzamala.

Es entonces verdaderamente indispensable antes de pasar a cualquier otra situación, conocer el funcionamiento de este programa, en que consiste y las actividades que nos permite realizar, principalmente como ya se mencionó, las que en este caso nos interesan para la realización de este trabajo como lo son: representación del motor de inducción dentro del programa, y los correspondientes estudios de estabilidad para la simulación dinámica del arranque de los motores, entre otros aspectos que en su momento se describirán en los capítulos correspondientes.

4.2 CARACTERISTICAS GENERALES Y APLICACIONES DEL SIMULADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS/E)

4.2.1 Introducción

El simulador de sistemas de potencia PSS/E (Power System Simulator for Engineers), es un programa ampliamente utilizado para el análisis y solución de muchos de los problemas que se presentan en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). El programa fue desarrollado por PTI (Power Technologic Inc.) y adquirido por la Unidad de Ingeniería Especializada (UIE), de la Comisión Federal de Electricidad, aproximadamente en el año de 1985. La compañía PTI, constantemente está incorporando nuevas modalidades al programa, como es su utilización en diferentes sistemas de cómputo, manejo del mismo e inclusión de nuevos modelos. Actualmente la versión del programa que dispone la UIE es la número 20. La actualización, en promedio cada tres años, permite que el usuario pueda analizar los problemas de una manera más amigable y sencilla, empleando para ello menor tiempo y contando con mejor y más accesible presentación de los resultados obtenidos. Es conveniente agregar que está por salir al mercado la versión del programa para ser aplicada en el ambiente de windows.

4.2.2 Características generales del programa PSS/E .

- Es un programa interactivo y modular
- Utiliza una base de datos única
- Proporciona resultados gráficos y tabulares en una gama amplia de dispositivos de salida
- Incluye una librería con modelos para simular el comportamiento de diversos elementos de un SEP

- Permite analizar el comportamiento estático y dinámico de diversos elementos de un SEP
- Permite la incorporación de nuevos modelos desarrollados por el usuario
- Las subrutinas que el usuario desarrolla deben ser en Fortran 77
- Los dispositivos de salida pueden ser archivos, directamente en la pantalla, en impresoras y en graficadores.
- Existen versiones para Vax, Prime, Apollo e IBM, entre otros.

4.2.3 Aplicaciones principales del programa PSS/E

El programa permite analizar aspectos relacionados con los temas siguientes:

- *Flujos de potencia*
- *Estabilidad transitoria y dinámica*
- *Comportamiento de motores de inducción*
- *Cálculo de fallas*
- *Obtención de equivalentes del SEP*
- *Análisis de redes de corriente continua*
- *Respuesta a la frecuencia*

Todo lo anterior, utilizando una base de datos única y además contando en todo momento con ayuda a través de la actividad HELP.

A continuación se describen las características principales de algunos de los temas de análisis que se han indicado, los cuales en este caso son los que más nos interesan para la realización del estudio que se presenta en este trabajo.

D) Flujos de potencia

Los análisis de flujos de potencia son de gran utilidad e importancia en la operación y planificación de un Sistema Eléctrico de Potencia. Con la información que se obtiene, como son los voltajes y flujos de potencia en los distintos elementos que integran el SEP, es posible

detectar y prever situaciones que impliquen, entre otros, problemas de regulación de voltaje, sobrecarga en líneas de transmisión y en transformadores, determinar pérdidas y obtener márgenes de estabilidad en estado estable.

Una descripción más detallada sobre flujos de potencia y un ejemplo de su aplicación en el PSS/E, se presenta en capítulos posteriores.

II) Aplicación del programa PSS/E en el análisis de estabilidad transitoria

Recuérdese que el análisis de flujos de potencia proporciona el comportamiento en estado permanente de diferentes variables eléctricas, principalmente voltajes (magnitud y ángulo) y potencia (real y reactiva). En los análisis de estabilidad transitoria, se consideran modelos para representar el comportamiento transitorio (de 0 a 5 segs.) de máquinas síncronas (generadores eléctricos), incluyendo sus sistemas de regulación de velocidad y de voltaje; de elementos de control como pueden ser compensadores estáticos de reactivos y estabilizadores de potencia; de relevadores de protección; de los cambiadores de taps bajo carga de transformadores en automático y, de motores de inducción. Si en la librería de modelos no existe alguno que sea necesario utilizar, el usuario puede desarrollarlo e incorporarlo a dicha librería.

El usuario puede observar de manera directa el comportamiento de variables eléctricas y mecánicas, entre las cuales se tienen las siguientes:

a) Variables eléctricas

- *Máquina síncrona*
 - Potencia eléctrica, real y reactiva
 - Magnitud del voltaje de generación
 - Posición angular del rotor

- *Regulador de voltaje*
 - Voltaje de excitación
 - Variables internas

- *Red de transmisión*
 - Voltajes en buses
 - Frecuencia en buses

- Flujo de potencia real y reactiva a través de enlaces
- *Motores de inducción*
 - Durante y después del arranque;
 - Potencia eléctrica, real y reactiva
 - Magnitud del voltaje
 - Corriente
 - Par aplicado a la carga
- b) *Variables mecánicas*
 - *Máquina síncrona*
 - Potencia mecánica
 - Pares aplicados a la flecha turbina-generador
 - *Regulador de velocidad*
 - Potencia mecánica
 - Variables internas

Es posible observar de manera indirecta el comportamiento de variables eléctricas y mecánicas que el programa no proporciona directamente. Por ejemplo, si se desea calcular el factor de potencia de cierta carga, basta utilizar la expresión $FP = \cos(\text{ATN}(Q/P))$, en la variable FP se tendrá el comportamiento del factor de potencia. Las variables seleccionadas pueden observarse de manera tabular y gráficamente.

II.1) Método de solución utilizado en el análisis de estabilidad transitoria

Método de Euler

El paso de integración que normalmente se utiliza es de 0.008 segundos. Esto significa que cada 8 milisegundos, el programa resuelve las ecuaciones diferenciales en cada uno de los modelos que representan el comportamiento de motores de inducción y de dispositivos de control. Las variables de salida de todos y cada uno de los diferentes modelos, se retroalimentan a la red de transmisión y son procesadas a través de una corrida de flujos de potencia. Los resultados de esta corrida de flujos es nuevamente retroalimentada a los modelos, éstos las procesan, retroalimentan a la red de transmisión, y así sucesivamente hasta concluir el tiempo de estudio definido por el usuario.

II.2) Eventos que pueden ser simulados en el análisis de estabilidad transitoria

El usuario puede modificar en cualquier instante el valor de uno o varios parámetros en los modelos que representan el comportamiento de determinado elemento de control (máquina síncrona, regulador de voltaje, etc.), o bien, el parámetro de algún elemento de la red de transmisión. También se puede simular la ocurrencia de los eventos indicados a continuación y observar su efecto tanto en la red de transmisión como en los elementos de control. El usuario tiene control sobre el tipo de evento, el tiempo en el que éste ocurre y la duración y ubicación del mismo.

Entre los eventos que se pueden simular están los siguientes:

• En la red de transmisión

- Falla de fase a tierra
- Falla entre fases
- Falla trifásica
- Conexión/desconexión de algún elemento (línea, transformador, generador, etc..)
- Conexión/desconexión de alguna carga
- Apertura monopolar en una línea de transmisión

• En dispositivos de control

- Ajuste de reguladores de voltaje y de velocidad
- Conexión/desconexión de algún dispositivo
- Cambio en el ajuste de algún dispositivo

• En motores de inducción

- Arranque de uno o varios motores de manera simultánea y observar su efecto en el comportamiento de uno o varios motores que ya están en operación. Como se puede verificar en el capítulo 5 de este trabajo.

III) Aplicación del programa PSS/E en el análisis de arranque de motores

Los motores de inducción son los más utilizados debido principalmente a sus características de funcionamiento y bajo mantenimiento. Esta aplicación del PSS/E en particular, es una de las que más nos interesa conocer por lo que se analiza con más detalle en el capítulo 5, en donde se presenta también, la teoría respectiva para conocer la composición y operación de este tipo de motor.

IV) Aplicación del programa PSS/E en el análisis de corto circuito

Es posible obtener valores de corto circuito tanto para fallas balanceadas como para fallas no balanceadas. Entre los tipos de fallas que se pueden simular están las siguientes:

- *falla trifásica*
- *falla entre dos fases*
- *falla entre dos fases y tierra*
- *falla de una fase a tierra*
- *un conductor abierto*
- *dos conductores abiertos*

Los valores de voltajes y corrientes de falla pueden ser reportados en unidades físicas o en pu., y en forma polar o en forma rectangular, todo a elección del usuario. Los resultados, voltajes y corrientes, son proporcionados en cantidades de fase (fases a, b y c) y de secuencia (secuencia positiva, negativa y cero).

Los valores de voltajes y corrientes de falla consideran la red de transmisión con o sin carga, según lo indique el usuario. Es importante señalar que el programa considera la conexión de transformadores, por lo que el ángulo de los voltajes y corrientes considera el defasamiento entre devanados delta y estrella de los transformadores.

4.3 Conclusiones

1. Como se ha observado el programa interactivo y modular PSS/E es de gran utilidad al ingeniero en los análisis de problemas que se presentan en un Sistema Eléctrico de Potencia, su uso no es muy complicado, y trabaja con una base de datos única que lo hace más interesante y sencillo. El usuario con toda facilidad y rapidez puede modificar, borrar y dar de alta información.
2. El programa al trabajar con modelos individuales que representan el comportamiento de determinado elemento o dispositivo de control, lo hace versátil y de amplia aplicación. Si el usuario tiene necesidad de desarrollar algún modelo, lo puede hacer y después incorporarlo al programa. El lenguaje que se utiliza para elaborar los modelos es Fortran 77.
3. En la Unidad de Ingeniería Especializada y en general en la mayoría de las Áreas Técnicas de CFE, este programa es de los que más se utiliza por las características que posee.

CAPITULO V

GENERALIDADES SOBRE EL MOTOR DE INDUCCION Y SU REPRESENTACION EN EL SIMULADOR PSS/E.

5.1 INTRODUCCION.

El motor de inducción desempeña un papel de suma importancia dentro del Sistema Cutzamala debido a que una gran cantidad de estos motores componen las plantas de bombeo que forman este sistema.

Es por lo tanto, necesario conocer y comprender el funcionamiento y la manera como se encuentra constituido un motor de inducción; así como también, su principio de operación para de esta forma lograr realizar un adecuado estudio del arranque de dichos motores y el análisis correcto de otros factores que intervienen en este trabajo en general.

El motor de inducción fue inventado en 1888 por Nikola Tesla y desde entonces, es sin lugar a duda, el motor eléctrico que se emplea con mayor frecuencia dentro de la industria. Su simplicidad de operación, la resistencia que posee debido a su sólida construcción y el poco mantenimiento que requiere son algunas de las cualidades que justifican su popularidad, desde pequeños motores de potencia fraccionaria hasta los enormes motores de gran capacidad como los que en este estudio del sistema de bombeo Cutzamala se analizarán.

Se le conoce como motor de inducción debido a que al igual que el transformador, opera bajo el principio de inducción electromagnética, y también son denominados "motores asincronos" ya que esta clase de motores no llega a trabajar nunca a su velocidad síncrona, debido a que el rotor nunca alcanzará la velocidad de sincronismo porque de presentarse esto, no existiría entonces una diferencia relativa entre su velocidad y la del campo, deteniéndose el motor al no inducirse corrientes en su devanado. La diferencia de velocidades del campo y del rotor, recibe el nombre de deslizamiento, el cual más adelante se describirá detalladamente.

5.2 COMPONENTES BASICOS DE UN MOTOR DE INDUCCION

Un motor de inducción se encuentra constituido fundamentalmente por los elementos siguientes:

- | | |
|----------------------------------|-------------------------|
| 1.- Estator o núcleo del estator | 6.- Flecha |
| 2.- Rotor o núcleo del rotor | 7.- Rodamientos |
| 3.- Carcaza o soporte | 8.- Tapas |
| 4.- Devanado | 9.- Ventiladores |
| 5.- Aislamientos | 10.- Caja de conexiones |

1.- Estator

El núcleo del estator está formado por laminaciones troqueladas de un rollo de acero eléctrico, que puede ser al silicio o de bajo carbono con pérdidas controladas. Con estas laminaciones se forma un paquete de ciertas dimensiones dependiendo del tamaño del núcleo, este paquete puede ser remachado o soldado, ya sea individualmente o a la carcaza, dependiendo del tamaño y tipo del motor.

El estator representa una de las partes del circuito magnético del motor. El contenido de silicio, que al igual que en los núcleos de transformadores depende de las densidades de flujo usuales, está constituido por paquetes de lamina troquelada en forma de ranuras con objeto de que el bobinado del estator pueda alojarse en dichas ranuras. Desde luego que la forma de las ranuras también varía de acuerdo con el tamaño o tipo de motor.

En las ranuras del estator se alojan las bobinas del mismo, a las que se les puede considerar en forma análoga al transformador como el circuito primario.

2.- Rotor

El rotor de los motores de inducción puede ser de dos tipos:

- a) *Rotor jaula de ardilla*
- b) *Rotor devanado*

En este caso, el tipo de rotor que nos interesa estudiar es el de jaula de ardilla, por lo que es el que se describirá.

Rotor jaula de ardilla. Se le llama de esta manera debido a la semejanza que tiene la forma del rotor con la jaula de dicho animal. El núcleo del rotor está formado igual que el núcleo del estator, pero con la diferencia que el paquete de laminaciones es prensado en unos moldes, que al inyectarles aluminio fundido a presión, forma dentro del paquete lo que es la jaula de ardilla con sus anillos de corto circuito ya integrado. Este proceso se elabora manualmente, cuando la jaula es de cobre. Para ensamblar la flecha, el núcleo es flameado con objeto de eliminar rebabas y a la vez dilatarlo. Los anillos de corto circuito llevan en la parte exterior unas aletas o aspas, las cuales al girar el rotor remueven el aire mejorando así, el enfriamiento del motor.

3.- Carcaza o soporte.

Es la parte que le da forma al motor y en donde es ensamblado el estator, puede ser de lámina de acero rolada y soldada o de fundición de fierro gris; esta última se usa para motores cerrados con ventilación exterior y debido a ello lleva en toda su superficie aletas, lo que permitirá una mejor disipación del calor del motor. La carcaza debe ser maquinada con tolerancias muy precisas para permitir un buen funcionamiento del motor.

4- Devanado.

Es la parte más importante del motor y se compone de bobinas formadas por uno o más conductores de cobre aislado. En el devanado se origina el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor. Existen dos tipos de devanado: El concéntrico que es usado en los motores pequeños de carcasa rolada y el devanado canasta que es hecho manualmente y el cual es el más usado en la mayoría de los motores.

5.- Aislamientos.

Son el complemento del devanado, su función principal es la de evitar cortos circuitos entre las bobinas o de las bobinas con el núcleo y de asegurar que el motor trabajará a cierta temperatura sin modificar sus características. Existen varias clases de aislamientos dependiendo de los materiales que lo componen y de acuerdo a la temperatura límite que es capaz de soportar. Los aislamientos se clasifican como sigue:

Clase de aislamiento	Límite de temperatura	Materiales Componentes
Y	90°C	Algodón, seda y papel.
A	105°C	Algodón, seda y papel impregnados.
E	120°C	Resinas sintéticas.
B	130°C	Mica, fibra de vidrio, amianto.
F	155°C	Mica, fibra de vidrio con aglomerantes
H	180°C	Siliconas, resinas.
C	Más de 180°C	Porcelanas, cuarzo, vidrio, mica.

La mayoría de los motores se fabrican con aislamiento B y F, y en algunos casos especiales se utiliza aislamiento clase H.

6.- Flecha.

Es la parte más resistente del motor, porque transmite la energía mecánica obtenida hacia la carga aplicada al motor, se manufactura de acero con ligero contenido de manganeso, azufre y fósforo para darle alta resistencia al esfuerzo torsional que se presenta al estar operando el motor. Debe llevar maquinados muy precisos en los ajustes con el núcleo y los rodamientos.

7.- Rodamientos.

Generalmente son las únicas partes del motor que por su funcionamiento sufren desgaste, ya que son ellos los que resisten el mayor trabajo en el motor y bajo condiciones normales de operación serían las únicas partes que se reemplazan. En los motores de gran capacidad se utilizan rodamientos de rodillos en el lado de carga del motor, además de que se prevé de un engrasador por cojinete y se incluye una válvula de drene para evacuar la grasa vieja o excedente. El montaje de los rodamientos debe tener en cuenta la dilatación longitudinal que la flecha sufre a consecuencia del calentamiento del rotor.

8.- Tapas.

Estas pueden ser de aluminio o de hierro fundido y son partes mecánicas de sostén, pues en ellas se alojan los rodamientos o baleros que servirán de apoyo al rotor. El maquinado de los alojamientos del rodamiento y de los ajustes con la carcasa deben ejecutarse muy cuidadosamente. Es importante que el centrado del rotor quede concéntrico con los diámetros de las tapas, para que el entrehierro sea rigurosamente idéntico en todas las direcciones.

El cuidado con que se efectúen estas operaciones influye mucho en la calidad del motor.

9.- Ventiladores.

En el caso de los motores cerrados con ventilación exterior, además de las partes ya descritas llevan un ventilador, el cual puede ser de plástico o de aluminio, clasificándose en bidireccionales ó unidireccionales para 2 polos, usados en los tamaños más grandes.

10.- Caja de conexiones.

Esta es una pieza que da protección mecánica a las terminales y se construye de fundición de hierro o de aluminio.

Las demás piezas que constituyen el motor son partes común y corrientes, como son:

- Tornillería
- Pintura
- Grasa
- Empaques
- Placas descriptivas
- Etc.

5.3 PRINCIPIOS DE OPERACION

5.3.1 Motor de corriente alterna.

Como ya se ha mencionado anteriormente, las partes principales de un motor eléctrico son el estator o armazón fija y el rotor o parte giratoria. El movimiento rotatorio es producido por la integración de los campos magnéticos del estator y el rotor. Esto puede entenderse aplicando la ley fundamental del magnetismo, la cual especifica que polos iguales se repelen y polos desiguales se atraen.

En la figura 5.1, se muestra esquemáticamente el estator de un motor de corriente alterna trifásica, donde se indica la manera en la cual los alambres de cada fase son devanados alrededor de polos sucesivos

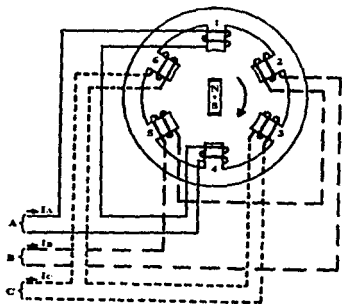


Figura 5.1 Estator de un motor de corriente alterna trifásico.

En la figura 5.2, se tiene también en forma esquemática un ciclo completo de una corriente alterna trifásica de 60 ciclos por segundo, por lo tanto, se ilustra un ciclo de 1/60 de segundo.

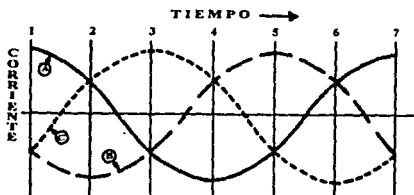


Figura 5.2 Ciclo completo de una corriente alterna trifásica de 60 ciclos por segundo.

En esta figura 5.2, se ve que la fase A está en su mayor intensidad positiva en el tiempo 1 y por lo tanto, produce el máximo campo magnético en los polos del estator en 1 sur y en 4 norte (figura 5.1).

Si el rotor consiste de una simple "barra magnética" (imán) montada sobre la flecha, es evidente que el polo norte de la barra es atraído por el polo sur del estator y por supuesto, el polo sur de la barra por el polo norte del estator.

Siguiendo la figura 5.2 se ilustra que en el tiempo 2, al disminuir la magnitud de la corriente de la fase A también disminuye la intensidad de los polos magnéticos 1 y 4, encontrándose que la fase B en este tiempo tiene su mayor intensidad negativa y tiene excitados a los polos 2 en sur y 5 en norte.

Este nuevo campo magnético atraerá la barra magnética del rotor a una nueva posición en línea con los polos 2 y 5.

En el tiempo 3, la fase C llega a su máximo valor positivo y produce que los polos 3 y 6 lleguen a su máxima excitación en sur y norte respectivamente, atrayendo a la barra a su nueva posición en línea con los polos 3 y 6.

Continuando en la misma forma, al final del ciclo el rotor magnético completará una revolución. Ya que un ciclo y una revolución se realizan en 1/60 de segundo, la velocidad de este motor en R.P.M. es evidentemente $60 \times 60 = 3600$, y como cada fase tiene 2 polos, el motor, por lo tanto, es conocido como motor de dos polos; de donde se deriva que la fórmula de la velocidad de sincronismo es:

$$N_s = \frac{120f}{P} \text{ [RPM]}$$

donde:

f = Frecuencia (Hertz)

P = Número de polos

RPM = Revoluciones por minuto

5.3.2 Motor de inducción jaula de ardilla

La operación eléctrica de un motor de inducción jaula de ardilla parte de los conceptos anteriores, ya que el estator tiene el mismo funcionamiento excepto que las bobinas incrustadas en las ranuras crean definitivos polo norte y polo sur. Estos polos son fuertes o débiles dependiendo de la elevación y caída de la corriente como en la figura 5.2. El magnetismo efectivo de estos polos se encuentra girando alrededor del estator dependiendo de que los polos sucesivamente, alcancen su máximo o mínimo y esto da origen al campo magnético giratorio (figura 5.3).

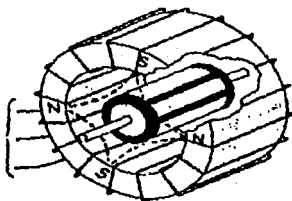


Figura 5.3 Esquema de un motor de inducción jaula de ardilla.

La operación eléctrica del rotor es diferente ya que la laminación del acero eléctrico, no tiene magnetismo permanente, sino que el campo magnético giratorio del estator induce un voltaje en la jaula de ardilla del rotor. Este voltaje ocasiona que circulen altas corrientes por las barras de la jaula de ardilla y se induzcan en el rotor campos magnéticos con sus correspondientes polos norte y sur. Siendo la interacción de los campos del estator y del rotor, lo que produce el PAR en el motor.

Un voltaje continuo estará inducido en el rotor, permitiendo que los conductores del mismo continúen siendo cortados por las líneas de flujo magnético del campo del estator, dando como resultado que el rotor gire a una velocidad ligeramente menor que la velocidad de sincronismo del campo magnético giratorio del estator, la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del motor o rotor es llamado deslizamiento (S) y es expresado como un porcentaje de la velocidad de sincronismo, quedando como sigue:

$$\% S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100$$

donde:

N_s = es la velocidad sincrónica de las ondas de fuerza magnetomotriz.

N_r = es la velocidad del rotor, que depende principalmente de la carga.

El deslizamiento máximo permisible es del 15%.

La definición de par será detallada más adelante, pero es necesario señalar que la magnitud del par producida por la interacción magnética de los campos depende de varios factores pero, en cualquier motor, el par es principalmente una función del deslizamiento. Es importante tener en cuenta que todo motor de inducción debe tener deslizamiento para producir el PAR.

Si se estudia el motor de inducción de una manera semejante al transformador, es posible considerar el devanado del estator como el circuito primario y al devanado del rotor como el circuito secundario.

5.4 PARAMETROS USADOS

Para poder comprender la operación de cualquier motor, y en especial el que en este caso nos interesa que es el motor de inducción de jaula de ardilla, es necesario y deseable tener un conocimiento sencillo de la relación Par, Velocidad y Caballos de potencia, así como también de algunos otros parámetros útiles.

PAR (T). Se puede describir como una fuerza que tiende siempre a girar sobre un radio y normalmente, se expresa en Lb-Ft o Kg-m.

En un motor de inducción, el PAR A PLENA CARGA representa la fuerza giratoria que el motor debe desarrollar al llegar a la velocidad y potencia nominales de operación.

VELOCIDAD. El motor jaula de ardilla tiene básicamente, velocidad constante y como se vio anteriormente, la velocidad de sincronismo o del campo magnético está dada por:

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

donde: f = Frecuencia en Hz
P = Número de polos.

Pero la velocidad real del motor (como también ya se mencionó) está en función del deslizamiento (%S) quedando esta velocidad en RPM (Revoluciones por minuto) expresada como sigue:

$$\text{RPM} = N_s - N_s (\%S)$$

CABALLO DE POTENCIA (CP). Es la unidad en que normalmente se especifica la capacidad del motor y partiendo de los conceptos anteriores se puede definir como:

$$\text{CP} = \frac{T \times \text{RPM}}{5250}$$

donde:

T = Par en Lb-Pie
RPM = Revoluciones por minuto.

Despejando se tiene que el par (T) es:

$$T = \frac{5250 \times CP}{RPM}$$

Una regla fácil de recordar y sencilla, es que el par a plena carga de cualquier motor de 4 polos, 60 ciclos es aproximadamente 3 veces los CP.

En función de unidades, un Caballo de Potencia es equivalente a:

Sistema Inglés CP = 550 Lb-ft/seg

Sistema Métrico Decimal CP = 76 Kg-m/seg

FACTOR DE POTENCIA

Los circuitos de los motores de inducción son reactivos o inductivos y son aquellos en que la corriente (I) va retrasada en el tiempo con respecto a la tensión o voltaje (V) un cierto ángulo θ . El defasamiento está dado por el coseno de θ y es llamado factor de potencia.

$$FP = \cos \theta$$

Por lo tanto, evidentemente lo que más conviene es que el factor de potencia del motor se aproxime todo lo posible a 1, lo que significa que el ángulo de defasaje debe ser lo más reducido posible.

PAR DE ARRANQUE

También es conocido como par a rotor bloqueado y representa el esfuerzo de giro producido por el motor al instante de arrancar.

PAR MÁXIMO

Como su nombre lo indica, es el máximo par que el motor desarrollará al aplicarle el voltaje y frecuencia nominales.

EFICIENCIA

Es la calidad que tiene el motor para transformar la energía eléctrica en energía mecánica, matemáticamente se puede definir como:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida (CP)}}{\text{Potencia de entrada (Watts)}}$$

donde 1 CP = 746 Watts

También se puede expresar como sigue:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia entrada}}$$

Por lo tanto, es posible concluir que entre menores son las pérdidas, la eficiencia es mayor.

5.5 PRUEBAS COMERCIALES APLICADAS A UN MOTOR DE INDUCCION

Con el objeto de evitar al máximo que se puedan presentar posibles fallas durante la operación de los motores, se deben cubrir un mínimo de pruebas para poder garantizar que dichos motores cumplen con las especificaciones de diseño. Estas pruebas son las siguientes:

Corrida en Vacío.

Aquí se verifica que el motor arranque rápidamente; que su vibración esté dentro de lo que establecen las normas; que los baleros giren suavemente y sin ruidos, se checa el juego axial y finalmente que la ventilación sea correcta.

Lectura de Watts y Amperes en vacío.

Con el motor corriendo en vacío, se leen los watts de entrada, la corriente de línea y las RPM, lo que se compara con los límites establecidos con anterioridad en un motor prototipo. También aquí se verifica el balance de las fases del motor, prueba preliminar que se le debe haber realizado al estator después de conectado.

Rigidez dieléctrica (Megger).

Aquí se prueba el aislamiento del motor verificando que no esté aterrizado el devanado.

Potencial aplicado.

Esta prueba se efectúa para corroborar la resistencia del aislamiento y puede efectuarse de dos maneras: Una consiste en tomar dos veces el voltaje nominal más 1000 Volts y aplicarlo

durante 1 minuto. La otra forma es aplicando 2640 Volts durante un segundo. Cabe señalar que todas las terminales del motor deben estar en corto circuito antes de efectuarse la prueba.

Resistencia óhmica del devanado.

Esta prueba se realiza con un puente, y se utiliza para verificar que el valor de la resistencia entre terminales esté dentro de lo especificado por el diseño.

5.6 CIRCUITOS DEL MOTOR DE INDUCCION Y DIAGRAMAS VECTORIALES

El circuito de un motor de inducción es posible representarlo en forma semejante al circuito de un transformador debido a que se encuentra formado principalmente por dos devanados.

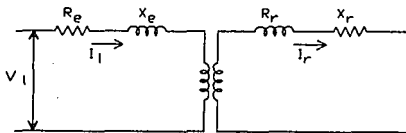
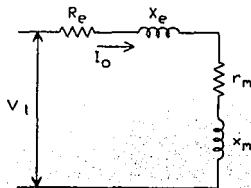


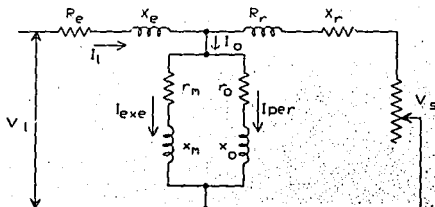
Figura 5.4 Circuito elemental.

El circuito elemental para el motor de inducción se puede representar de manera análoga al transformador por medio de circuitos equivalentes:

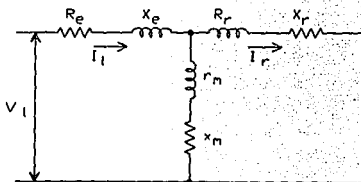
5.4a) Circuito equivalente en vacío



5.b) Circuito equivalente bajo carga

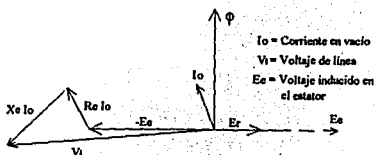


5.c) Circuito equivalente modificado bajo carga

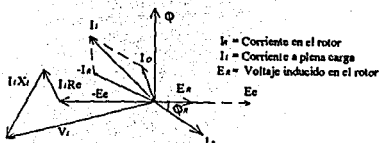


DIAGRAMAS VECTORIALES

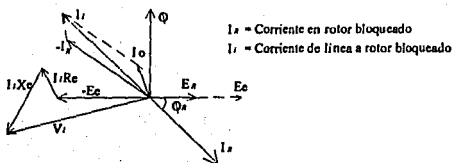
a) En vacío



d) A plena carga



e) A rotor bloqueado



5.7 DIAGRAMA CIRCULAR DEL MOTOR DE INDUCCION

El diagrama circular de un motor de inducción o diagrama de Heyland se traza a partir de los datos de prueba del motor, representando sus características. Procediendo en sentido contrario, es decir, a partir del diagrama circular, se pueden obtener las características.

1. En un sistema de coordenadas cartesianas se representan: la corriente reactiva sobre el eje de las ordenadas.
2. La corriente en vacío, cuya dirección está dada por el factor de potencia en vacío, se traza a partir del origen "O".
3. La corriente a rotor bloqueado, cuya dirección está dada por el factor de potencia a rotor bloqueado, se traza a partir del origen.
4. Se determinan las componentes (I_a e I_r), que son la corriente activa o corriente reactiva, a partir de la corriente a rotor bloqueado, y se indican en sus respectivos ejes.
5. Sobre la componente de corriente activa se marcan las pérdidas existentes (fricción, regulación y magnéticas).
6. Se traza una paralela al eje de corriente reactiva por el punto que indica las pérdidas constantes.
7. Se une el punto de unión de la paralela al eje y el arco I_o con el extremo de la I_o a rotor bloqueado (AC).
8. Se bisecta la recta de unión AC y se traza una horizontal normal hasta cortar la recta A.
9. Se traza por el origen I_{PC} del motor en su respectivo factor de potencia hasta cortar la circunferencia en el punto G.

10. Sobre la recta GH se marcan las pérdidas en el estator y rotor respectivamente (pérdidas en el cable).

OA = Corriente en vacío.
 OC = Corriente a rotor bloqueado.
 OE = Corriente reactiva.
 EC = Corriente activa.
 HI = Pérdidas.

Constantes.

JI = Pérdidas en el cobre del estator.
 JH = Pérdidas en el cobre del rotor.
 GK = Potencia de salida del motor.
 GH = Potencia de entrada del motor

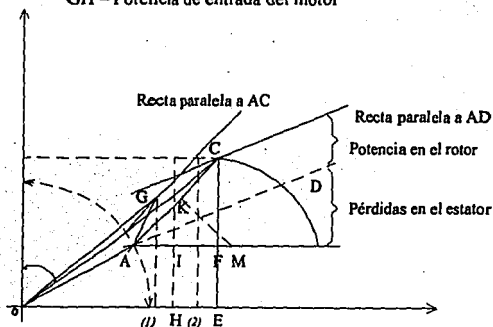


Figura 5.5 Diagrama circular del motor de inducción.

Estudiando los triángulos semejantes tenemos lo siguiente: DFA y JIA; JHO y CEO.

Se observa que DF es proporcional a las pérdidas en el estator y DC es proporcional a las pérdidas en el rotor.

La máxima potencia de salida se obtiene trazando una tangente a la circunferencia paralela a la recta AC.

El máximo par se obtiene trazando una tangente a la circunferencia paralela a la recta Ad.

$$\text{Eficiencia} = \frac{GK}{GH}$$

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

5.8 CONTROL DEL ARRANQUE DE LOS MOTORES JAULA DE ARDILLA

Los motores de inducción jaula de ardilla, son máquinas con una impedancia en su devanado estático, que permite su conexión directa a la red eléctrica sin el peligro de destruir sus devanados. Sin embargo, la corriente demandada si bien no perjudica al motor, si ocasiona perturbaciones en la red de alimentación, tanto por su intensidad como por el bajo factor de potencia con que es absorbida; sobre todo en máquinas de grandes capacidades. Esta situación y el hecho de que el par pueda tener efectos no deseados en la carga accionada, trae como consecuencia, el empleo de métodos de arranque, en los cuales la conexión del motor ya no se hace de manera directa a la red, sino a través de resistencias, reactancias, autotransformadores, etc. los cuales constituyen los métodos de arranque a tensión reducida.

En el caso particular de los motores del sistema Cutzamala, es posible efectuar el arranque a tensión plena ya que la red de alimentación es capaz de soportar las fluctuaciones momentáneas de voltaje ocasionadas por la corriente elevada que toma el motor durante el arranque esto gracias a la compensación reactiva con que se cuenta y a la fortaleza de esa área del sistema eléctrico, la cual cuenta con un buen soporte de generación.

Como ya se mencionó anteriormente, el motor de inducción jaula de ardilla en el momento del arranque a voltaje pleno, produce una corriente de arranque considerablemente más alta que la nominal (5 a 6 veces mayor). Sin embargo, los motores de inducción modernos se encuentran diseñados para soportar esas corrientes llevadas al arranque. Así mismo, el par desarrollado en este periodo, es de aproximadamente un 125% del par a plena carga.

La diferencia entre los métodos de arranque a tensión plena y a tensión reducida, se puede observar en las curvas típicas par-corriente contra velocidad que se muestran en la figura 5.6.

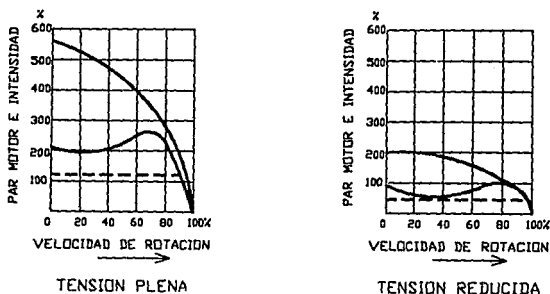


Figura 5.6 Curvas típicas que muestran las relaciones de par-intensidad al arranque a tensión plena y a tensión reducida. Las líneas sesgadas corresponden al par resistente durante la aceleración.

De manera concreta se tiene entonces que, un motor de inducción es posible arrancarlo conectándolo directamente a la línea de alimentación ó empleando algún método de arranque a tensión reducida, todo esto en base a el tipo de motor, las características de la carga y las condiciones de operación de la industria.

5.8.1 Arranque a tensión plena

Representa el método más sencillo de arranque para el motor de inducción en jaula de ardilla y consiste como ya se mencionó, en conectar dicho motor de manera directa a la línea de alimentación. Para lograr esto se pueden emplear dispositivos de arranque manuales (cuchillas) o magnéticos. Es el método de control más económico y es posible utilizarlo cuando la corriente demandada, no produce grandes perturbaciones en la red eléctrica y cuando la carga puede soportar el par de arranque.

5.8.2 Arranque a tensión reducida

Este método de arranque obedece a algunas de las siguientes razones:

Se desea disminuir la corriente de arranque demandada por el motor, o bien, acelerar suavemente la carga, esto es disminuir el par.

Existen varias formas o métodos para lograr el arranque a tensión reducida. Entre los principales se encuentran:

I) Resistencias primarias

II) Reactancias

III) Autotransformador

IV) Estrella-Delta

V) Devanado partido

En vista de que el método de arranque de los motores del sistema Cutzamala es a tensión plena, es en este caso el que nos interesa por lo que se describió un poco más y en cambio, para el arranque a tensión reducida, en esta ocasión nos es suficiente con conocer de manera muy superficial los métodos más comunes que se utilizan como lo son los anteriores.

5.9 PROTECCION DE LOS MOTORES DE INDUCCION

Durante el funcionamiento de cualquier motor eléctrico, suelen ocurrir diversas alteraciones del régimen normal, que pueden ocasionar daños no solo al motor sino también a la carga accionada e inclusive al operador. Es por esto que los motores deben tener dispositivos de protección, que aseguren su buen funcionamiento, desconectándolo de la red oportunamente al presentarse una perturbación.

Entre las causas más frecuentes de régimen anormales en los motores de inducción, se tienen: cortocircuitos, sobrecargas y disminución o desaparición de la tensión.

Cortocircuitos

Un dispositivo que proteja al motor, los conductores y a los circuitos de control de las sobrecorrientes debidas a cortocircuitos o fallas a tierra, debe ser incluido en todo controlador. Este dispositivo debe de abrir el circuito de alimentación en el instante en que se produzca la falla. Por supuesto debe ser capaz de permitir la corriente de arranque sin desconectar el motor.

Para proteger contra cortos circuitos y fallas a tierra, se pueden emplear fusibles o interruptores.

Sobrecargas

Como ya se ha mencionado, una sobrecarga es un aumento de la intensidad de corriente, que si bien no alcanza los valores de un cortocircuito, puede originar una elevación en la temperatura de operación del motor, provocando con ello el deterioro de los aislamientos.

Los dispositivos de protección que se emplean en este caso, son fusibles y relevadores de sobrecarga, que operando con características de tiempo inverso, desconectan al motor de la red cuando la sobrecarga sea excesiva o prolongada.

Con respecto al número de unidades de protección en los motores trifásicos, cabe mencionar que durante mucho tiempo se ha tenido la costumbre, de instalar dos sensores en dos cualquiera de las fases de alimentación. Esta práctica que no obedece tanto a razones técnicas, como a razones de espacio y economía no es recomendable, pues bajo ciertas condiciones el motor puede quedar desprotegido.

En la figura 5.7 se muestran los efectos de la apertura de una fase en el primario, de un transformador durante la operación de un motor. Como resultado una de las fases de éste, puede llevar el doble de la corriente de las otras dos y si no se protege, la operación bajo estas condiciones podría resultar peligrosa.

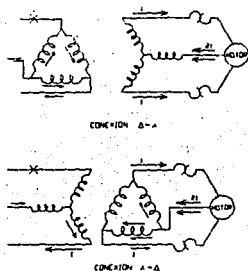


Figura 5.7 Efectos de la apertura en una fase en un transformador con el motor en operación

Baja tensión

Muchos sistemas eléctricos de potencia están sujetos a ocasionales caídas de tensión o a la pérdida de ésta, debido a cortocircuitos, líneas sobrecargadas u otras condiciones anormales. Al presentarse estas alteraciones, el motor debe ser desconectado de la red.

El uso de circuitos de dos hilos en los arrancadores magnéticos garantiza la desconexión inmediata, porque al no tener la bobina del contactor principal en sus bordes la tensión nominal, no podrá mantener enclavados los contactos.

En el caso anterior al instante en que las condiciones normales se restauren, el motor es conectado automáticamente. Sin embargo en algunos procesos un arranque súbito del motor puede dañar la carga ó al operador. Para evitarlo, se pueden utilizar circuitos de tres hilos, en los que se hace necesaria la presencia de un operador que pulse el botón de arranque para iniciar la operación.

5.10 MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCION EN EL PSS/E

Los motores de inducción son los más utilizados por sus características de funcionamiento y bajo mantenimiento.

Datos y circuito equivalente del motor

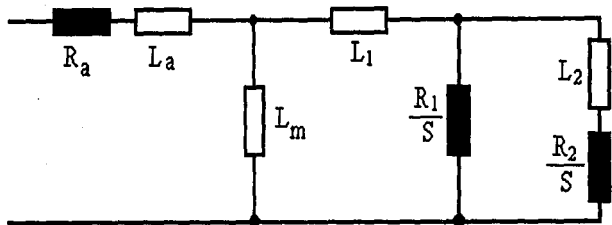


Figura 5.8 Circuito equivalente para representar al motor de inducción.

Los parámetros del motor de inducción usualmente se determinan a partir de los datos siguientes:

- Par nominal y deslizamiento
- Potencia nominal y factor de potencia
- Par de arranque y corriente de arranque
- Factor de potencia en el arranque
- Par máximo

La mayoría de los datos requeridos del circuito equivalente, son obtenidos de los datos de placa y otros datos disponibles como pueden ser curvas de arranque del motor, en las cuales se observa el comportamiento del par, de la corriente y del factor de potencia, todo en función de la velocidad del motor.

La estimación de los datos del circuito equivalente puede ser manejada mediante el uso del programa soporte IMD (Induction Motor Data), el cual permite al usuario, proponer datos en circuitos equivalentes de prueba y calcular los correspondientes curvas de operación del motor. El procedimiento de operación para IMD está dado en la tabla 5.1 y un diálogo de ejemplo de una corrida del programa IMD se muestra como una sesión de trabajo.

TABLA 5.1

OPERACION DEL PROGRAMA DE ESTIMACION DE DATOS DEL MOTOR DE INDUCCION (IMD)

1. Arrancar el programa tecleando el comando IMD.
2. Seleccionar velocidad o deslizamiento como variable independiente o salida del programa.
3. Se requiere escribir:
 - Voltaje en terminales, ETERM
 - Corriente máxima esperada (para determinar rango de salida)
 - Par máximo esperado (para determinar rango de salida)
 - Modelo de motor en uso.

4. Es necesario escribir valores de:
 - RA resistencia de armadura
 - LA inductancia de armadura
 - LM inductancia magnetizante
 - R1 primera resistencia del rotor
 - L1 primera inductancia del rotor
 - R2 segunda resistencia del rotor
 - L2 segunda inductancia del rotor

Todos los valores se dan en por unidad sobre la base del motor.

Específicamente $R2 = L2 = 999$ para un motor con una sola jaula de ardilla

5. El programa imprime ETERM y RA mediante L2 en la terminal, y entonces tabula valores de velocidad, deslizamiento, corriente, par, factor de potencia y admitancia del motor para usos en flujos de carga. Todos los datos están en por unidad en base a la potencia en MVA del motor.
6. Es necesario escribir valores específicos de deslizamiento, MVA base del motor y del sistema y voltaje terminal para lograr una salida de la correspondiente admitancia del motor.
- 7.- El programa regresa al paso 2 para una nueva prueba.

El procedimiento para analizar el comportamiento del motor de inducción se realiza de la manera siguiente:

5.10.1 Obtención de los parámetros indicados en la figura 5.8.

A través del programa de soporte IMD, incluido en el PSS/E, se proponen datos del circuito equivalente y se calcula la curva que representa el comportamiento de operación del motor. Se compara esta curva con la disponible y si son similares, los datos utilizados en el circuito equivalente se aceptan como correctos. En caso de que la curva obtenida sea diferente a la proporcionada por el fabricante, se modifica alguno o algunos de los datos de entrada del circuito equivalente y nuevamente se efectúa la corrida, hasta que finalmente el usuario determina que la curva de comportamiento obtenida es la adecuada.

5.10.2 Comportamiento del motor de inducción.

El comportamiento del motor de inducción es posible analizarlo durante el periodo de arranque o bien, durante su operación ya en línea (ya en servicio). En ambos casos se deben proporcionar como datos de entrada, los indicados en su circuito equivalente. Para distinguir entre un caso y otro, se hace a través del valor del par del motor: se da el valor del par de arranque o bien el valor correspondiente a plena carga.

Establecer los parámetros del circuito equivalente requiere un proceso iterativo de ajuste de valores y verificar que tan cerca se está del parámetro dado y de las condiciones relacionadas del motor. Las siguientes indicaciones son de bastante ayuda cuando se desea considerar el motor de inducción.

- a) Cuando se ejecuta IMD para condiciones nominales, la corriente y el voltaje deben ser 1.0 por unidad. El par en condiciones nominales es menor que 1.0 p.u. Si por ejemplo, el par bajo condiciones nominales es 0.9 y el dato determinado del motor especifica un par de arranque de 135%, entonces en el IMD el par de arranque debe ser $0.9 * 1.35 = 1.215$.

- b) Estimación de L_a y L_l

$$L_a + L_l \approx 1 / (\text{corriente a rotor bloqueado en p.u.})$$

Se supone inicialmente que $L_a \approx L_l$

- c) Ajustar L_m para determinar el factor de potencia a plena carga.
- d) Especificar R_a inicialmente con un valor entre 0.01- 0.02, y entonces ajustar hasta determinar el factor de potencia en el arranque. Se observa que el factor de potencia en el arranque está dado aproximadamente por $(R_a + R_l) / (L_a + L_l)$

- e) Ajustar $R1$ para encontrar el par de arranque. Nótese que para un motor de jaula sencilla, el par de arranque está dado de manera aproximada por $I_s^2 R1$, donde I_s es la corriente de arranque. Nótese también que cada incremento de la resistencia del rotor, incrementa el par de arranque y también aumenta el deslizamiento a plena carga.
- f) Especificar $L2$ inicialmente para un rango de 0.04 - 0.05. Es probable que $L2$ tenga que ser incrementada para obtener la corriente de arranque que se desee y por su parte, por medio de $R1$ se puede variar el par de arranque hasta obtener el esperado.
- g) Ajustar $R2$ para determinar el deslizamiento a plena carga. El valor inicial debe ser lo más cercano posible al deslizamiento deseado. $L2$ puede requerir ser ajustado en combinación con $R2$.

Es importante observar que incrementando la resistencia del rotor, el par máximo disminuirá en relación al nominal y al par de arranque.

Con el propósito de observar la manera como se obtiene la curva de operación de un motor de inducción, se muestra a continuación una sesión de trabajo.

5.10.3 Ejemplo de aplicación

\$ IMD

PSS/E Versión 20

ENTER OUTPUT DEVICE CODE:

0 FOR NO OUTPUT	1 FOR CRT TERMINAL
2 FOR A FILE	3 FOR QMS PS2000
4 FOR QMS_PS800	5 FOR HARD COPY TERMINAL
6 FOR ALTERNATE SPOOL DEVICE: 1	

ENTER DESIRED CATEGORY:

0 FOR EXIT
1 FOR INITIAL SELECTIONS
2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
3 FOR PRINTING DEVICE
4 FOR SCALES
5 FOR TABULAR OUTPUT
6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 2

CURRENT MACHINE PARAMETERS ARE:

RA	LA	LM	R1	L1	R2	L2
0.0380	0.0830	3.0000	0.0550	0.0280	0.0110	0.0550

ENTER NEW RA, LA, LM, R1, L1, R2, L2: .0047 .114 3.7152 .029 .0994 .0105 .05

NEW MACHINE PARAMETERS ARE:

RA	LA	LM	R1	L1	R2	L2
0.0047	0.1140	3.7152	0.0290	0.0994	0.0105	0.0500

ENTER DESIRED CATEGORY:

0 FOR EXIT
1 FOR INITIAL SELECTIONS
2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
3 FOR PRINTING DEVICE
4 FOR SCALES
5 FOR TABULAR OUTPUT
6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 5

ETERM TYPE	RA	LA	LM	R1	L1	R2	L2
1.000 2	0.0047	0.1140	3.7152	0.0290	0.0994	0.0105	0.0500

SPEED	SLIP	CURRENT	TORQUE	PWR FACT	Y - MOTOR	
0.0000	1.0000	4.5034	0.3983	0.1096	0.4936	-4.4763
0.0200	0.9800	4.4980	0.4014	0.1104	0.4965	-4.4706
0.0450	0.9550	4.4911	0.4053	0.1114	0.5001	-4.4631
0.0700	0.9300	4.4839	0.4093	0.1123	0.5037	-4.4555
0.0950	0.9050	4.4765	0.4132	0.1133	0.5074	-4.4476
0.1200	0.8800	4.4689	0.4171	0.1143	0.5110	-4.4395
0.1450	0.8550	4.4610	0.4210	0.1153	0.5145	-4.4312
0.1700	0.8300	4.4529	0.4250	0.1164	0.5181	-4.4226

ETERM TYPE	RA	LA	LM	R1	L1	R2	L2
1.000 2	0.0047	0.1140	3.7152	0.0290	0.0994	0.0105	0.0500

GENERALIDADES SOBRE EL MOTOR DE INDUCCION Y SU REPRESENTACION EN EL SIMULADOR PSS8

SPEED	SLIP	CURRENT	TORQUE	PWR FACT	Y - MOTOR	
0.1950	0.8050	4.4445	0.4289	0.1174	0.5217	-4.4138
0.2200	0.7800	4.4360	0.4329	0.1184	0.5254	-4.4048
0.2450	0.7550	4.4272	0.4369	0.1195	0.5290	-4.3955
0.2700	0.7300	4.4181	0.4409	0.1206	0.5326	-4.3859
0.2950	0.7050	4.4089	0.4450	0.1216	0.5363	-4.3761
0.3200	0.6800	4.3994	0.4491	0.1228	0.5401	-4.3661
0.3450	0.6550	4.3897	0.4533	0.1239	0.5439	-4.3559
0.3700	0.6300	4.3798	0.4577	0.1251	0.5479	-4.3454
0.3950	0.6050	4.3697	0.4623	0.1263	0.5520	-4.3347
0.4200	0.5800	4.3594	0.4670	0.1276	0.5564	-4.3238
0.4450	0.5550	4.3490	0.4721	0.1290	0.5610	-4.3126
0.4700	0.5300	4.3383	0.4776	0.1305	0.5660	-4.3012
0.4950	0.5050	4.3276	0.4836	0.1321	0.5716	-4.2896
0.5200	0.4800	4.3166	0.4902	0.1338	0.5777	-4.2778
0.5450	0.4550	4.3056	0.4976	0.1358	0.5847	-4.2657
0.5700	0.4300	4.2944	0.5060	0.1380	0.5927	-4.2533
0.5950	0.4050	4.2830	0.5158	0.1406	0.6020	-4.2405
0.6200	0.3800	4.2715	0.5272	0.1435	0.6130	-4.2273
0.6450	0.3550	4.2598	0.5408	0.1470	0.6261	-4.2136
0.6700	0.3300	4.2478	0.5571	0.1511	0.6419	-4.1990
0.6950	0.3050	4.2354	0.5770	0.1561	0.6613	-4.1834
0.7200	0.2800	4.2223	0.6015	0.1623	0.6853	-4.1663
0.7450	0.2550	4.2083	0.6320	0.1700	0.7152	-4.1471
0.7700	0.2300	4.1927	0.6706	0.1797	0.7533	-4.1245
0.7950	0.2050	4.1746	0.7203	0.1922	0.8022	-4.0968
0.8200	0.1800	4.1524	0.7852	0.2086	0.8663	-4.0610
0.8450	0.1550	4.1229	0.8720	0.2309	0.9518	-4.0116
0.8700	0.1300	4.0804	0.9907	0.2620	1.0690	-3.9378
0.8950	0.1050	4.0116	1.1579	0.3075	1.2335	-3.8173
0.9200	0.0800	3.8846	1.3974	0.3780	1.4683	-3.5964
0.9450	0.0550	3.6051	1.7243	0.4952	1.7854	-3.1320
0.9700	0.0300	2.8440	1.9430	0.6965	1.9810	-2.0406
0.9950	0.0050	0.6910	0.5931	0.8615	0.5953	-0.3508
1.0000	0.0000	0.2612	0.0000	0.0012	0.0003	-0.2612

ENTER DESIRED CATEGORY:

- 0 FOR EXIT
- 1 FOR INITIAL SELECTIONS
- 2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
- 3 FOR PRINTING DEVICE
- 4 FOR SCALES
- 5 FOR TABULAR OUTPUT
- 6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
- 7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
- 8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 4

OLD SPEED MIN,MAX = 0.0, 1.0
 ENTER YES OR 1 TO CHANGE IT (-1 TO EXIT): -1

OLD TORQUE MIN,MAX = 0.000, 5.000
 ENTER YES OR 1 TO CHANGE IT (-1 TO EXIT): 1
 ENTER NEW TORQUE MIN,MAX: 0 2

OLD CURRENT MIN,MAX = 0.000, 10.000
 ENTER YES OR 1 TO CHANGE IT (-1 TO EXIT): 1

ENTER NEW CURRENT MIN,MAX: 0 5
 OLD POWER FACTOR MIN,MAX = 0.00, 1.00
 ENTER YES OR 1 TO CHANGE IT (-1 TO EXIT): -1

ENTER DESIRED CATEGORY:
 0 FOR EXIT
 1 FOR INITIAL SELECTIONS
 2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
 3 FOR PRINTING DEVICE
 4 FOR SCALES
 5 FOR TABULAR OUTPUT
 6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
 7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
 8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 6

SUPPORTED PLOTTING DEVICES ARE:

0 = NONE	2 = HP 7221A
15 = APOLLO - FRAME WINDOW	16 = APOLLO - BORROW MODE
27 = HP 7470A	28 = HP 7475A
34 = APOLLO - DIRECT WINDOW	35 = APOLLO - BITMAP FILE
38 = HP-GL FILE	41 = POSTSCRIPT
99 = INDE. PLOT FILE	

ENTER DESIRED PLOTTING DEVICE: 16 -----> se observa en la terminal

ENTER DESIRED CATEGORY:
 0 FOR EXIT
 1 FOR INITIAL SELECTIONS
 2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
 3 FOR PRINTING DEVICE
 4 FOR SCALES
 5 FOR TABULAR OUTPUT
 6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
 7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
 8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 6

SUPPORTED PLOTTING DEVICES ARE:

0 = NONE	2 = HP 7221A
15 = APOLLO - FRAME WINDOW	16 = APOLLO - BORROW MODE
27 = HP 7470A	28 = HP 7475A
34 = APOLLO - DIRECT WINDOW	35 = APOLLO - BITMAP FILE
38 = HP-GL FILE	41 = POSTSCRIPT
99 = INDE. PLOT FILE	

ENTER DESIRED PLOTTING DEVICE: 41 -----> se manda la gráfica a un archivo

ENTER NUMBER OF COPIES (0 TO 5), DEVICE NAME FOR PS DEVICE: 1

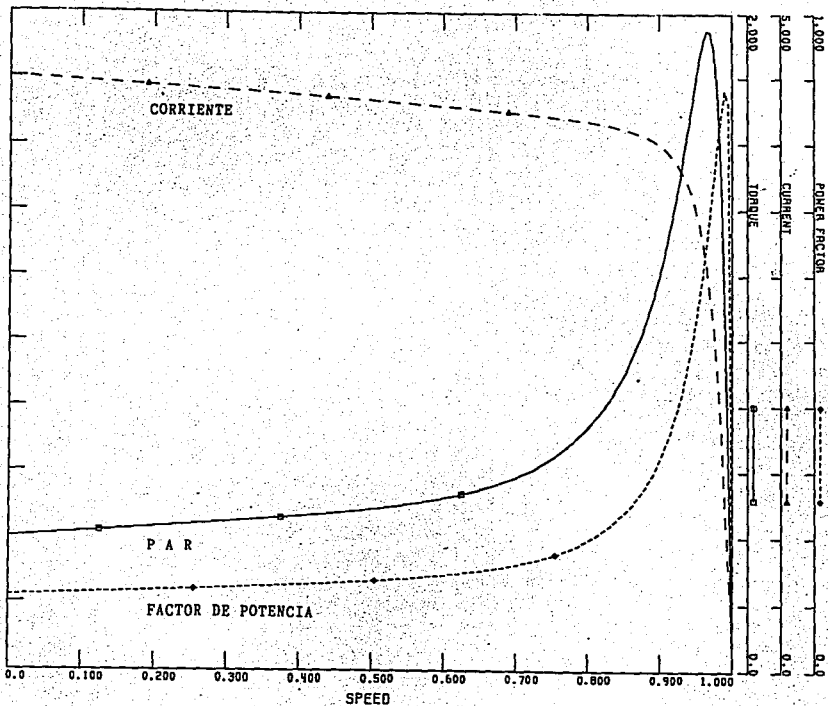
ENTER DESIRED CATEGORY:
 0 FOR EXIT
 1 FOR INITIAL SELECTIONS
 2 FOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
 3 FOR PRINTING DEVICE
 4 FOR SCALES
 5 FOR TABULAR OUTPUT
 6 FOR GRAPHICAL OUTPUT
 7 FOR FLUX MODEL PARAMETERS
 8 FOR INDIVIDUAL CURVE POINTS: 0

En seguida se muestra la gráfica obtenida y la proporcionada por el fabricante.

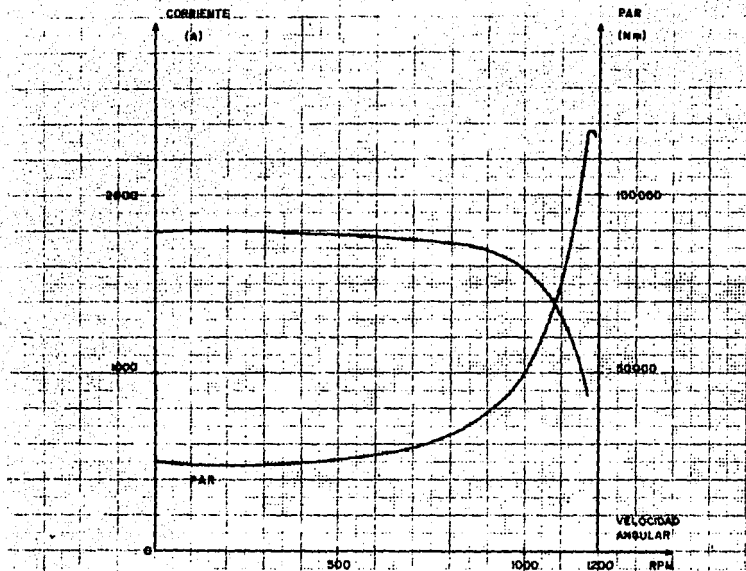


INDUCTION MOTOR CURVES


ELEM 1.0000
TYPE 2
RR 0.0097
LR 0.1140
LK 3.7152
R1 0.0290
L1 0.0994
R2 0.0105
L2 0.0500



7290 KW Y 7960 KW - 13200V - 1200 RPM



PLANTA DE BOMBEO No. 1 COLORINES
 PLANTA DE BOMBEO No. 5 VILLA VICTORIA

ETABLISSEMENT		MODIFICATIONS	
 JEUMONT SCHNEIDER		A 4	DOCUMENT N°
		CH 280 E	6AB0336
Date d'édition	25/05/77	PAGE N°	Nombre de pages

5.11 ANALOGIA EXISTENTE ENTRE EL MOTOR DE INDUCCION Y EL TRANSFORMADOR

Para poder establecer la analogía entre ambos elementos, partamos de la deducción del circuito eléctrico del transformador.

En el desarrollo completo del circuito de un transformador real puede utilizarse la teoría del transformador ideal como base y adicionalmente tomar en cuenta las resistencias de los devanados, el flujo magnético disperso y la corriente de excitación. Algunas veces también la capacitancia de los devanados debe tomarse en cuenta, sobre todo ante fenómenos rápidos, por ejemplo: switcheos. Se puede obtener el circuito equivalente en base a un razonamiento físico (prueba de laboratorio) fundamentada en las leyes que rigen el comportamiento de cada parte involucrada. El flujo mutuo total encadenado por el devanado primario puede descomponerse en dos componentes: uno será el flujo mutuo encadenado por ambos circuitos y otro será el flujo disperso (flujo que tiene como trayectoria el aire), el cual será encadenado únicamente por el devanado primario.

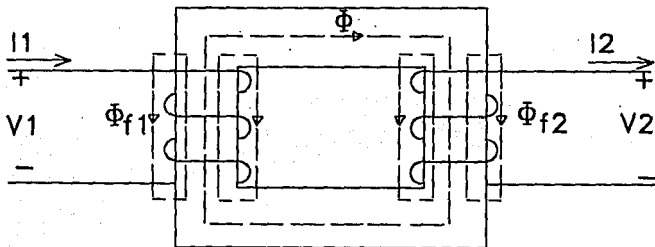


Figura 5.10 Trayectoria del flujo encadenado y disperso en un transformador.

Debido a que la trayectoria del flujo disperso Φ_{f1} no es ferromagnética, éste variará en forma lineal a la corriente I_1 . Asociado al flujo Φ_{f1} se tendrá una reactancia que se le conoce como reactancia de dispersión (X_{R1}). De igual manera se tendrá un flujo magnético de dispersión en el devanado secundario. Las reactancias de dispersión, las resistencias de los devanados y la corriente de excitación, nos sugieren el siguiente circuito:

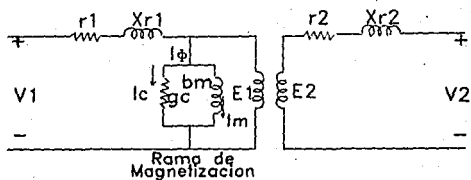


Figura 5.11 Circuito equivalente de un transformador ideal .

De la teoría del transformador ideal podemos establecer que:

$$I_1' = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

y podemos tomarla como la corriente de carga vista en el lado primario. La corriente de excitación, se dividió en las dos componentes mencionadas anteriormente, una modelada como una conductancia para considerar las pérdidas en el núcleo (pérdidas de Eddy e Histeresis) y la otra como una susceptancia para modelar la corriente de magnetización (sin pérdidas). Los valores de los parámetros del circuito pueden obtenerse de pruebas de laboratorio, siendo las principales las de circuito abierto y las de corto circuito.

Por diseño se asumen constantes g_c y b_m en los rangos de operación del transformador, pero en general se puede apreciar que estas dependen de las condiciones de operación; principalmente de la frecuencia y voltajes nominales.

5.11.1 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO.

El circuito de la figura anterior puede simplificarse grandemente si la rama de magnetización se "traslada" del lado izquierdo de la impedancia compuesta por $r_1 + jX_{L1}$, con lo cual nos quedaría el circuito de la siguiente forma:

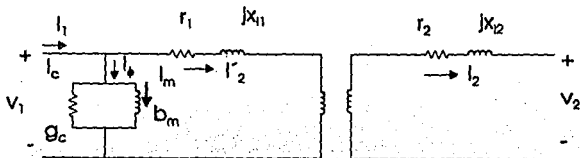


Figura 5.12 Traslado de la rama de magnetización

Ahora bien si la impedancia $r_2 + jX_{L2}$ se refiere al lado primario tendremos:

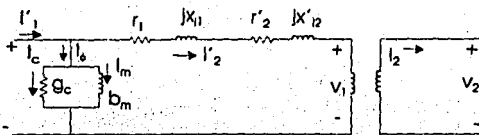


Figura 5.13 Impedancia $r_2 + jX_{L2}$ referida al primario.

o bien:

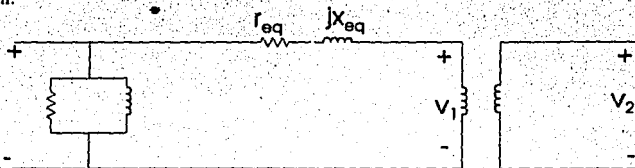


Figura 5.14 Reducción de parámetros del primario.

Además, dado que la corriente de excitación es muy pequeña comparada con la de la carga (o carga nominal) generalmente se desprecia, lo que nos reduciría al circuito siguiente:

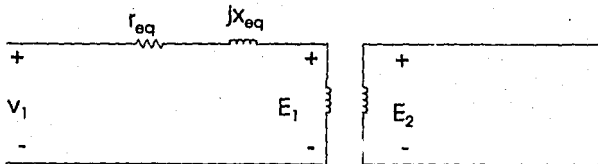


Figura 5.15 Circuito representativo del transformador.

A $r_{eq} + jX_{eq}$ se le conoce como impedancia de corto circuito. Para muchos estudios r_{eq} se desprecia y comúnmente sucede que por falta de información se estima como un por ciento de la reactancia (jX_{eq}) que es la que generalmente se conoce.

5.12. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCION.

Para desarrollar el circuito equivalente completo para el motor de inducción comercial de jaula de ardilla o para el motor de inducción con rotor devanado, necesitamos un circuito que permita calcular las corrientes tanto del estator como del rotor.

Afortunadamente tenemos ése modelo de circuito en el transformador convencional, acoplado débilmente, como se muestra en la siguiente figura, en la cual el subíndice "1" representa parámetros del primario y el "2" parámetros del secundario. El símbolo R_h representa a las pérdidas en el núcleo y la reactancia mutua esta representada por JX_m . La letra griega α representa al factor por el que se refleja la impedancia del secundario al primario

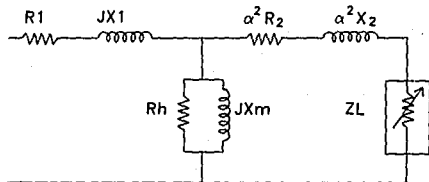


Figura 5.16 Circuito convencional del transformador .

De la misma forma, la siguiente figura muestra el circuito análogo del motor de inducción, del equivalente del transformador.

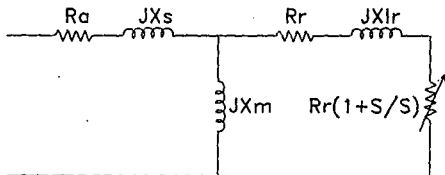


Figura 5.17 Circuito que muestra la analogía motor de inducción-transformador.

Observese primero que se omite la relación de vueltas, bajo la hipótesis de que tanto el rotor como el estator tienen el mismo número de vueltas, porque los valores de impedancia fueron calculados a partir de mediciones en el primario. En segundo lugar, el ramal que contiene a JX_m no muestra el factor R_h de pérdidas en el núcleo. Esto es aceptable porque además de pérdidas en el núcleo, el motor tiene pérdidas de fricción y pérdidas por cargas parásitas. Se miden estas por separado en una prueba sin carga (funcionamiento con carga ligera) y se pueden determinar para cualquier motor, como parte de sus parámetros.

Cuando existe una inducción mutúa entre dos bobinas, un cambio en la corriente que pasa por uno de ellos induce un voltaje en el otro. Todos los transformadores tienen un devanado primario y uno o más secundarios. El devanado primario recibe energía eléctrica de una fuente de alimentación y acopla esta energía al devanado secundario mediante un campo magnético variable. La energía toma la forma de una fuerza electromotriz que pasa por el devanado secundario y, si se conecta una carga a éste, la energía se transfiere a la carga. El circuito representativo del transformador se ilustra a continuación:

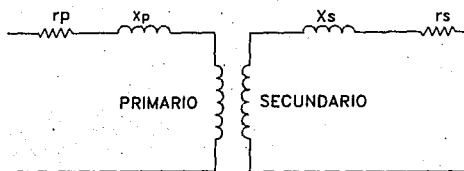


Figura 5.18 Circuito representativo del transformador.

r_p y r_s es la resistencia del conductor utilizado en el primario y secundario respectivamente.

X_p y X_s se refieren a la reactancia existente en el primario y secundario como producto del campo magnético del conductor al ser energizado.

Cuando se aplica potencial al estator de un motor de inducción, se establece un campo magnético giratorio, conforme a los métodos que se han estudiado hasta aquí. Cuando el campo comienza a girar sus líneas de flujo cortan las barras de corto circuito que están alrededor de la superficie del rotor de jaula de ardilla y genera voltajes en ella por inducción electromagnética. Puesto que estas barras están en corto circuito con una resistencia muy baja, los voltajes inducidos en ellas producen elevadas corrientes que circulan por dichas barras del rotor. Las corrientes circulantes del rotor producen a su vez, sus propios campos magnéticos intensos. Estos campos locales de flujo del rotor producen sus propios polos magnéticos que son atraídos hacia el campo giratorio. Por lo tanto, el rotor gira con el campo principal. En la siguiente figura se puede observar el circuito eléctrico equivalente al motor de inducción, que al igual que el transformador, consta esencialmente de dos devanados.

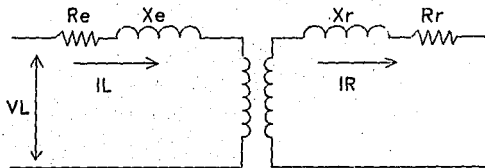


Figura 5.19 Circuito representativo del motor de inducción.

R_e y R_r representan la resistencia del estator y el rotor respectivamente.
 X_e y X_r representan la reactancia del estator como producto del campo magnético generado al energizar el circuito.

Con lo dicho anteriormente, se pueden establecer las analogías básicas entre motor de inducción y transformador, como sigue:

- 1) Tanto el motor de inducción como el transformador funcionan bajo el principio de inducción electromagnética.
- 2) El devanado primario, en el transformador, corresponde al estator en el motor de inducción.
- 3) El devanado secundario, en el transformador, corresponde al rotor en el motor de inducción.

CAPITULO VI

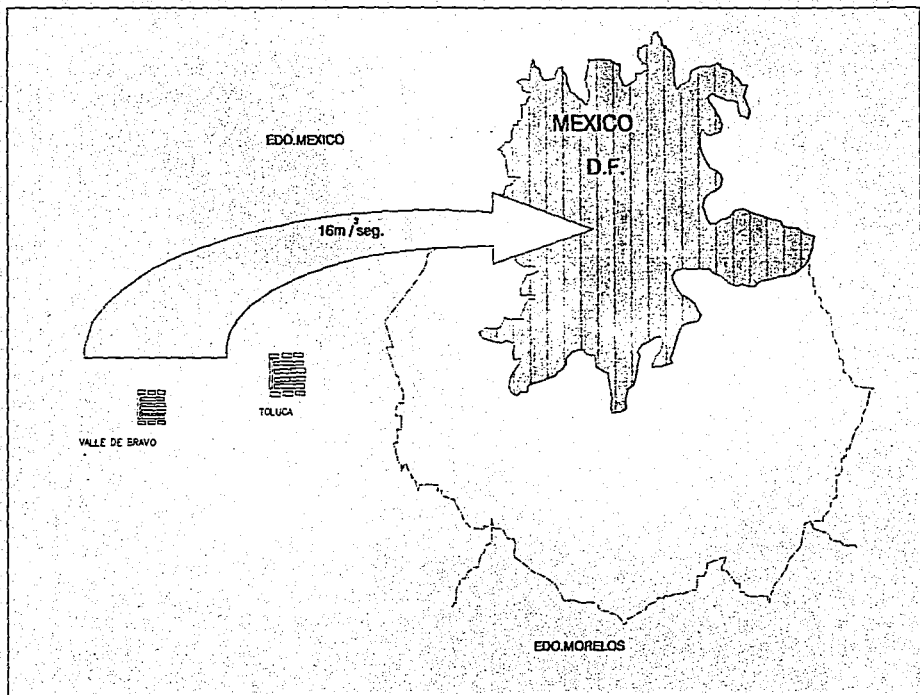
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DURANTE LA ETAPA DE ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA, CONSIDERANDO DIFERENTES CONDICIONES OPERATIVAS

6.1 RESUMEN

En este capítulo se presenta un informe de los estudios efectuados para analizar el comportamiento de los motores del Sistema de Bombeo Cutzamala, bajo condiciones operativas de emergencia en las cuales se contempla la pérdida del suministro eléctrico proveniente de la subestación Donato Guerra. Bajo estas circunstancias se consideran dos casos: con y sin la disponibilidad física del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra. Se incluyen conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a lo indicado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), se requiere garantizar el envío de un gasto de $16 \text{ m}^3 / \text{seg.}$ a la Cd. de México. Esto implica la operación de 4 motores en PB5, y de 2 motores en cada una de las plantas de bombeo PB2, PB3 y PB4; lo cual comprende una carga total de 109 MW. En la Tabla 6.1 se indican las capacidades nominales de estos motores.

Es importante señalar que, para establecer las características de funcionamiento de las plantas de bombeo del Sistema Cutzamala, se realizaron los estudios correspondientes en cada motor. Sin embargo, se debe considerar que, para nuestro estudio no es necesario reportar la información de todos los motores, ya que sería muy repetitivo. Debido a esto sólo se proporcionan los análisis efectuados en algunos motores. Aquellos considerados modelo en el presente trabajo.



SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA
DATOS DE MOTORES Y BOMBAS

PARAMETRO		PLANTA DE BOMBEO No.							
		1	2	3	4	5	5A	6	
MOTOR CAPACIDAD NOMINAL	HP	10 675	7 443	22 118	22 118	10 675	4 251	5 632	
	KW	7 960	5 330	16 500	16 500	7 960	3 170	4 200	
	MVA	8.844	6.167	18.132	18.132	8.844	3.483	4.616	
VOLTAJE NOMINAL		KV	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	4.16	13.2
CORRIENTE NOMINAL		AMP	397.5	270	813	813	397.5	499	280
FACTOR DE POTENCIA			0.9	0.9	0.91	0.91	0.9	0.91	0.91
PAR NOMINAL		H-M	63 525	44 300	131 600	131 600	63 525	16 925	
VELOCIDAD		RPM	1 196	1 196	1 197	1 197	1 197	1 708	1 792
MOMENTO DE INERCIA (GD ²) KG-M ²			5 150	4 160	10 400	10 400	5 150	557	1 144
CONSTANTE DE INERCIA (KW-SEG)/KVA			1.142	1.32	1.126	1.126	1.142	0.7	1.09
TIEMPO DE ARRANQUE		Seg.							
CORRIENTE DE ARRAN.		AMP	1 789	1 300	4 020	4 020	1 789	2 295	1 080
Arranque / Inominal			4.5	4.67	4.95	4.95	4.5	4.6	5.2
PAR DE ARRANQUE		N-M	25 400	17 000	58 000	58 000	25 400	11 500	
PAR MAXIMO		H-M	120 700	85 300	250 000	250 000	120 700	33 850	
OHMS/FASE A 60 Hz	Ra		0.10	0.17	0.039	0.039	0.10	0.033	0.203
	La		2.02	3.90	1.40	1.40	2.82	0.60	5.23
	Xm		80	110	53	53	80	26	166
	Ri		0.053	0.073	0.023	0.023	0.053	0.030	0.16
	Li		2.14	2.67	1.09	1.09	2.14	0.67	3.125
MARCA			JEUMONT - SCHNEIDER						
No. DE SERIE			166-90-6	166-68-6	172-165-6	172-165-6	166-90-6	630-C4	
NUMERO DE MOTORES			5	6	6	6	6	3	3
BOMBA	GASTO/BOMBA M ³ /S		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	1.7	1.6
	MOMENTO INERCIA (GD ²) KG/M ²		1 225	1 070	1 320	1 320	1 225	50	120
	CONSTANTE INERCIA (KW-SEG) / KVA		0.272	0.340	0.143	0.143	0.272	0.063	0.151
	M A R C A			C C M S U L Z E R					
	NUMERO DE SERIE			750-945	800-865	700-1010	700-1010	750-945	500-620

T A B L A G.1

6.1.1- CONDICIONES NORMALES DE OPERACION

En condiciones normales de operación, no existe problema alguno para efectuar el arranque satisfactorio de los motores instalados en el Sistema de Bombeo Cutzamala. La subestación Donato Guerra posee la robustez suficiente para satisfacer los requerimientos de soporte de voltaje durante el proceso de arranque de los motores.

6.1.2- CONDICIONES DE OPERACION EN ESTADO DE EMERGENCIA

Como medida preventiva ante una contingencia mayor, en la que no se dispusiera de la alimentación proveniente de la subestación Donato Guerra, se consideró necesario efectuar el análisis del comportamiento de los motores del Sistema de Bombeo Cutzamala durante su arranque operando bajo estas condiciones de emergencia. Para tal efecto, se consideraron las opciones de suministro eléctrico 2 y 3. Los casos de estudio fueron los siguientes:

Opción 2: Suministro eléctrico proporcionado por la central geotérmica Los Azufres

- Alimentación de la planta de bombeo PB5 considerando 4 motores de 7 960 KW cada uno; totalizando 31 840 KW. Se analizaron dos casos: con y sin la disponibilidad física del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.

Opción 3: Suministro eléctrico proporcionado por las unidades del Sistema Miguel Alemán.

- Alimentación de las plantas de bombeo PB2, PB3 y PB4; considerando 2 motores por planta. Esto es, una carga total de 77 100 KW. Se analizaron dos casos: con y sin la disponibilidad física del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.
- Alimentación de las plantas de bombeo PB2, PB3, PB4 y PB5; totalizando 63 500 KW de carga. Se consideró la disponibilidad física del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.

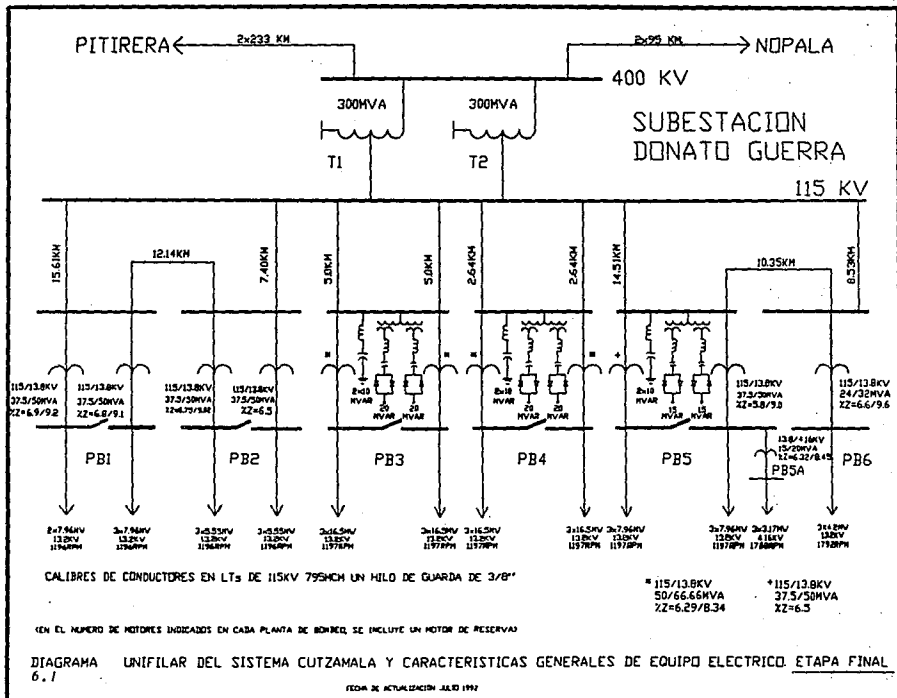
6.2 CONSIDERACIONES ASUMIDAS EN LOS ESTUDIOS.

- Se consideró la disponibilidad de por lo menos 6 unidades en la central geotérmica de los Azufres. Principalmente de la unidad 7 cuya capacidad nominal es 64 MVA.
- Con la finalidad de poder interconectar las centrales Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato (IXT, BBR y TIN, respectivamente) con las SE's de 115 KV del sistema de

bombeo, se asumió que los voltajes de generación pueden ser ajustados hasta con un valor mínimo de 0.9 pu, valor

que se consideró en todas las simulaciones. Por otra parte, se consideró que los transformadores de unidad instalados en estas centrales, pueden operar sin problema alguno en la posición de tap correspondiente a; 135 KV en las unidades de Santa Bárbara; y en 138.75 KV en las unidades de Ixtapantongo y Tingambato.

- Disponibilidad de la compensación capacitiva fija y dinámica actualmente existente en las plantas de bombeo PB3, PB4 y PB5; la cual se muestra en el diagrama 6.1.
- El arranque de los motores se efectuó de manera secuencial, de acuerdo a los requerimientos reales operativos del sistema de bombeo. Esto es, el 1er. motor en cada una de las plantas PB5, PB2, PB3 y PB4; el 2do. motor en las mismas plantas y en la misma secuencia; etc.
- Se consideró intencionalmente en las simulaciones las condiciones mínimas necesarias de generación, compensación reactiva y de líneas de transmisión; por representar éstas las condiciones operativas menos favorables.
- La incorporación de las unidades generadoras se realizó de acuerdo a los requerimientos de soporte en el nivel del voltaje, con el propósito de lograr que el arranque de los motores se efectuara en tiempos inferiores a 10 segundos, así como para satisfacer los incrementos de carga representados por los motores ya en línea.
- La entrada en operación de las unidades generadoras del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán se realizó en el siguiente orden: IXT-U1, BBR-U1, TIN-U1, IXT-U3, BBR-U2 y TIN-U2. Esto es, de acuerdo a como realmente se efectúa la secuencia de su incorporación.
- En la condición que contempla la *no disponibilidad* del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra., las plantas de bombeo PB2, PB3 y PB4 son alimentados por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán a través de su red de transmisión asociada, y la planta PB5 es alimenta por la central geotérmica de los Azufres vía Cd. Hidalgo-Zitácuaro-Donato Guerra.
- Previo al arranque del primer motor, tanto en las simulaciones efectuadas para el arranque de los motores alimentados por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, como para los motores alimentados por la central geotérmica de los Azufres; se consideró una carga inicial del orden de 20 MW.
- Respuesta adecuada de los sistemas de regulación de voltaje y velocidad de las unidades generadoras consideradas.



6.3 DESARROLLO

Los casos que fueron analizados se describen a continuación:

6.3.1 OPCION 2: PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA POR LA CENTRAL GEOTERMICA DE LOS AZUFRES

1- Considerando la condición de que se disponga del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.

2- Considerando la condición de que no se disponga del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.

6.3.2 OPCION 3: SUMINISTRO ELECTRICO PROPORCIONADO POR UNIDADES DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN.

1- Considerando la disponibilidad del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra.

2- Considerando que no existe disponibilidad del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra.

6.4 PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA POR LA CENTRAL GEOTERMICA LOS AZUFRES

6.4.1 CONSIDERANDO LA CONDICION DE QUE SE DISPONGA DEL BUS DE 115 KV DE LA SUBESTACION DONATO GUERRA.

Para llevar a cabo el arranque de motores bajo esta condición, no se tuvo inconvenientes debido a que los parámetros de funcionamiento del bus de la S.E Donato Guerra, no sufrieron alteraciones considerables que pudieran afectar la puesta en marcha de los motores. A continuación se proporcionan los resultados obtenidos:

6.4.1.1 CONDICIONES DE OPERACION EN ESTADO ESTABLE

Para determinar las condiciones de operación en estado estable de la red asociada, se consideraron en línea en PB5, los siguientes motores:

- 2 x 7960 KW
- 1 x 3170 KW

considerando la compensación reactiva capacitiva fija de 20 MVARs en PB5 en el nivel de 115 KV.

6.4.1.2 COMPORTAMIENTO DINAMICO

Para determinar el comportamiento del voltaje, potencia real y potencia reactiva durante el arranque secuencial de dos motores de 7960 KW en PB5; se tomaron en cuenta las siguientes condiciones:

a) Arranque del 1er. motor de 7960 KW

- Sin carga previa conectada en PB5
- Con banco de capacitores de 20 MVARs conectado

Se observó que el arranque del motor es satisfactorio.

b) Arranque del 4to. motor de 7960 KW

- Con carga previa conectada en PB5 de 7960 + 3170 KW
- Con banco de capacitores de 40 MVARs conectado

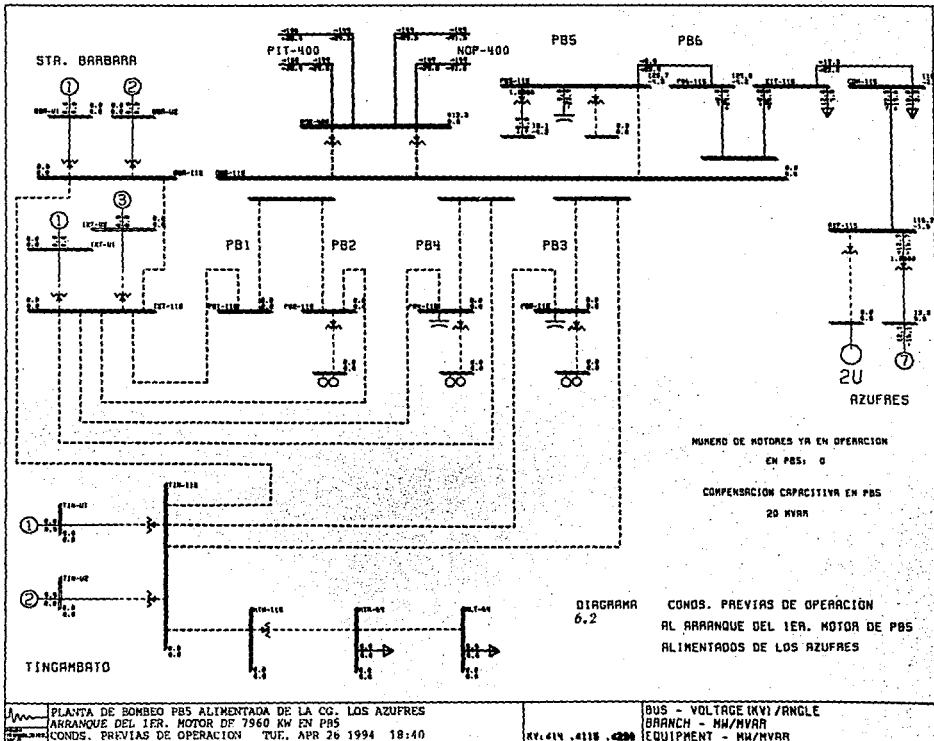
Se observó que el arranque del motor es satisfactorio.

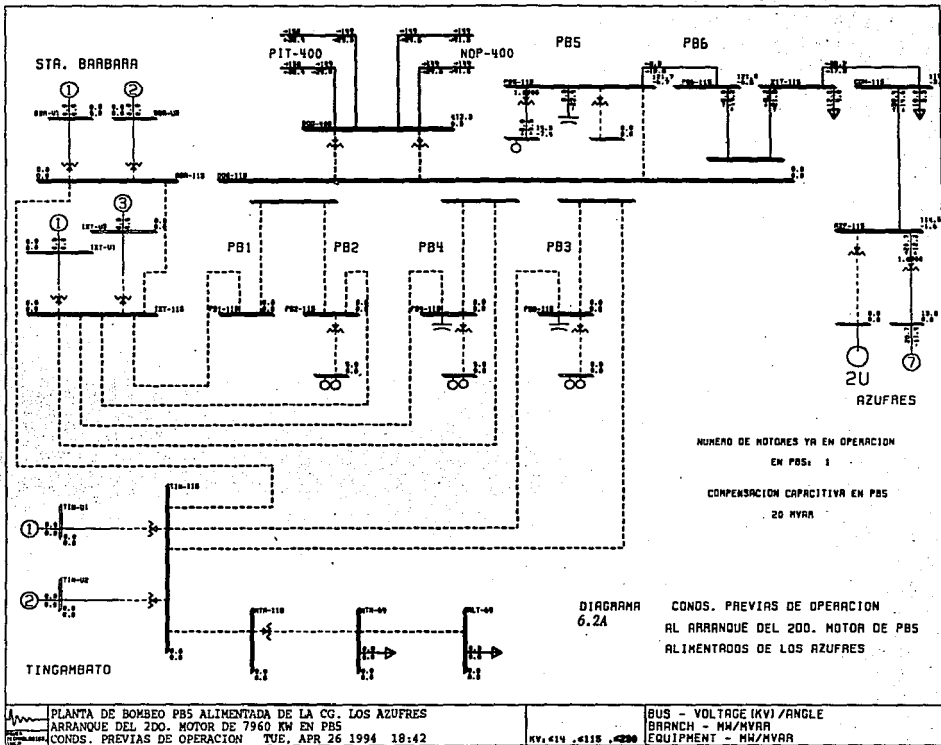
6.4.2 CONSIDERANDO LA CONDICION DE QUE NO SE DISPONGA DEL BUS DE 115 KV DE LA SUBESTACION DONATO GUERRA

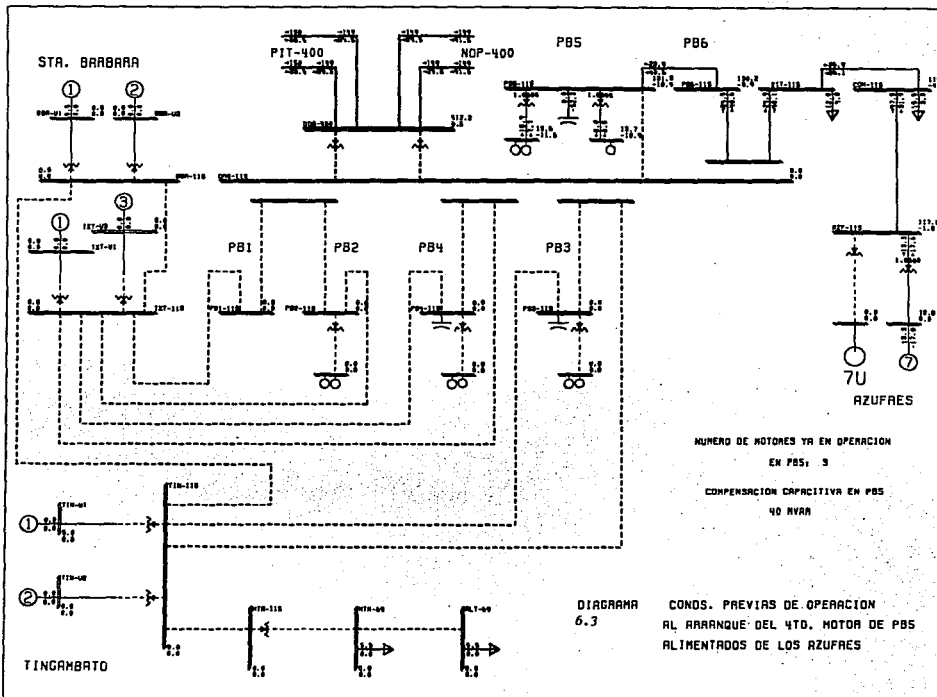
Bajo la pérdida del bus de la S.E Donato Guerra se tiene la codición más critica, debido a lo cual se efectuó el análisis con más detalle y, de esta manera, poder establecer las conclusiones dadas al final del presente capitulo. Los resultados obtenidos se proporcionan a continuación:

6.4.2.1 CONDICIONES DE OPERACION EN ESTADO ESTABLE

En los diagramas 6.2. y 6.3 se aprecian las condiciones de operación en estado estable de la red, previas al inicio del arranque del 1er. y 4to. motor de la planta PB5, alimentados por la central geotérmica Los Azufres. Por ejemplo, en el diagrama 6.2 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 1er. motor. En el diagrama 6.2a se muestran las condiciones operativas previas al arranque de segundo motor, lo cual, indica que el primer motor ya está funcionando. Este mismo procedimiento se siguió hasta arrancar el 4to. motor de la PB5. En el diagrama 6.3 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 4to. motor. En el diagrama 6.3a se muestran las condiciones operativas en estado estable considerando ya en operación los cuatro motores requeridos. Ver Tablas 6.2, 6.3 y 6.4.

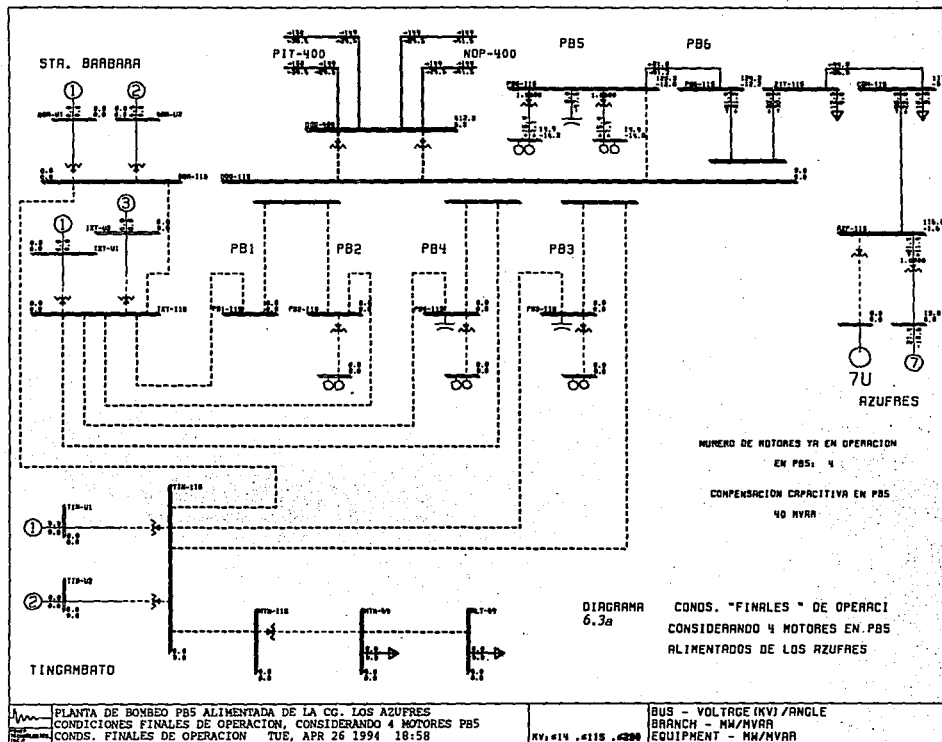






PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA DE LA CG. LOS AZUFRES
 ARRANQUE DEL 4TO. MOTOR DE 7960 KW EN PB5, CON 2X20 MVARC
 CONDS. PREVIAS DE OPERACION TUE, APR 26 1994 18:52

BUS - VOLTAGE (KV) / ANGLE
 BRANCH - MW/MVAR
 EQUIPMENT - MW/MVAR



**CARGA CONSIDERADA EN LA PLANTA DE BOMBEO PB5, PARA SER ENERGIZADA
POR LA CENTRAL GEOTERMICA LOS AZUFRES**

<i>PLANTA DE BOMBEO</i>	<i>MOTORES CONSIDERADOS A OPERAR</i>	<i>CARGA TOTAL POR PLANTA (MW)</i>
PB5	4 X 7.96	31.84

TABLA 6.2

**DATOS DE LAS UNIDADES DE GENERACION DE LA CENTRAL GEOTERMICA LOS AZUFRES
CONSIDERADAS PARA ALIMENTAR LA PLANTA DE BOMBEO PBS DEL SISTEMA CUTZAMALA**

UNIDAD	CAPACIDAD NOMINAL MVA	CAPACIDAD NOMINAL MW	LIMITES DE POTENCIA REACTIVA (MVAR ²)		VOLTAJE ENTRE FASES KV
			MAXIMA	MINIMA	
U-7	64.0	25.0	15.0	-15.0	13.8
U-1					
U-2					
U-3					
U-4	6.3	5.0	1.5	-1.5	13.8
U-5					
U-6					
U-8					

TABLA 6.3

**SECUENCIA DE ARRANQUE DE LOS MOTORES DE LA PLANTA DE
BOMBEO PB5 ALIMENTADA POR LA CENTRAL GEOTERMICA LOS AZUFRES**

<i>DIAGRAMA</i>	<i>MOTOR EN PROCESO DE ARRANQUE</i>	<i>MOTORES PREVIAMENTE CONECTADOS</i>	<i>UNIDADES DE GENERACION EN OPERACION</i>	<i>COMPENSACION EN MVAR's</i>	
				<i>FIJA</i>	<i>DINAMICA</i>
6.2	PB5-1	Ninguno	U7 U1, U2	1X20	30
6.2a	PB5-2	PB5-1	Ídem anterior	1X20	30
1*	PB5-3	+ PB5-2	+ U3, U4	1 X 20	30
6.3	PB5-4	+ PB5-3	+ U5, U6, U8	2X 20	30

1* El diagrama unifilar no se incluye por considerarlo repetitivo

TABLA 6.4

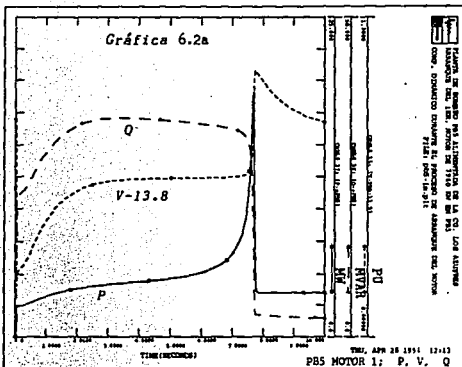
6.4.2.2 COMPORTAMIENTO DINAMICO DURANTE EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE LA PLANTA PB5

En las gráficas de las figuras 6.2 y 6.3 se muestra el comportamiento dinámico de algunas de las variables más representativas, que describen el proceso de arranque de el 1er. y 4to. motor. Estas variables son las siguientes:

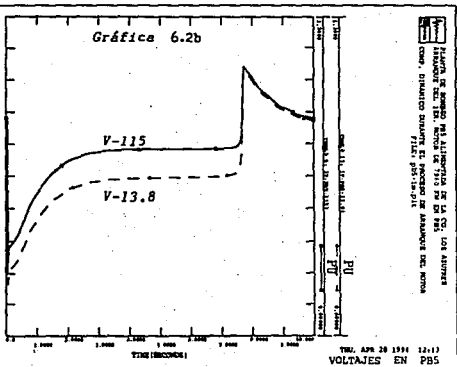
- El voltaje de operación, corriente y potencia consumida, correspondiente a cada uno de los motores en proceso de arranque.
- El voltaje en los buses de 115 y 13.8 KV en la planta PB5, donde se simula el arranque de cada motor.
- La frecuencia del sistema conformado por la interconexión de las unidades generadoras de la central Los Azufres con las subestación de la planta de bombeo PB5.
- El voltaje de excitación de la unidad No. 7 de la central Los Azufres, así como los reactivos generados por ésta.

Existe una correspondencia biunívoca entre los diagramas unifilares y las gráficas antes descritas, identificados con un mismo número, de tal forma que para el proceso de arranque del primer motor de la planta de bombeo PB5, tanto el diagrama 6.2, como la gráfica 6.2 proporcionan de manera conjunta la información técnica relacionada con el arranque de este motor.

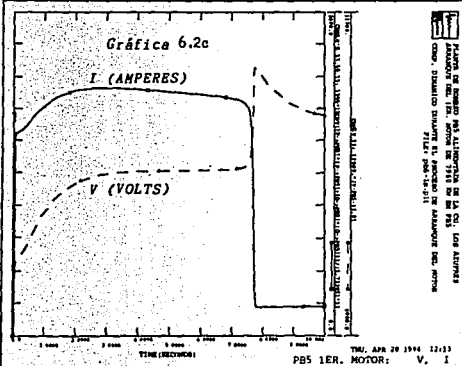
En la Tabla 6.5 se observa el tiempo que requirió el arranque de cada uno de los motores, así como sus valores mínimos instantáneos de voltaje y frecuencia alcanzados.



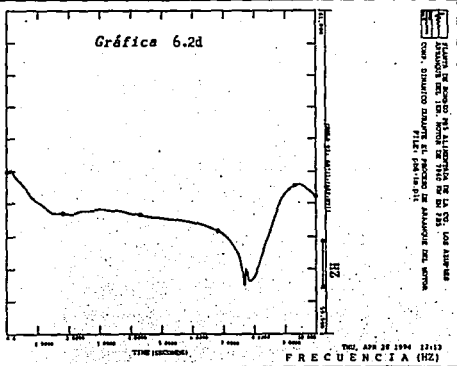
PLANTA DE BOMBA Nº 15 ALIMENTADA DE LA C.O. LOS ANGELES
MOTOR Nº 15, MOTOR DE 1510 KW EN 60 HZ
COM. SIMULADO SUAVEMENTE EL PROCESO DE ARRANQUE DEL MOTOR
1510 PWS 15-911



PLANTA DE BOMBA Nº 15 ALIMENTADA DE LA C.O. LOS ANGELES
MOTOR Nº 15, MOTOR DE 1510 KW EN 60 HZ
COM. SIMULADO SUAVEMENTE EL PROCESO DE ARRANQUE DEL MOTOR
1510 PWS 15-911



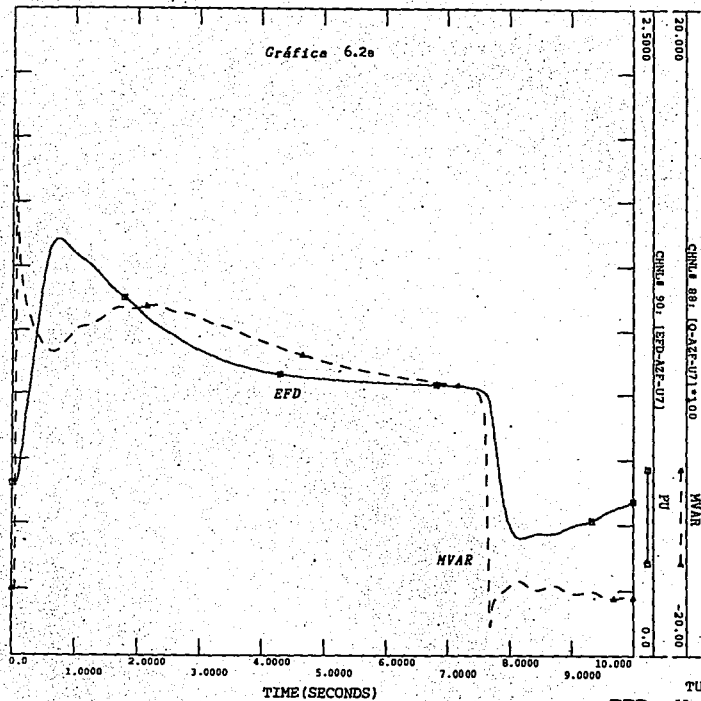
PLANTA DE BOMBA Nº 15 ALIMENTADA DE LA C.O. LOS ANGELES
MOTOR Nº 15, MOTOR DE 1510 KW EN 60 HZ
COM. SIMULADO SUAVEMENTE EL PROCESO DE ARRANQUE DEL MOTOR
1510 PWS 15-911



PLANTA DE BOMBA Nº 15 ALIMENTADA DE LA C.O. LOS ANGELES
MOTOR Nº 15, MOTOR DE 1510 KW EN 60 HZ
COM. SIMULADO SUAVEMENTE EL PROCESO DE ARRANQUE DEL MOTOR
1510 PWS 15-911

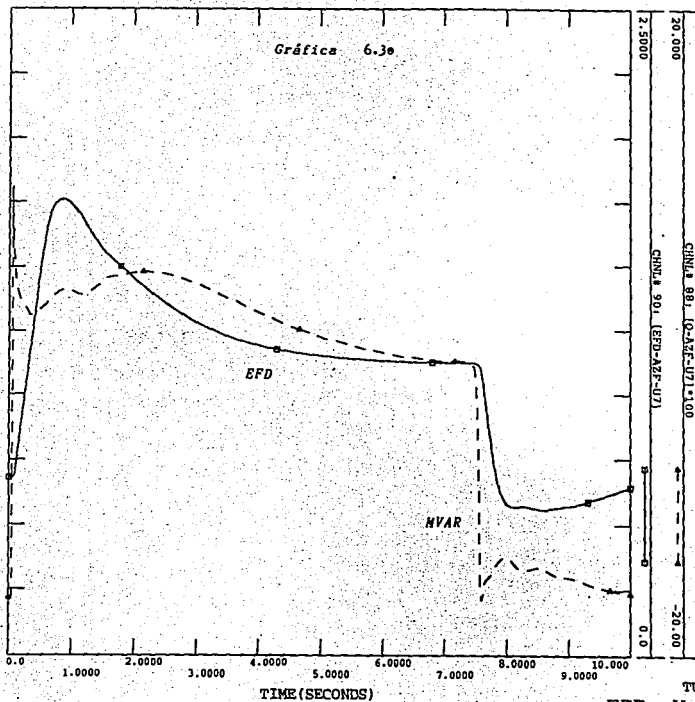


PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA DE LA CG. LOS AZUFRES.
ARRANQUE DEL 1ER. MOTOR DE 7960 KW EN PB5
COMPORTAMIENTO DINAMICO DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR
FILE: pb5-1m.plt





PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA DE LA CG. LOS AZUFRES
ARRANQUE DEL 4TO. MOTOR DE 7960 KW EN PB5, CON 2X20 MVARC
COMPORTAMIENTO DINAMICO DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR
FILE: pb5-4mc .d1c



TUE, APR 26 1994 13:11
EFD Y MVAR EN AZF-U7

**CAIDAS MAXIMAS DE VOLTAJE Y FRECUENCIA EN EL BUS DE 13.8 KV DE
LA PLANTA DE BOMBEO PBS, DURANTE EL ARRANQUE DE SUS MOTORES**

ARRANQUE DEL MOTOR		VOLTAJE INSTANTANEO MINIMO ALCANZADO EN P.U. EN EL BUS DE 13.8 KV DE LA PLANTA DE BOMBEO PBS	FRECUENCIA MINIMA ALCANZADA EN LOS BUSES DE 13.8 KV (HZ)
No.	TIEMPO EMPLEADO (Segundos)		
1	7.7	0.7510	59.3
2	8.5	0.7010	59.3
3	9.0	0.7110	59.5
4	7.0	0.7550	59.4

TABLA 6.5

6.5 SUMINISTRO ELECTRICO PROPORCIONADO POR UNIDADES DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN

Alimentación de las plantas de bombeo PB2, PB3, PB4 y PB5; considerando 2 motores por planta para las tres primeras, y 4 motores en PB5. Esto es, 109 000 KW en total. Se analizaron dos casos: con y sin el bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.

6.5.1 CONSIDERANDO LA DISPONIBILIDAD DEL BUS DE 115 KV DE LA SE. DONATO GUERRA

6.5.1.1 CONDICIONES DE LA RED DE TRANSMISION EN ESTADO ESTABLE, PREVIAS AL INICIO DEL ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA

En los diagramas 6.4 a 6.9 se aprecian las condiciones de operación en estado estable de la red, previas al inicio del arranque de cada uno de los motores. Por ejemplo, en el diagrama 6.4 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 1er. motor en PB5, observándose en operación la unidad 1 de la central Ixtapantongo y conectadas las líneas de transmisión IXT-DOG y DOG-PB5. El nivel de voltaje en los buses de 115 y 13.8 KV en esta planta de bombeo PB5 presenta un valor de 1.093 pu. En el diagrama 6.5 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 2do. motor en PB5, considerándose ya en línea el 1er. motor de PB5. Y así sucesivamente en cada uno de los diagramas, hasta la incorporación del 4to. motor localizado en la planta PB5 (diagrama 6.9), concluyéndose de esta manera el proceso de puesta en operación de los motores de acuerdo a los requerimientos indicados por la CNA. En el diagrama 6.9a se muestran las condiciones operativas en estado estable, considerando ya en operación todos los motores requeridos. Ver también las Tablas 6.6 y 6.7.

Con todos los motores ya en línea, no es conveniente permitir la operación de la red de transmisión con niveles de voltajes mayores al máximo de diseño (123 KV), por lo que se recomienda desconectar parte de la compensación capacitiva. En el diagrama 6.9b se muestran las condiciones de operación de la red considerando exclusivamente 20 MVRs en la planta PB4, observándose disminución en los niveles de voltaje a valores por debajo del límite antes indicado.

Si por otra parte, se juzga conveniente reforzar la red de transmisión para incrementar su confiabilidad, una vez desconectada la compensación reactiva considerada en exceso, se pueden conectar las líneas IXT-PB1 y PB1-DOG. En el diagrama 6.9c se muestran las nuevas condiciones operativas.

En la tabla 6.8 y 6.9 se muestran la secuencia de arranque del Sistema de Bombeo Cutzamala alimentados por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán así como las capacidades de generación de las unidades con que cuenta este mismo. En la tabla 6.10 se proporciona la carga considerada en las plantas de bombeo al momento de ser energizadas.

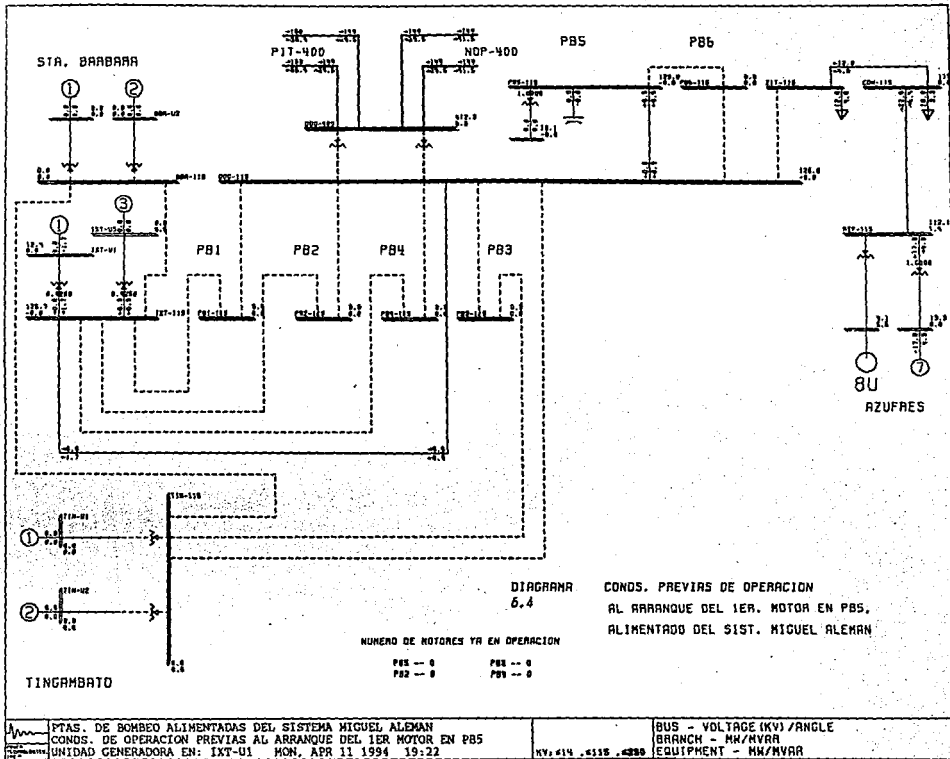


DIAGRAMA
5.4

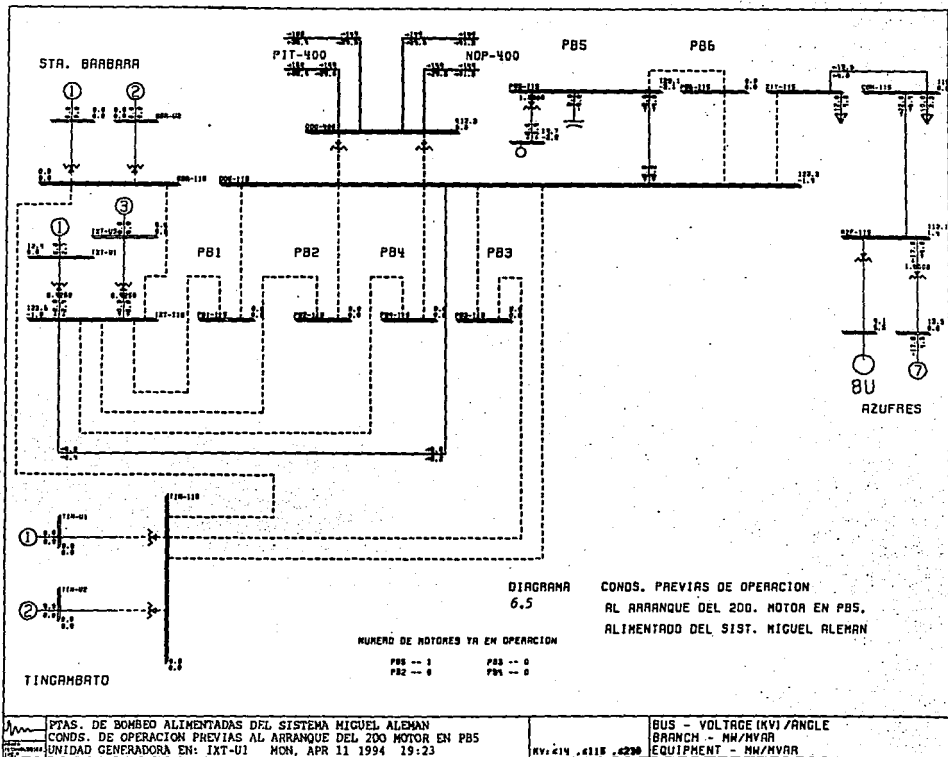
CONDS. PREVIAS DE OPERACION
AL ARRANQUE DEL 1ER. MOTOR EN P85,
ALIMENTADO DEL SIST. MIGUEL ALEMAN

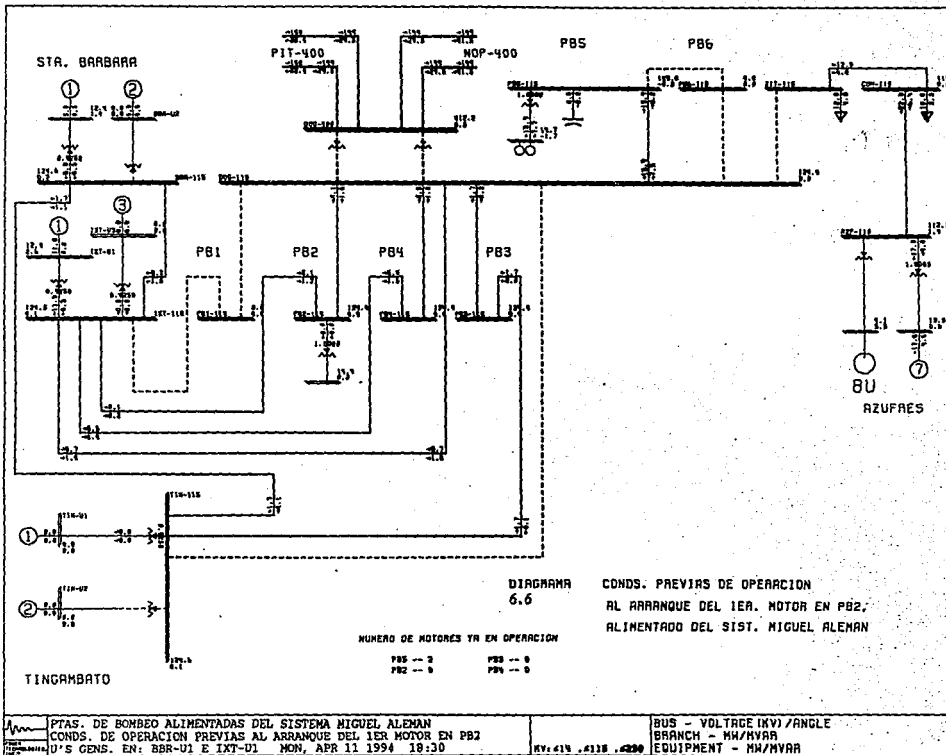
NUMERO DE MOTORES YA EN OPERACION

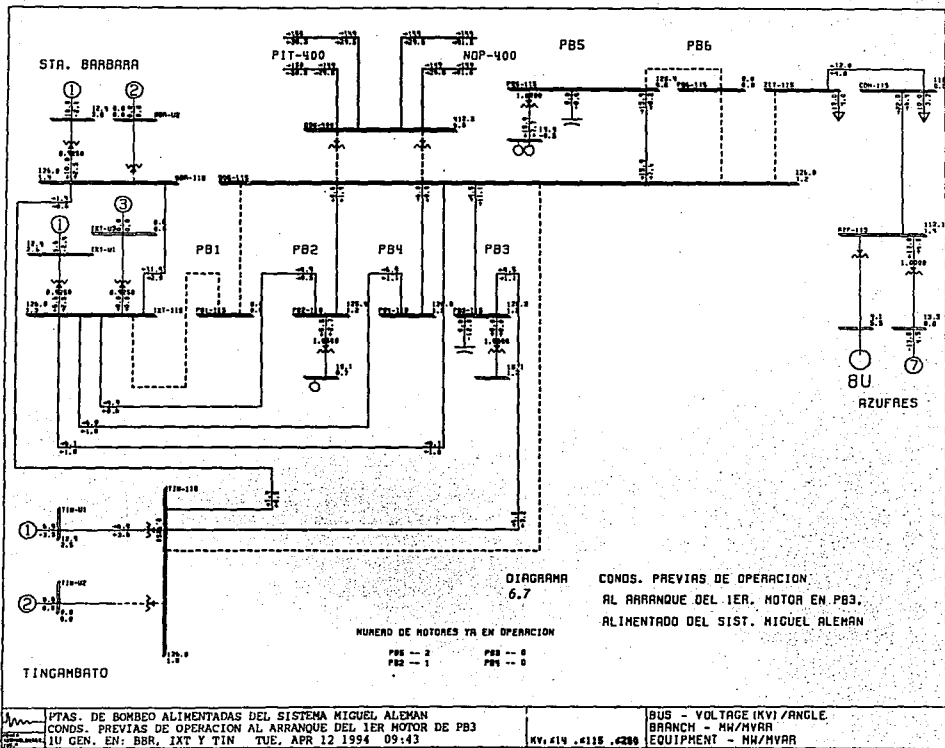
- P85 -- 0
- P82 -- 0
- P86 -- 0
- P81 -- 0

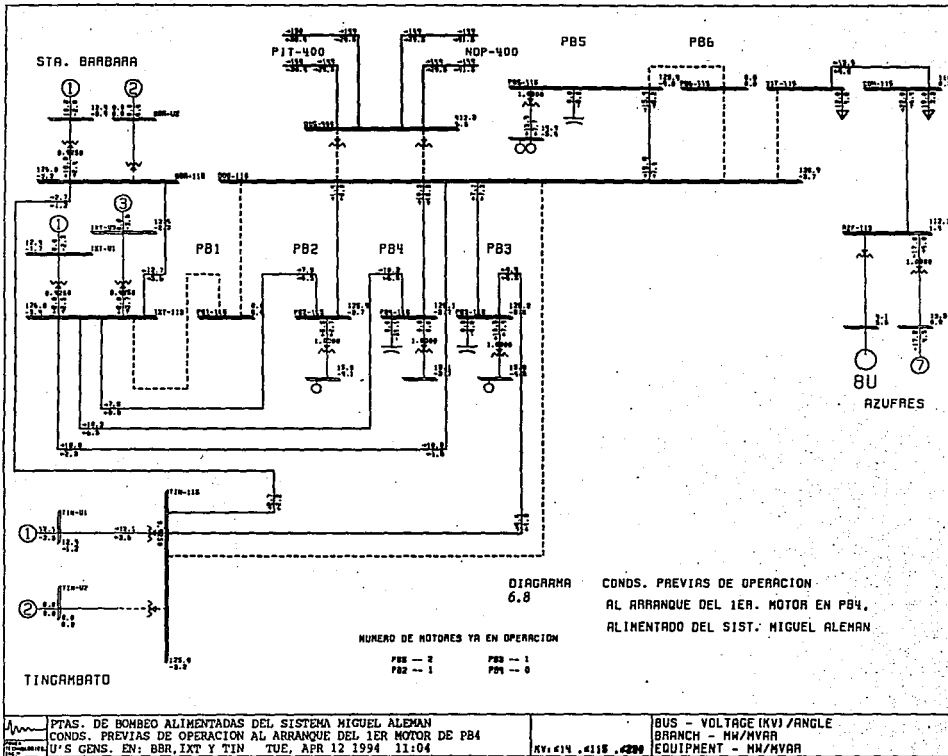
TINGAMBATO

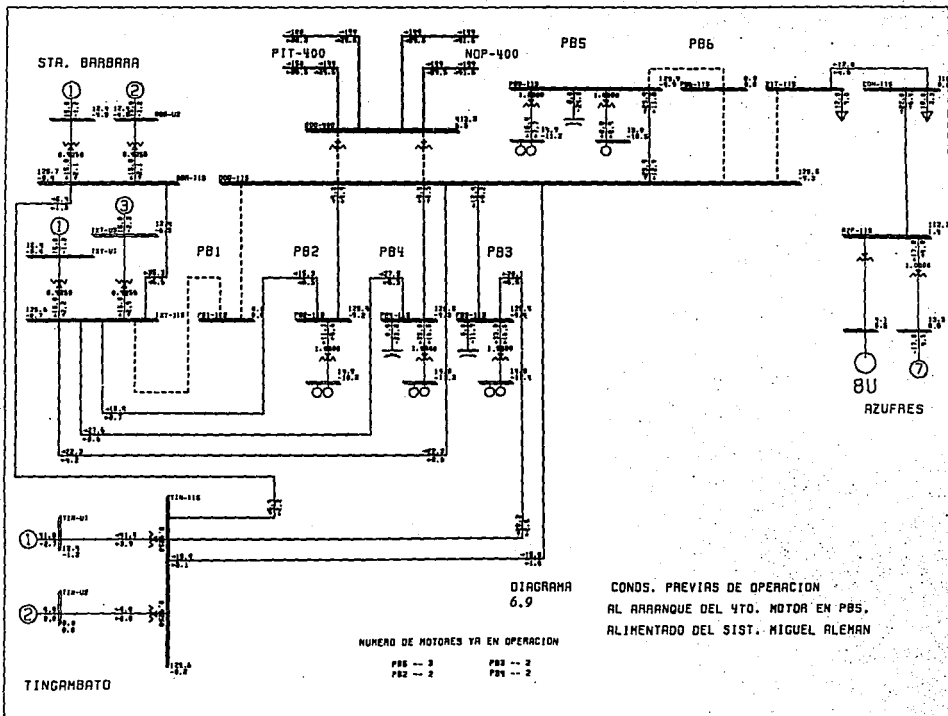
<p>PTAS. DE BOMBEO ALIMENTADAS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN CONDS. DE OPERACION PREVIAS AL ARRANQUE DEL 1ER MOTOR EN P85 UNIDAD GENERADORA EN: IXT-U1 MON, APR 11 1994 19:22</p>	<p>BUS - VOLTAGE (KV) / ANGLE BRANCH - MW/MVRA EQUIPMENT - MW/MVRA KV: #14 . #118 . #280</p>
---	--





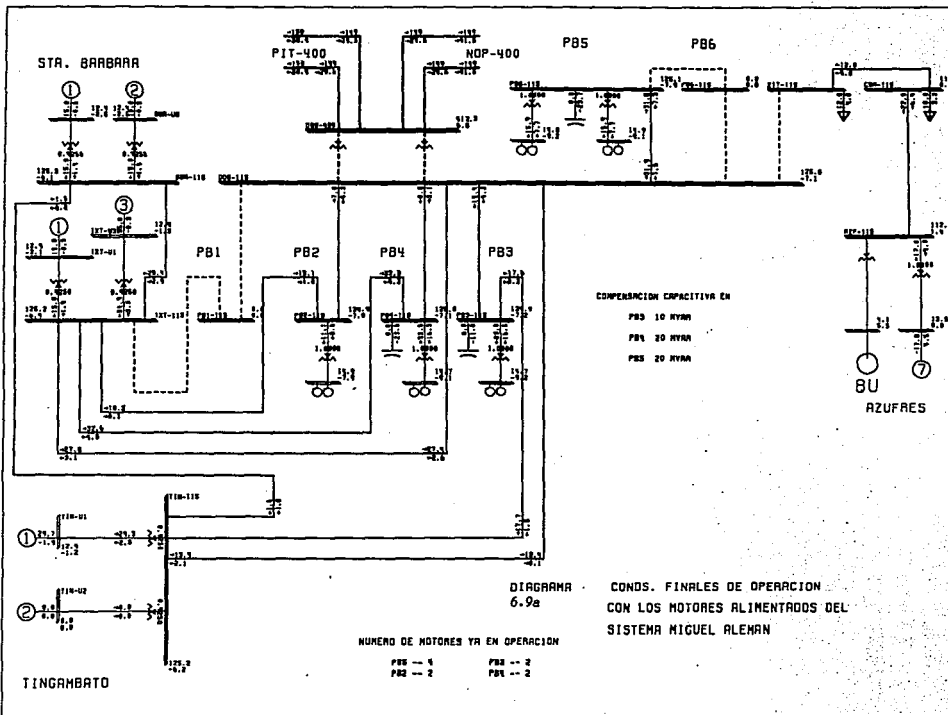






PTAS. DE BOMBEO ALIMENTADAS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN
 COND. PREVIAS DE OPERACION AL ARRANQUE DEL 4TO MOTOR EN PBS
 2U'S EN: BBR E IXT; 1U EN TIN TUE, APR 12 1994 18:49

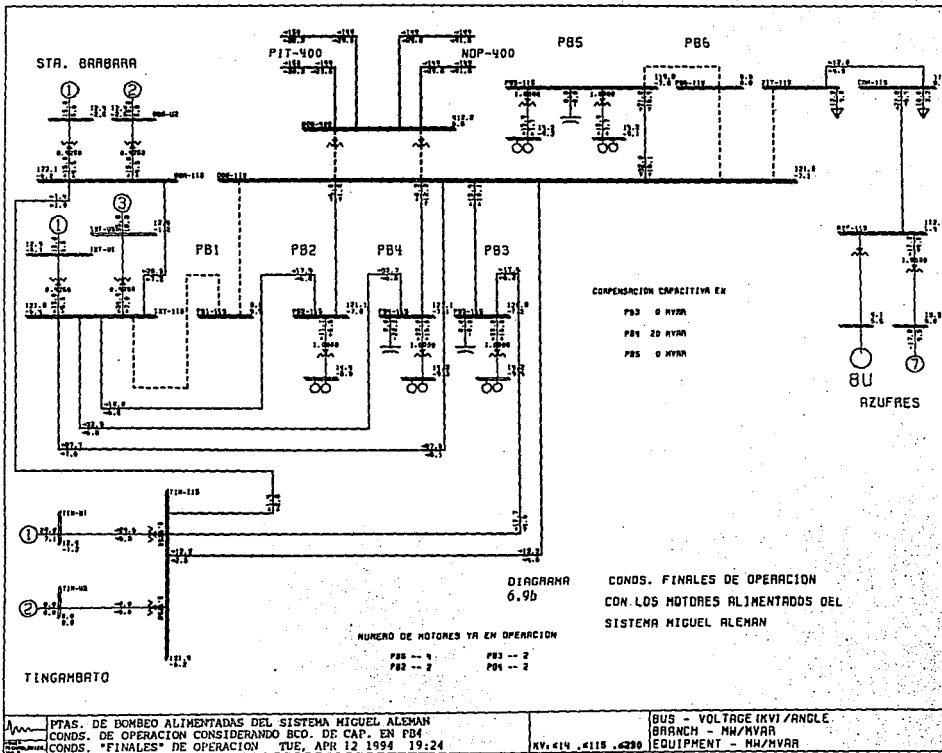
BUS - VOLTAGE (KV) / ANGLE
 BRANCH - MM/MVAR
 EQUIPMENT - MM/MVAR
 KV: 614 .6116 .6280

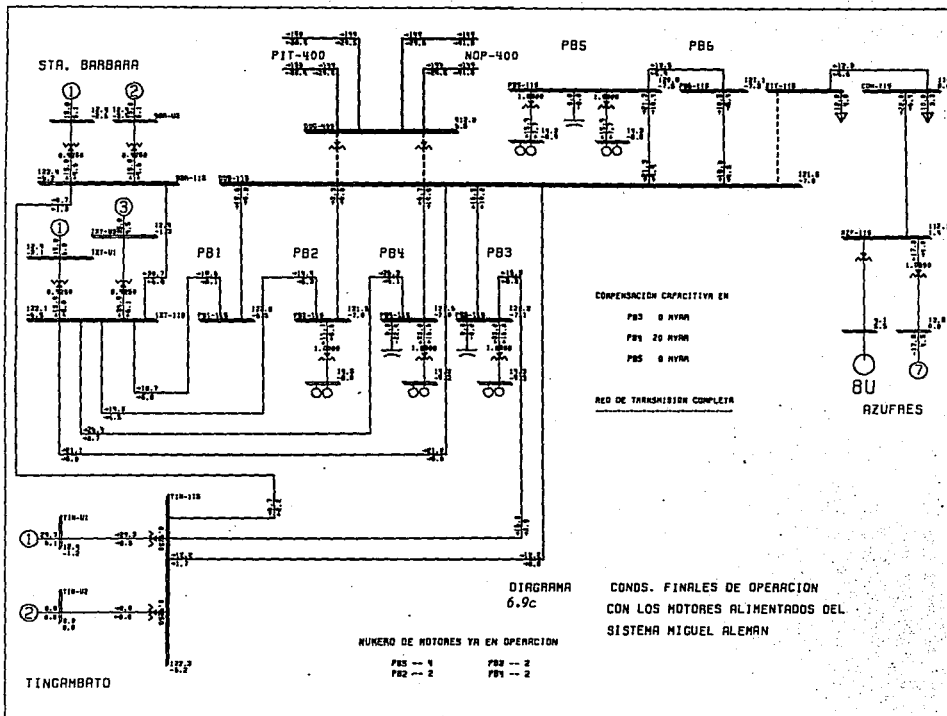


PTAS. DE BOMBEO ALIMENTADAS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN
 CONDS. DE OPER. CONSIDERANDO BCOS. DE CAP. EN PB3, PB4 Y PB5
 CONDS. *FINALES* DE OPERACION TUE, APR 12 1994 19:25

BUS - VOLTAGE (KV) / ANGLE
 BRANCH - MW/MVAR
 EQUIPMENT - MW/MVAR

KV: 614 .4118 .4280





PTAS. DE BOMBEO ALIMENTADAS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN
 COND. DE OPERACION CONSIDERANDO BCO. DE CAP. EN PB4
 COND. *FINALES* DE OPERACION TUE, APR 12 1994 19:54

BU - VOLTAGE (KV) / ANGLE
 BRANCH - MW/MVAR
 EQUIPMENT - MW/MVAR

OPERACION DE LAS UNIDADES GENERADORAS DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN AL CONCLUIR LA ETAPA DEL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE LAS PLANTAS DE BOMBEO.

<i>UNIDAD GENERADORA</i>	<i>FLUJO DE POTENCIA</i>		<i>VOLTAJE</i>
	<i>ACTIVA MW</i>	<i>REACTIVA MVAR's</i>	<i>KV</i>
IXTAPANTONGO			
U-1	15.0	-1.4	125.2
U-2	34.9	-3.5	125.2
SANTA BARBARA			
U-1	15.0	-1.4	125.3
U-2	15.0	-1.4	125.3
TINGAMBATO			
U-1	29.5	-2.5	125.2

Correspondiente al diagrama 6.9a

TABLA 6.6

**OPERACION DE LAS PLANTAS DE BOMBEO DEL SISTEMA CUTZAMALA AL CONCLUIR
LA ETAPA DEL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE LAS PLANTAS DE BOMBEO.**

<i>PLANTA DE BOMBEO</i>	<i>NUMERO DE MOTORES EN OPERACION</i>	<i>CARGA EN MW</i>	<i>COMPENSACION REACTIVA FIJA MVARs</i>	<i>VOLTAJE KV</i>
PB5	4	31.8	23.7	125.1
PB2	2	11.1	0	124.9
PB3	2	33.0	11.8	124.9
PB4	2	33.0	23.6	125.0

Correspondiente al diagrama 6.9a

TABLA 6.7

SECUENCIA DE ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA ALIMENTADOS POR EL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN

DIAGRAMA	MOTOR EN PROCESO DE ARRANQUE	MOTORES PREVIAMENTE CONECTADOS	UNIDADES DE GENERACION EN OPERACION	LINEAS CONECTADAS EN LA RED	COMPENSACION EN MVAR's	
					FIJA	DINAMICA
6.4	PB5-1	Ninguno	IXT-U1	BBR-DOG-PB5	0	30
6.5	PB5-2	PB5-1	Idem Anterior	Idem Anterior	0	30
6.6	PB2-1	+ PB5-2	+ BBR-U1	+ IXT-BBR-TIN + IXT-PB2-DOG + IXT-PB4-DOG + TIN-PB3-DOG	0	0
6.7	PB3-1	+ PB2-1	+ TIN-U1	Idem Anterior	1 X 10	40
6.8	PB4-1	+ PB3-1	+ IXT-U3	Idem Anterior	1 X 20	40
2*	PB5-3	+ PB4-1	Idem Anterior	+ TIN-DOG	1 X 20 (PB4)	30
2*	PB2-2	+ PB5-3	Idem Anterior	Idem Anterior	1 X 20 (PB4)	0
2*	PB3-2	+ PB2-2	+ BBR-U2	Idem Anterior	1 X 10 1 X 20 (PB4)	40
2*	PB4-2	+ PB3-2	Idem Anterior	Idem Anterior	1 X 20 1 X 10 (PB3)	40
10	PB5-4	+ PB4-2	Idem Anterior	Idem Anterior	1 X 20 1 x 10 (PB3) 1 X 20 (PB4)	30

2* No se incluyen los diagramas unifilares por considerarlos repetitivos.

TABLA 6.8

CAPACIDAD DE LAS UNIDADES DE GENERACION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN.

CENTRAL GENERADORA	UNIDAD	CAPACIDAD NOMINAL MVA	CAPACIDAD NOMINAL MW	LIMITES DE POTENCIA REACTIVA (MVAR's)		VOLTAJE ENTRE FASES KV
				MAXIMA	MINIMA	
IXTAPANTONGO	U-1	30.0	27.0	8.4	-9.45	13.2
	U-3	50.0	45.0	13.5	-15.75	13.2
SANTA BARBARA	U-1	29.4	25.0	7.5	-8.75	13.8
	U-2	29.4	25.0	7.5	-8.75	13.8
TINGAMBATO	U-1	50.0	45.0	13.5	-15.75	13.8
	U-2	50.0	45.0	13.5	-15.75	13.8

TABLA 6.9

**CARGA CONSIDERADA EN LAS PLANTAS DE BOMBEO, PARA SER ENERGIZADA
POR EL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN**

<i>PLANTA DE BOMBEO</i>	<i>MOTORES CONSIDERADOS A OPERAR</i>	<i>CARGA TOTAL POR PLANTA (MW)</i>
PB5	4 X 7.96	31.84
PB2	2 X 5.55	11.1
PB3	2 X 16.5	33.0
PB4	2 X 16.5	33.0

Carga Total

Del Sistema 108.94

TABLA 6.10

6.5.1.2 COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LA RED DE TRANSMISION DURANTE EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA.

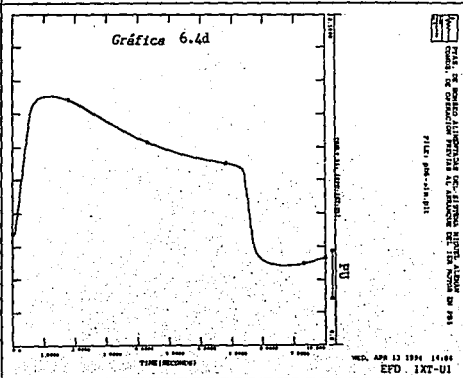
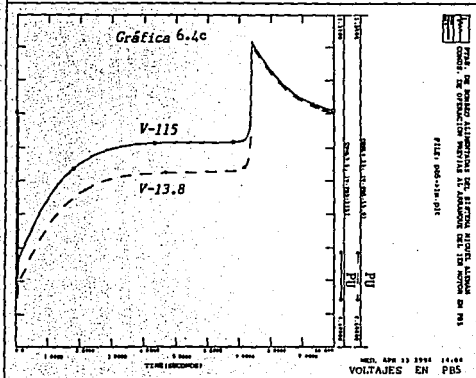
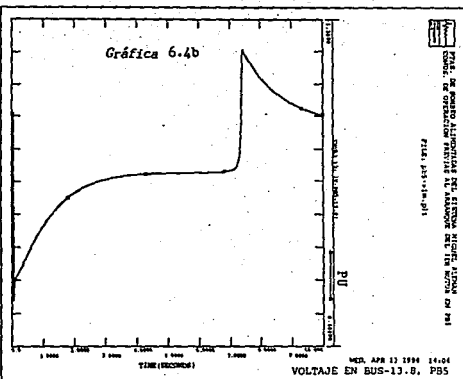
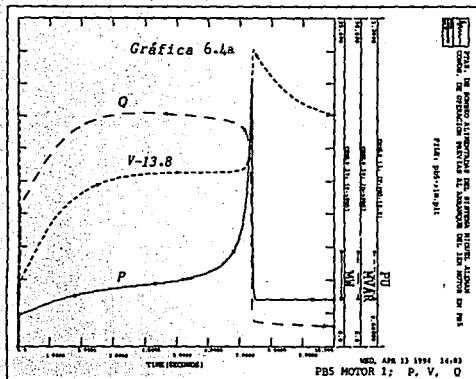
En las gráficas 6.4 a 6.9 se muestra el comportamiento dinámico de algunas variables representativas, previas y durante el proceso de arranque de cada uno de los motores. Estas variables son las siguientes:

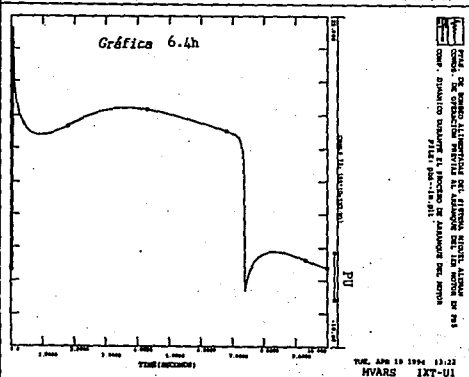
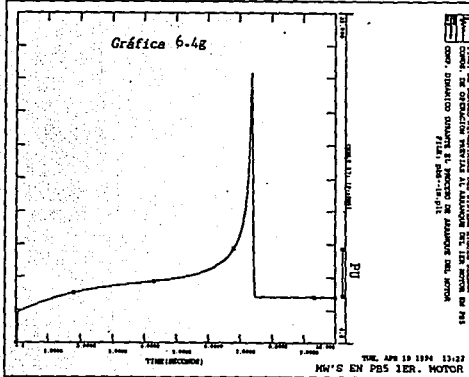
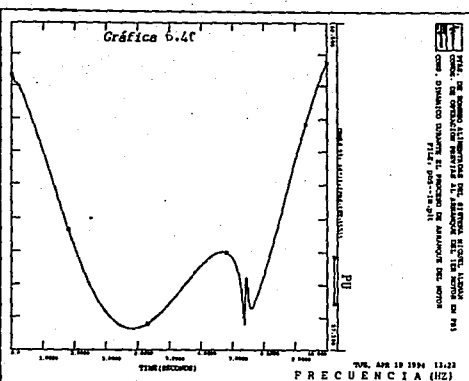
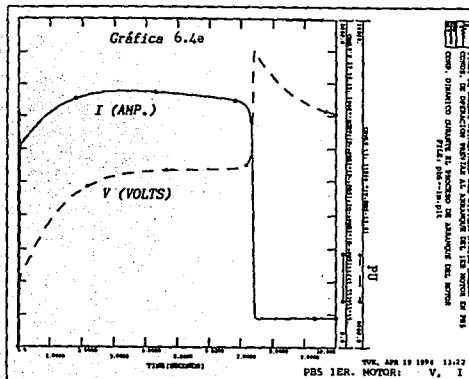
- El voltaje de operación, corriente y potencia consumida, correspondiente a cada uno de los motores en proceso de arranque.
- El voltaje en los buses de 13.8 KV, de todas las plantas de bombeo con motores ya en línea.
- Efecto en la velocidad del motor ya en operación, como consecuencia del arranque de otro motor localizado en la misma planta.
- El voltaje de excitación de las unidades de las centrales hidroeléctricas y los reactivos generados por éstas.
- La frecuencia del sistema conformado por la interconexión de las unidades generadoras de las centrales hidroeléctricas con las subestaciones de las plantas de bombeo.

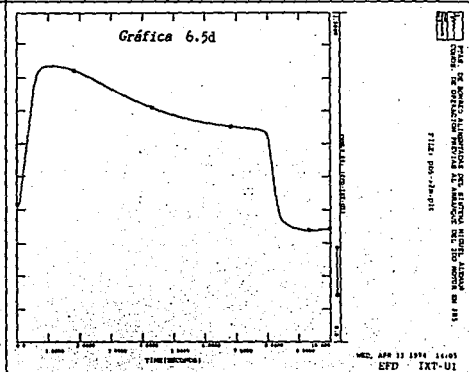
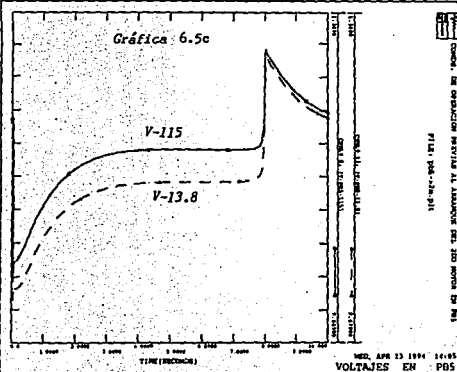
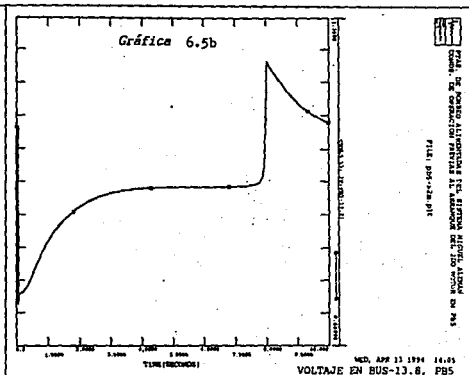
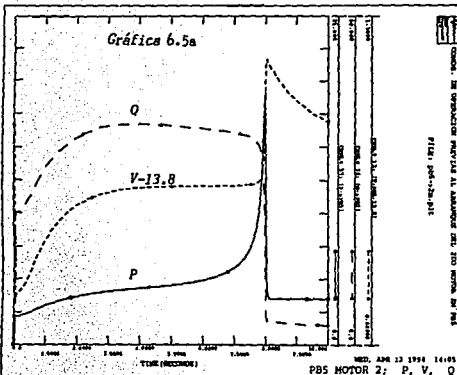
Existe una correspondencia biunívoca entre los diagramas unifilares y las gráficas de las figuras antes descritas, identificados con un mismo número, de tal forma que para el proceso de arranque del primer motor de la planta de bombeo PB5, tanto el diagrama 6.4, como la gráfica 6.4, proporcionan de manera conjunta, la información técnica relacionada con el arranque de este motor.

La simulación efectuada del arranque del 1er. motor en la planta PB2, presentó las condiciones operativas menos favorables debido a la falta local de compensación reactiva. Siendo necesario que la totalidad de los reactivos capacitivos requeridos fueran proporcionados desde las unidades generadoras.

En la Tabla 6.11 se observa el tiempo que requirió el arranque de cada uno de los motores, así como sus valores mínimos instantáneos de voltaje y frecuencia alcanzados. También se indican las disminuciones instantáneas de voltaje en los motores ya en línea en las otras plantas de bombeo.





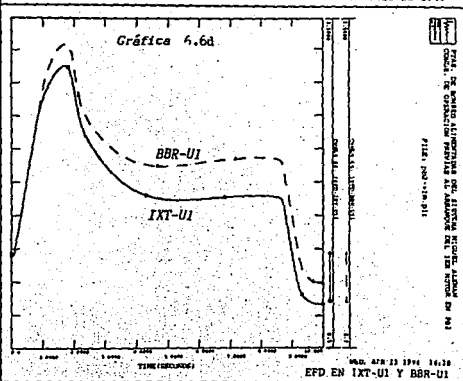
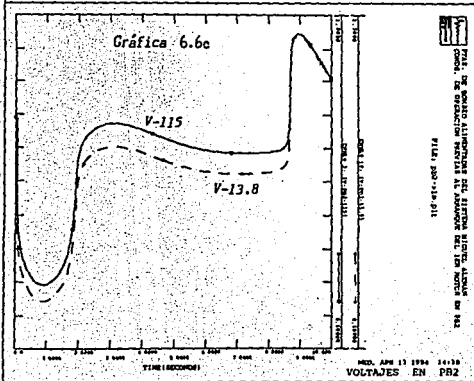
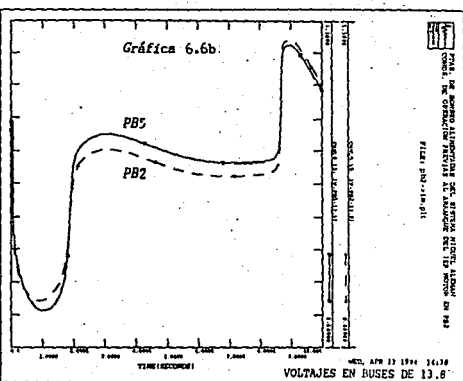
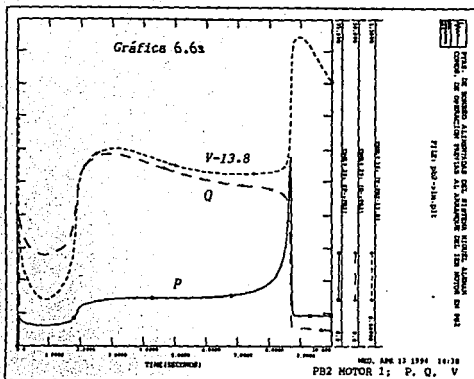


FIRM. DE PONTO ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ALBUQUERQUE, RIO DE JANEIRO, RJ
 COM. DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
 FILE: 095-28-015

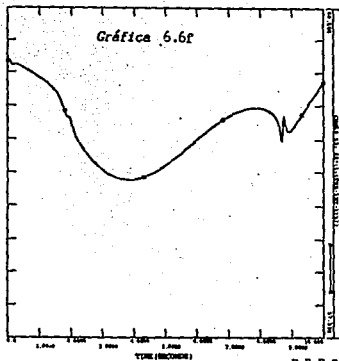
FIRM. DE PONTO ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ALBUQUERQUE, RIO DE JANEIRO, RJ
 COM. DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
 FILE: 095-28-015

FIRM. DE PONTO ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ALBUQUERQUE, RIO DE JANEIRO, RJ
 COM. DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
 FILE: 095-28-015

FIRM. DE PONTO ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ALBUQUERQUE, RIO DE JANEIRO, RJ
 COM. DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
 FILE: 095-28-015

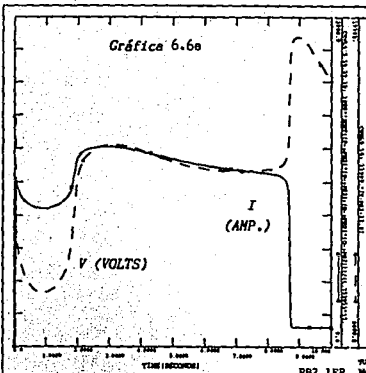


FILE: DE MONITOR ALIMENTADORA DEL SISTEMA ELECTRO ALMOZA DE PAI
 COM: DE OPERACION MEXICA DE LABORIOS DEL IIR NORON DE MEX
 CON: DIVISION OPERATIVA DE MEXICO DE LABORIOS DEL IIR NORON
 FILE: PDI-14-011



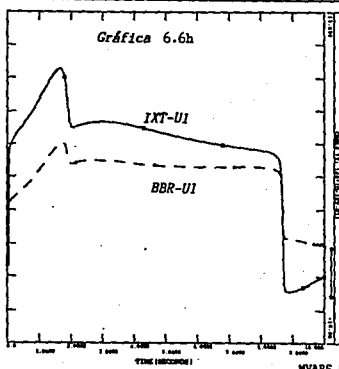
TUE, APR 19 1994 13:50
 P.FRECUENCIA (HZ)

FILE: DE MONITOR ALIMENTADORA DEL SISTEMA ELECTRO ALMOZA DE PAI
 COM: DE OPERACION MEXICA DE LABORIOS DEL IIR NORON DE MEX
 CON: DIVISION OPERATIVA DE MEXICO DE LABORIOS DEL IIR NORON
 FILE: PDI-14-011



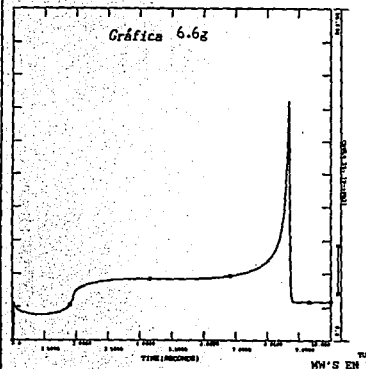
TUE, APR 19 1994 13:50
 PB2 1ER. MOTOR: V, I

FILE: DE MONITOR ALIMENTADORA DEL SISTEMA ELECTRO ALMOZA DE PAI
 COM: DE OPERACION MEXICA DE LABORIOS DEL IIR NORON DE MEX
 CON: DIVISION OPERATIVA DE MEXICO DE LABORIOS DEL IIR NORON
 FILE: PDI-14-011

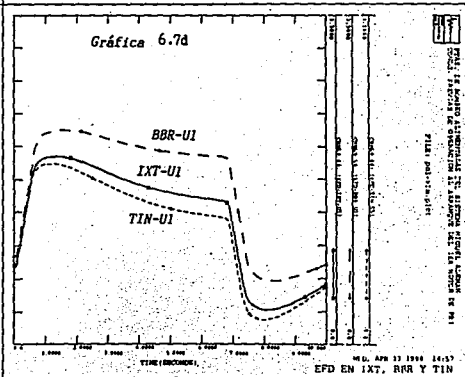
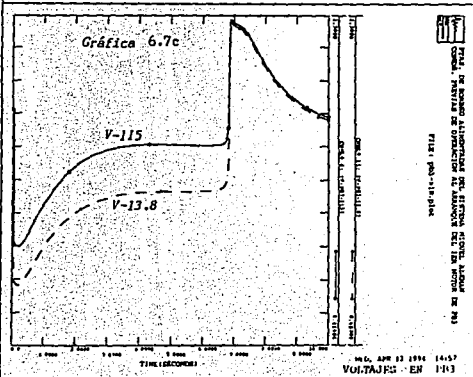
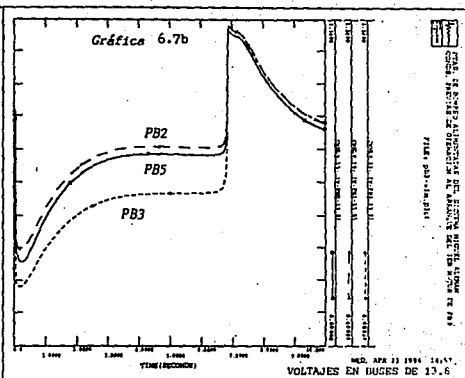
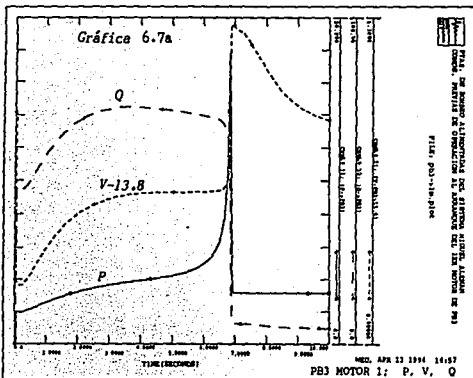


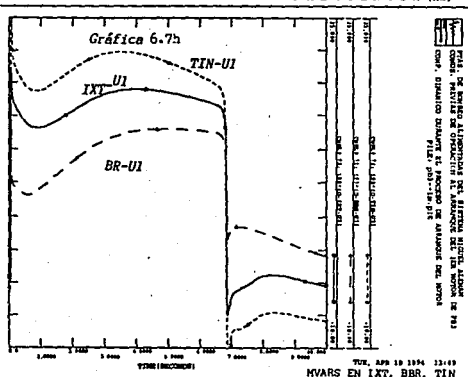
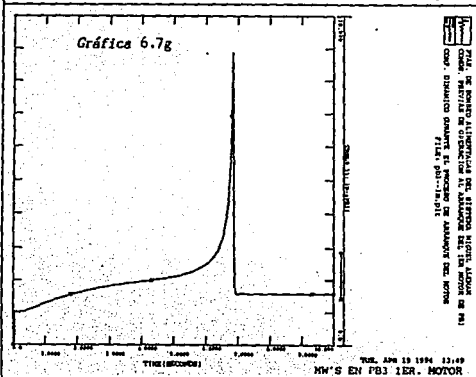
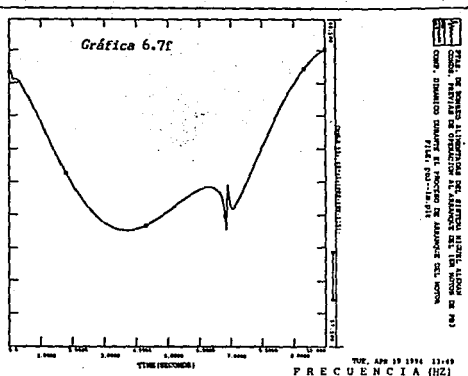
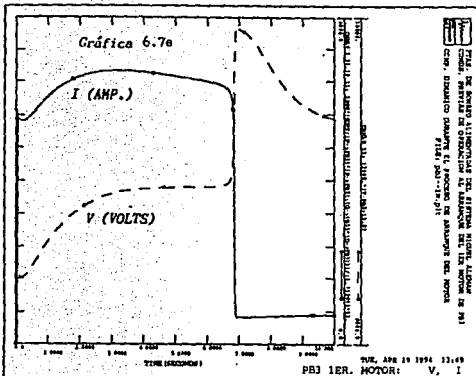
TUE, APR 19 1994 13:50
 MVARS EN IXT-U1, BDR-U1

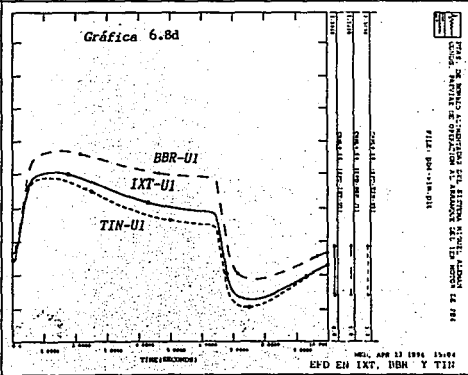
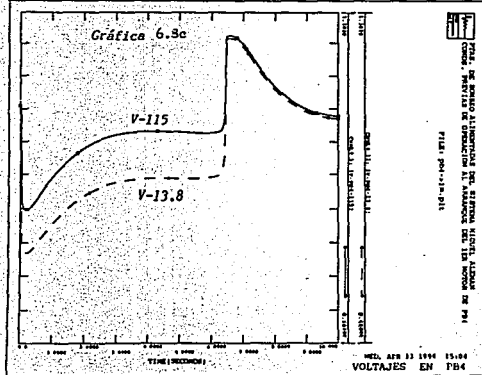
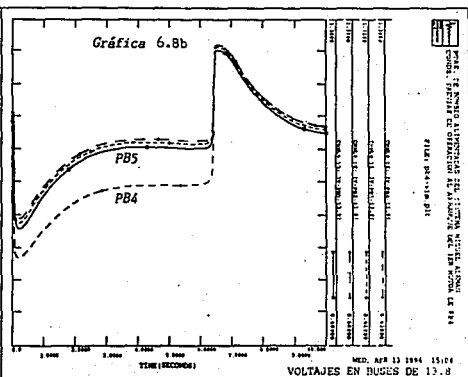
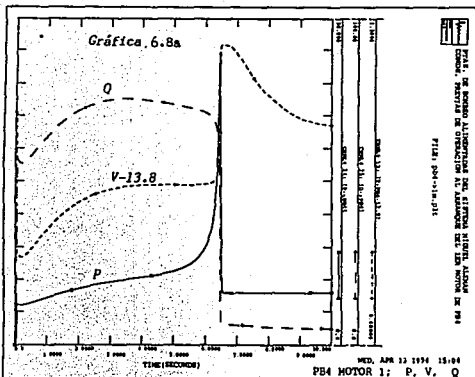
FILE: DE MONITOR ALIMENTADORA DEL SISTEMA ELECTRO ALMOZA DE PAI
 COM: DE OPERACION MEXICA DE LABORIOS DEL IIR NORON DE MEX
 CON: DIVISION OPERATIVA DE MEXICO DE LABORIOS DEL IIR NORON
 FILE: PDI-14-011

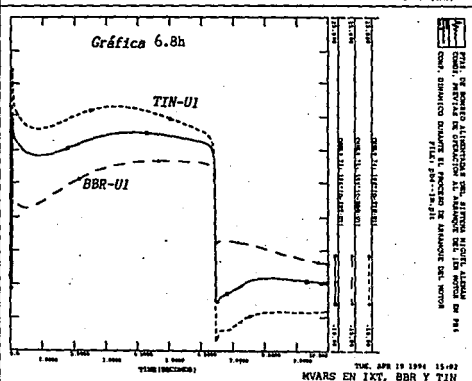
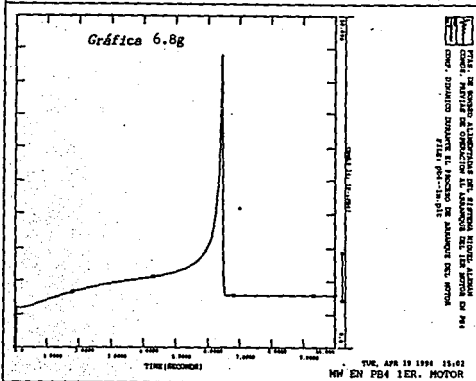
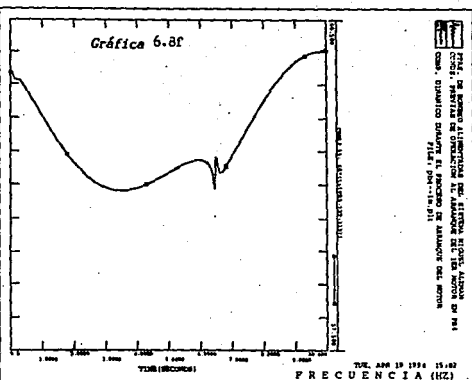
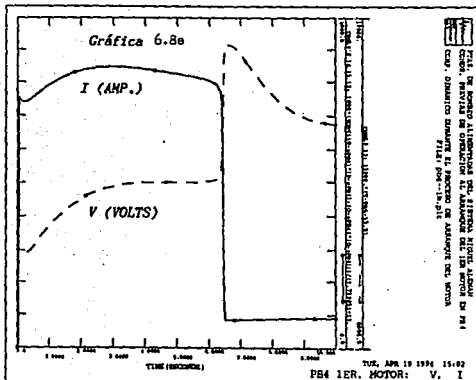


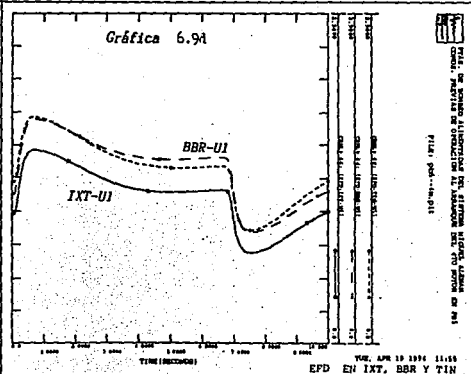
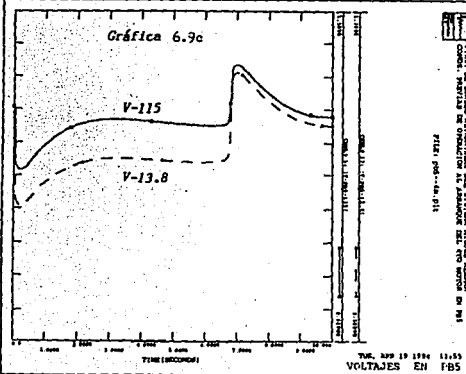
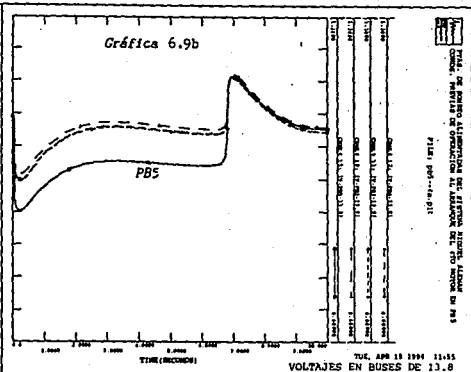
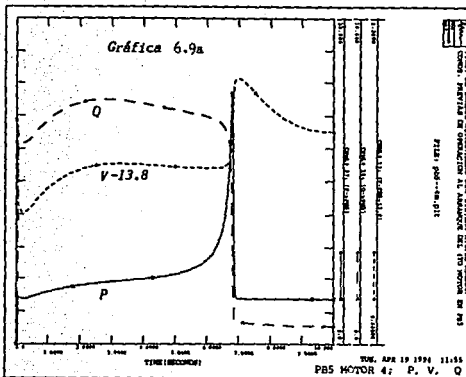
TUE, APR 19 1994 13:50
 MW'S EN PB2 1ER. MOTOR











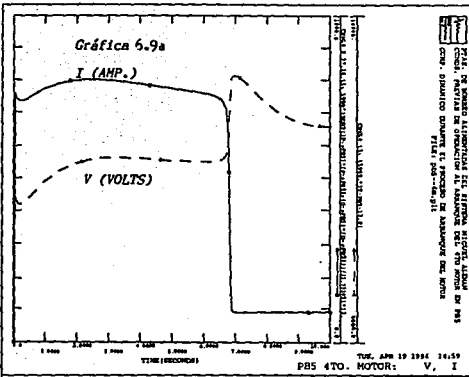


FIG. DE SERVO ALIMENTADOS DEL SERVO SIGMA, ALUMNA
CÓDIGO: REVISTA DE OPERACION AL SERVIDOR DEL TO MOTOR DE PAS
COM. SIMULADO DURANTE EL PROCESO DE MANEJO DEL MOTOR
FILE: pas-4a.pst

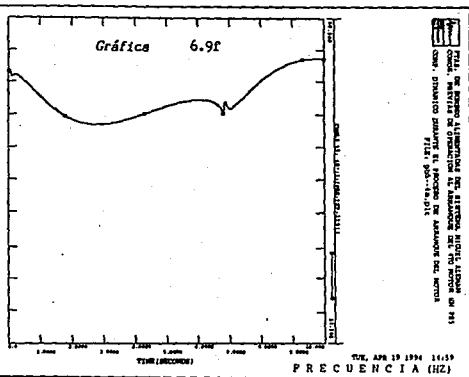


FIG. DE SERVO ALIMENTADOS DEL SERVO SIGMA, ALUMNA
CÓDIGO: REVISTA DE OPERACION AL SERVIDOR DEL TO MOTOR DE PAS
COM. SIMULADO DURANTE EL PROCESO DE MANEJO DEL MOTOR
FILE: pas-4a.pst

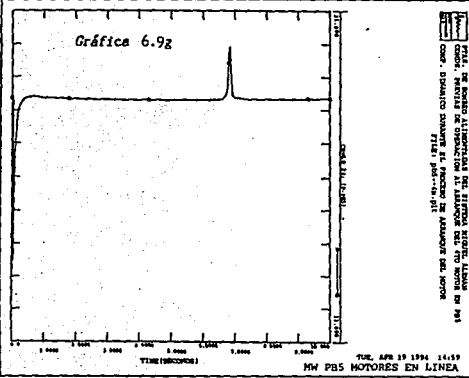


FIG. DE SERVO ALIMENTADOS DEL SERVO SIGMA, ALUMNA
CÓDIGO: REVISTA DE OPERACION AL SERVIDOR DEL TO MOTOR DE PAS
COM. SIMULADO DURANTE EL PROCESO DE MANEJO DEL MOTOR
FILE: pas-4a.pst

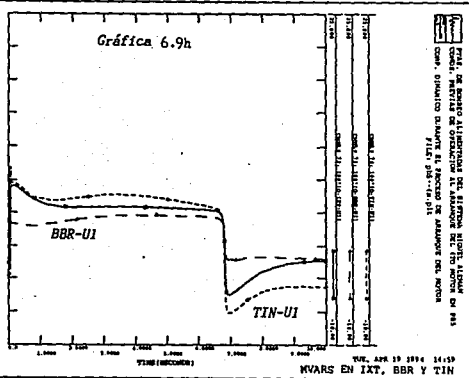


FIG. DE SERVO ALIMENTADOS DEL SERVO SIGMA, ALUMNA
CÓDIGO: REVISTA DE OPERACION AL SERVIDOR DEL TO MOTOR DE PAS
COM. SIMULADO DURANTE EL PROCESO DE MANEJO DEL MOTOR
FILE: pas-4a.pst

CAIDAS MAXIMAS DE VOLTAJE Y FRECUENCIA EN LOS BUSES DE 13.8 KV DE LAS PLANTAS DE BOMBEO, DURANTE EL ARRANQUE DE SUS MOTORES

PLANTA DE BOMBEO	ARRANQUE DEL MOTOR		VOLTAJE INSTANTANEO MINIMO ALCANZADO EN P.U. EN LOS BUSES DE 13.8 KV DE LAS PLANTAS				FRECUENCIA MINIMA ALCANZADA EN LOS BUSES DE 13.8KV
	No.	TIEMPO EMPLEADO (Segundos)	PB5	PB2	PB3	PB4	(HZ)
PB5	1	7.3	0.6972	-	-	-	57.7
	2	7.9	0.7028	-	-	-	57.9
	3	7.0	0.8906	0.9836	0.9753	0.9791	59.5
	4	6.8	0.8834	0.9585	0.9450	0.9469	59.5
PB2	1	8.7	0.6789	0.7000	-	-	58.9
	2	7.8	0.9155	0.8871	0.9290	0.9312	59.6
PB3	1	6.8	0.7792	0.8049	0.7273	-	58.6
	2	6.7	0.8308	0.8494	0.7518	0.8498	59.1
PB4	1	6.5	0.8504	0.8721	0.8631	0.7881	58.9
	2	6.7	0.8122	0.8320	0.8120	0.7467	59.1

TABLA 6.11

6.5.2 CONSIDERANDO QUE NO EXISTE DISPONIBILIDAD FISICA DEL BUS DE 115 KV DE LA SE. DONATO GUERRA

- Se considera que no se dispone físicamente del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra, razón por la cual, las plantas de bombeo PB2, PB3 y PB4 son alimentados por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, a través de su red de transmisión asociada, y la planta PB5 se alimenta de la central geotérmica los Azufres.
- El arranque de los motores mediante los dos sistemas de suministro, se efectuó de manera secuencial, de acuerdo a los requerimientos operativos del sistema de bombeo, considerando en las simulaciones las condiciones necesarias de generación y compensación reactiva, correspondientes al arranque particular de cada motor.

6.5.2.1 CONDICIONES DE LA RED DE TRANSMISION EN ESTADO ESTABLE PREVIAS AL INICIO DEL ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA

En los diagramas 6.10 a 6.13 se aprecian las condiciones de operación en estado estable de la red, previas al inicio del arranque de cada uno de los motores. Por ejemplo, en el diagrama 6.10 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 1er. motor en PB2, observándose en operación la unidad 1 de la central Ixtapantongo y la unidad 1 de la central Santa Bárbara. En el diagrama 6.11 se muestran las condiciones operativas previas al arranque del 2do. motor en PB2, considerándose ya en línea el 1er. motor de PB2, y así sucesivamente, conforme se va completando en las simulaciones, el proceso de puesta en operación de los motores, se va modificando la información en los diagramas unifilares, hasta alcanzarse la conclusión del proceso, con la incorporación del 2do. motor localizado en la planta PB4, que corresponde al diagrama 6.13. En el diagrama 6.13a se muestran las condiciones operativas en estado estable, considerando ya en operación los seis motores que conforme al estudio, deben ser alimentados por el Sistema Miguel Alemán.

Con todos los motores ya en línea, no es conveniente permitir la operación de la red de transmisión con niveles de voltaje mayores al máximo de diseño (123 KV), por lo que se recomienda desconectar la compensación capacitiva. En el diagrama 6.13b se muestran las condiciones de operación de la red considerando los capacitores de las plantas de bombeo PB3 y PB4 desconectados.

En la Tabla 6.12 se indica la secuencia de arranque de los motores del Sistema de bombeo Cutzamala alimentados por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

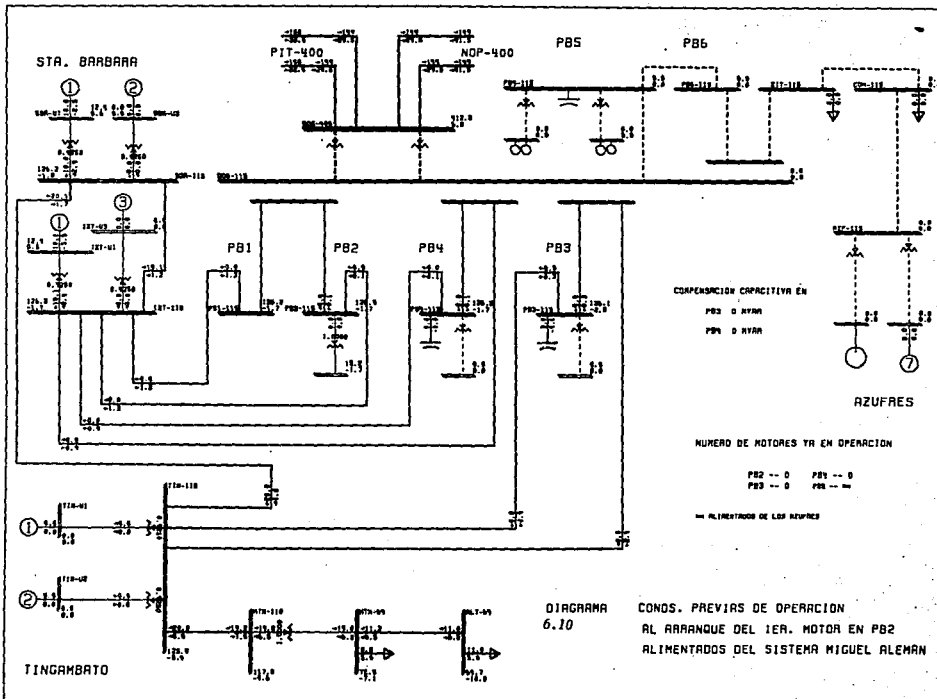
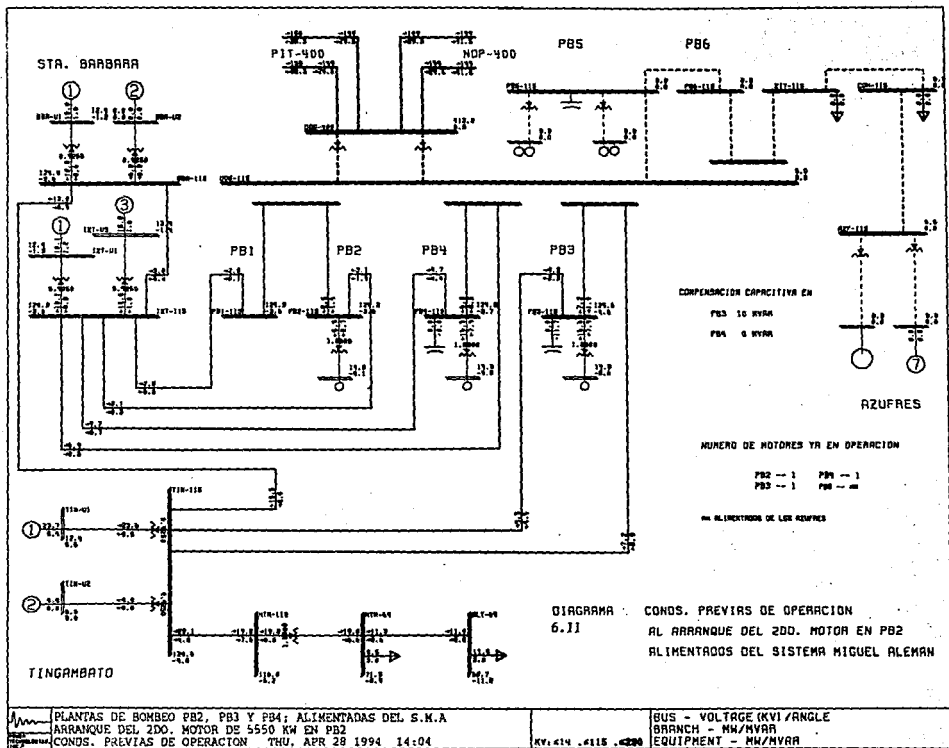
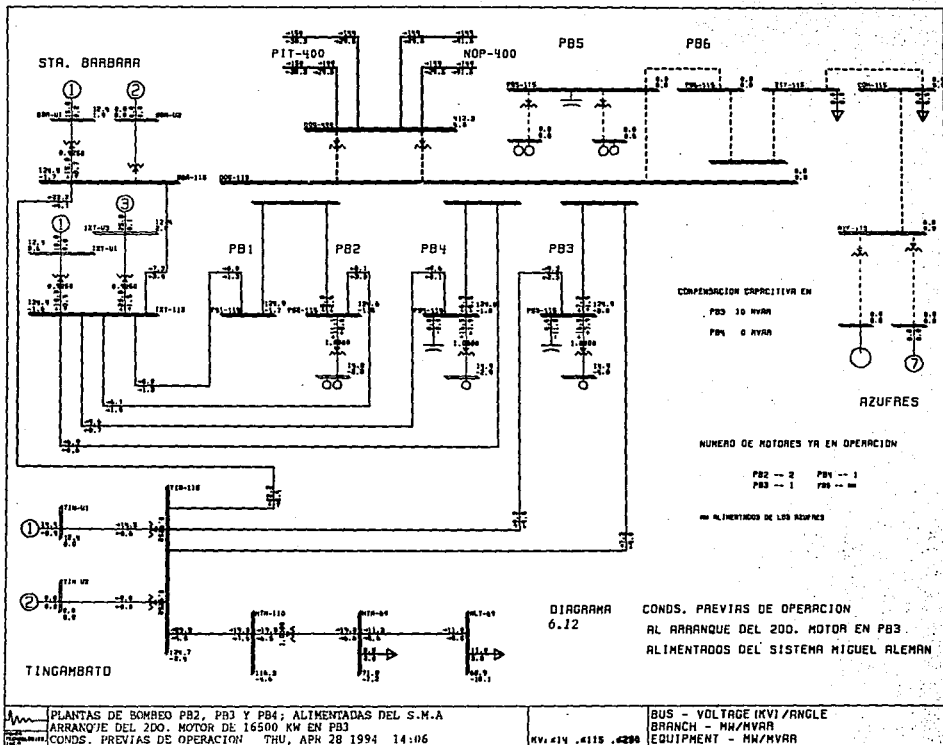
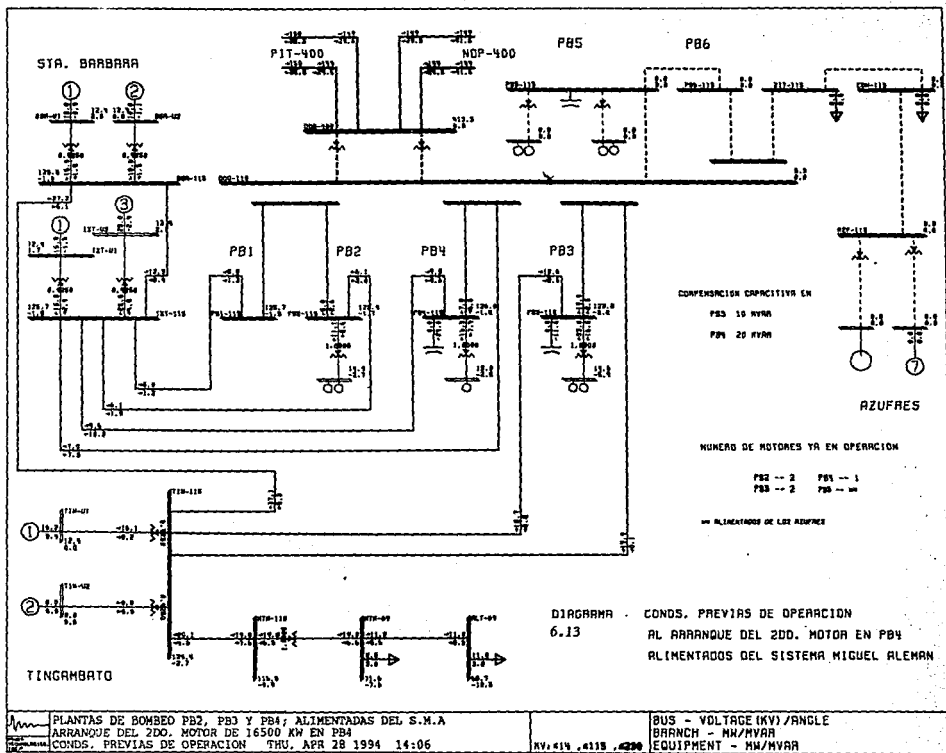


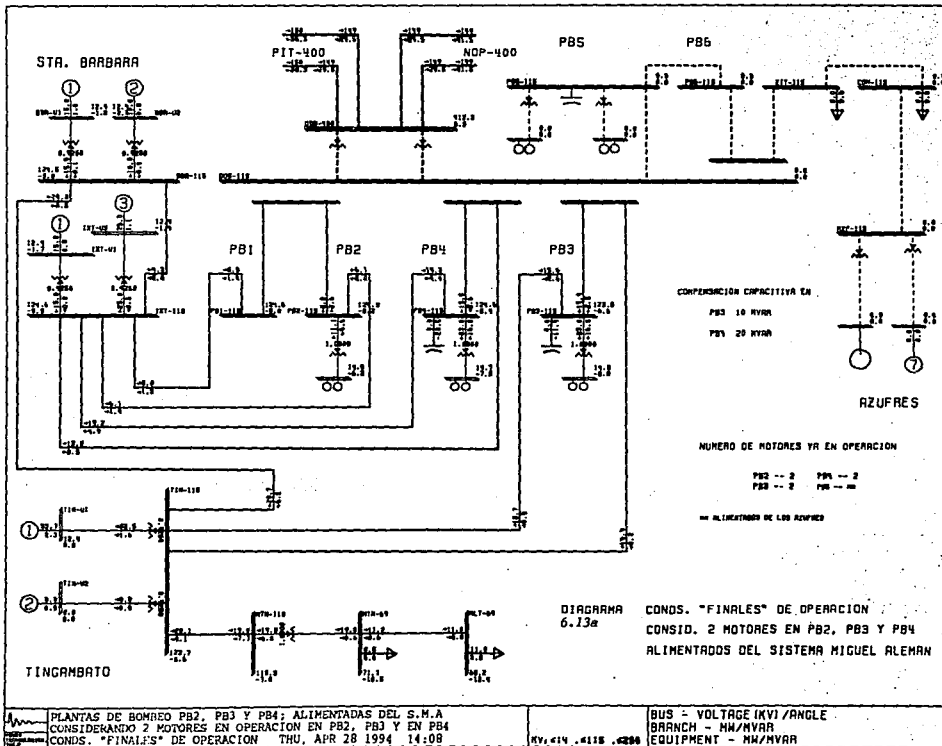
DIAGRAMA 6.10
 CONDS. PREVIAS DE OPERACION AL ARRANQUE DEL 1ER. MOTOR DE 5550 KW EN PB2 ALIMENTADOS DEL SISTEMA MIGUEL ALEMAN

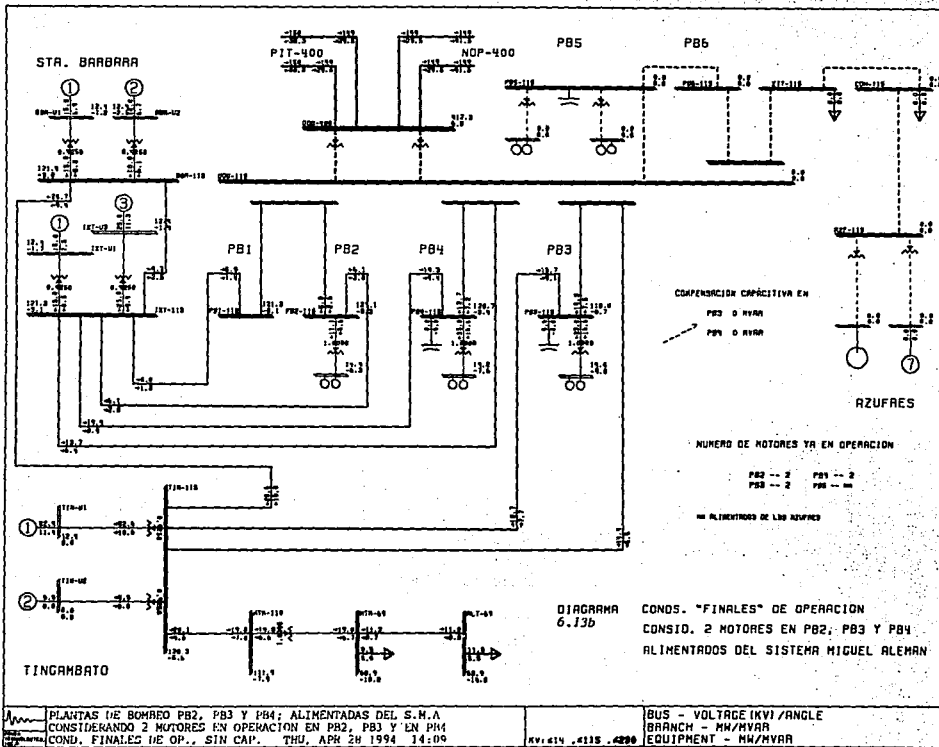
	PLANTAS DE BOMBEO PB2, PB3 Y PB4; ALIMENTADAS DEL S.M.A ARRANQUE DEL 1ER. MOTOR DE 5550 KW EN PB2 CONDS. PREVIAS DE OPERACION WED, APR 27 1994 13:44	KV, 614, #218, #220	BUS - VOLTAGE (KV)/ANGLE BRANCH - MW/MVAR EQUIPMENT - MM/MVAR
--	--	---------------------	---











**SECUENCIA DE ARRANQUE DE LOS MOTORES DEL SISTEMA DE
BOMBEO CUTZAMALA ALIMENTADOS POR EL SISTEMA
HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN**

<i>DIAGRAMA</i>	<i>MOTOR EN PROCESO DE ARRANQUE</i>	<i>MOTORES PREVIAMENTE CONECTADOS</i>	<i>UNIDADES DE GENERACION EN OPERACION</i>	<i>COMPENSACION EN MVAR's</i>	
				<i>FIJA</i>	<i>DINAMICA</i>
6.10	PB2-1	Ninguno	I XT-U1 BBR-U1	0	0
3*	PB3-1	PB2-1	+ TIN-U1	1 X 10	40
3*	PB4-1	+ PB3-1	Idem Anterior	1 X 10 (PB3)	40
6.11	PB2-2	+ PB4-1	+ I XT-U3	1 X 10 (PB3)	0
6.12	PB3-2	+ PB2-2	Idem Anterior	1 X 10	40
6.13	PB4-2	+ PB3-2	+ BBR-U2	1 X 10 (PB3) 1 X 20 (PB4)	40

3* Los diagramas unifilares no se incluyen por considerarlos repetitivos.

TABLA 6.12

6.5.2.2 COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LA RED DE TRANSMISION, DURANTE EL ARRANQUE DE LOS MOTORES DE LAS PLANTAS PB2, PB3 Y PB4

En las gráficas 6.10 a 6.13 se muestra el comportamiento dinámico de algunas de las variables más representativas, que describen el proceso de arranque de cada uno de los motores. Estas variables son las siguientes:

- El voltaje de operación, corriente y potencia consumida, correspondiente a cada uno de los motores en proceso de arranque.
- El voltaje en los buses de 115 y 13.8 KV en la planta donde se simula el arranque de cada motor.
- La frecuencia del sistema conformado por la interconexión de las unidades generadoras de las centrales hidroeléctricas con las subestaciones de las plantas de bombeo.
- El voltaje de excitación de las unidades de las centrales hidroeléctricas y los reactivos generados por éstas.

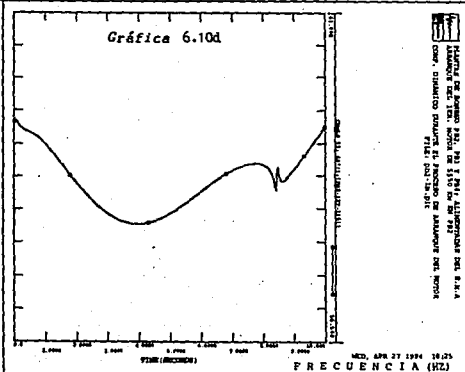
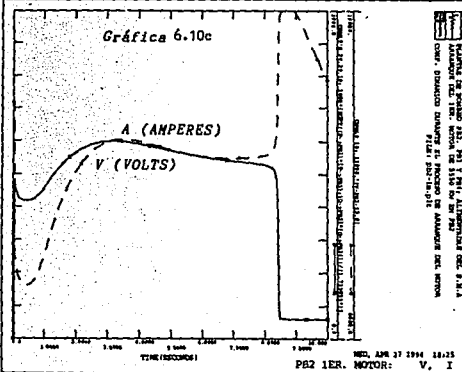
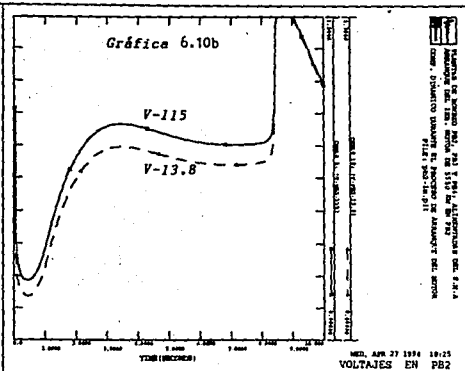
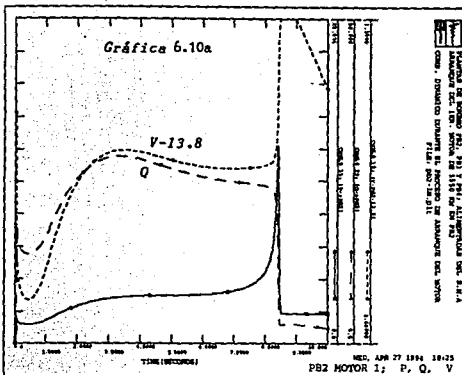
Existe una correspondencia biunívoca entre los diagramas unifilares y las gráficas antes descritas, de tal forma que para el proceso de arranque del primer motor de la planta de bombeo PB2, tanto el diagrama 6.10 como la gráfica 6.10, proporcionan de manera conjunta la información técnica relacionada con el arranque de este motor.

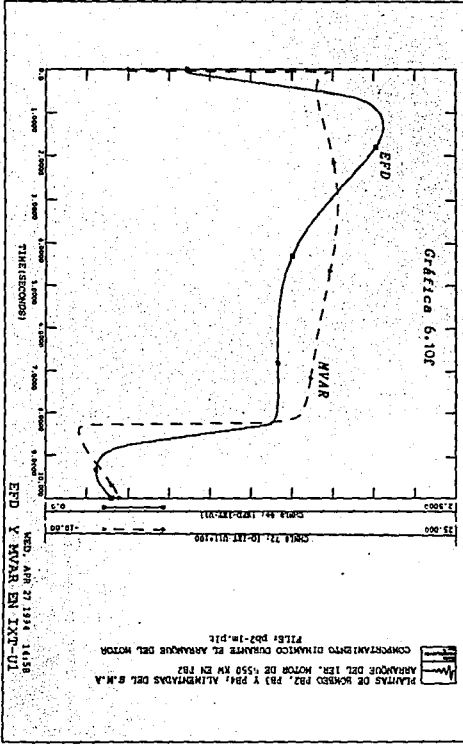
En la Tabla 6.13 se observa el tiempo que requirió el arranque de cada uno de los motores, así como sus valores mínimos instantáneos de voltaje y frecuencia alcanzados. También se indican las disminuciones instantáneas de voltaje en los motores ya en línea en las otras plantas de bombeo.

**CAIDAS MAXIMAS DE VOLTAJE Y FRECUENCIA EN LOS BUSES DE 13.8 KV DE LAS PLANTAS
DE BOMBEO PB2, PB3 Y PB4, DURANTE EL ARRANQUE DE SUS MOTORES**

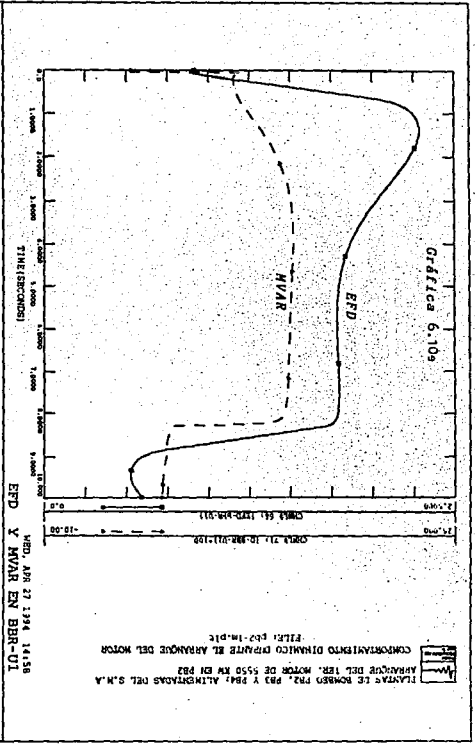
PLANTA DE BOMBEO	ARRANQUE DEL MOTOR		VOLTAJE INSTANTANEO MINIMO ALCANZADO EN P.U. EN LOS BUSES DE 13.8 KV DE LAS PLANTAS			FRECUENCIA MINIMA ALCANZADA EN LOS BUSES DE 13.8 KV (HZ)
	No.	TIEMPO EMPLEADO (Segundos)	PB2	PB3	PB4	
PB2	1	8.4	0.6962	-	-	59.1
	2	7.9	0.9020	0.9585	0.9497	59.7
PB3	1	6.8	0.8370	0.7110	-	58.4
	2	7.3	0.9122	0.7502	0.9173	57.7
PB4	1	7.0	0.7890	0.7850	0.7095	58.5
	2	6.6	0.8480	0.8118	0.7501	59.1

TABLA 6.13

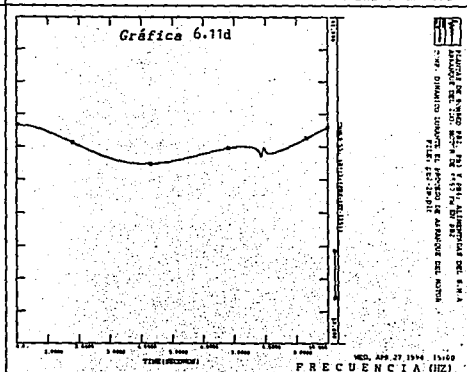
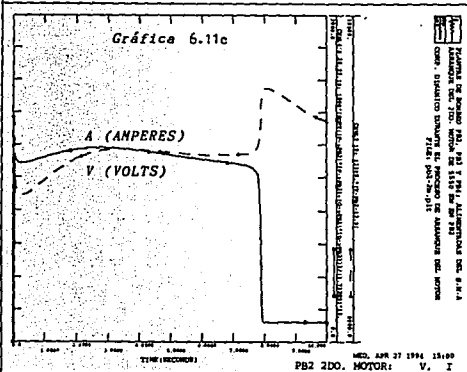
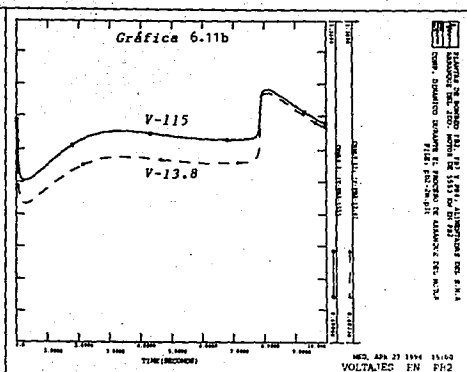
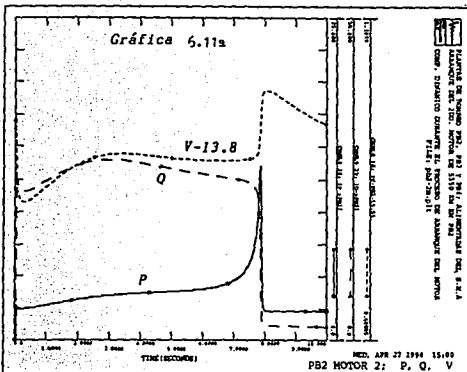


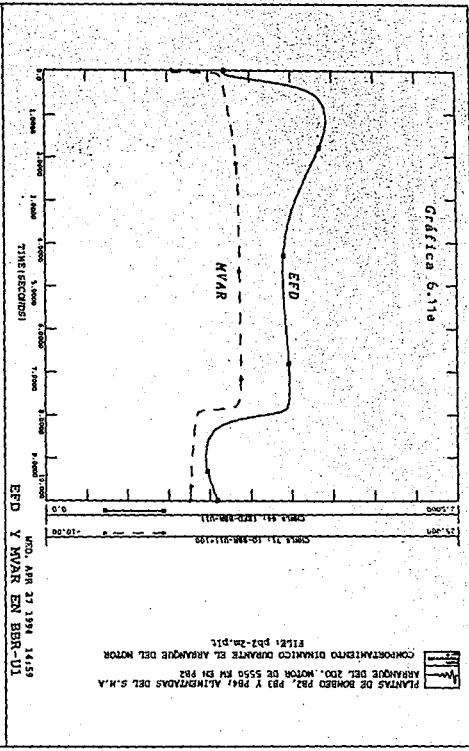
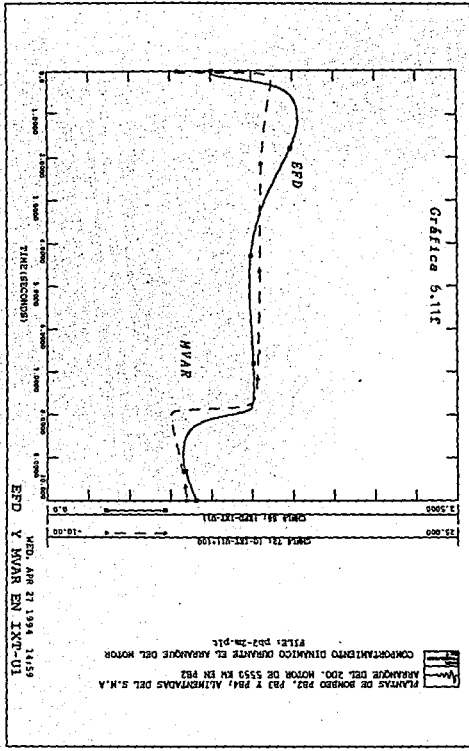


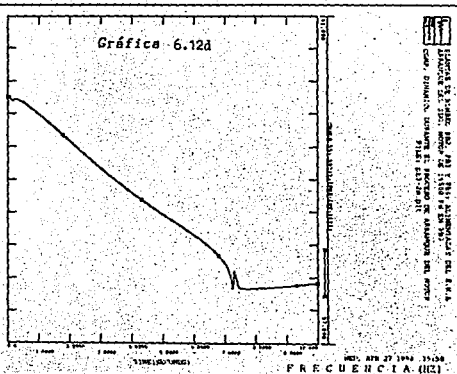
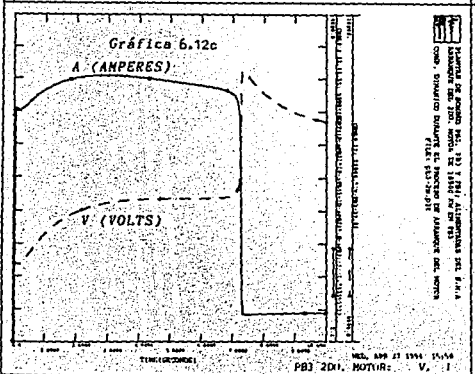
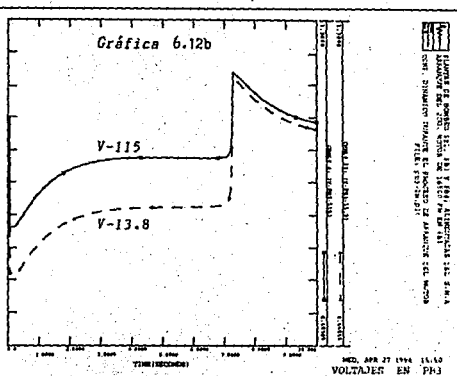
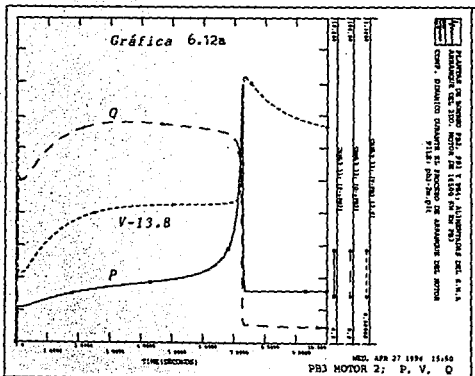
MD, APR 27 1994 14:58
 EPD Y NVAR EN TXT-UI

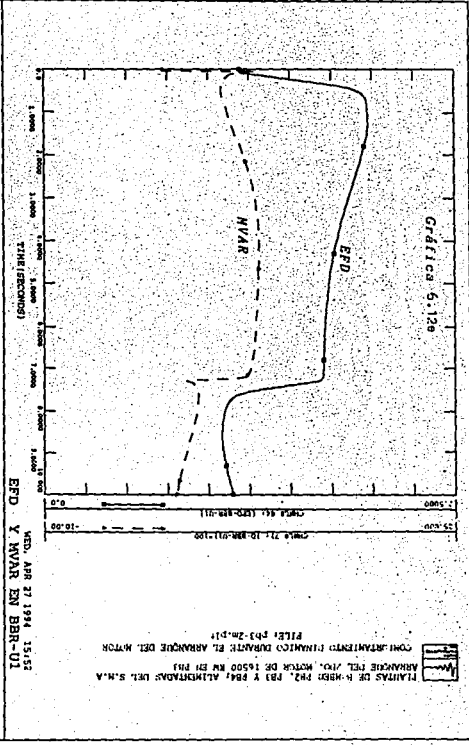
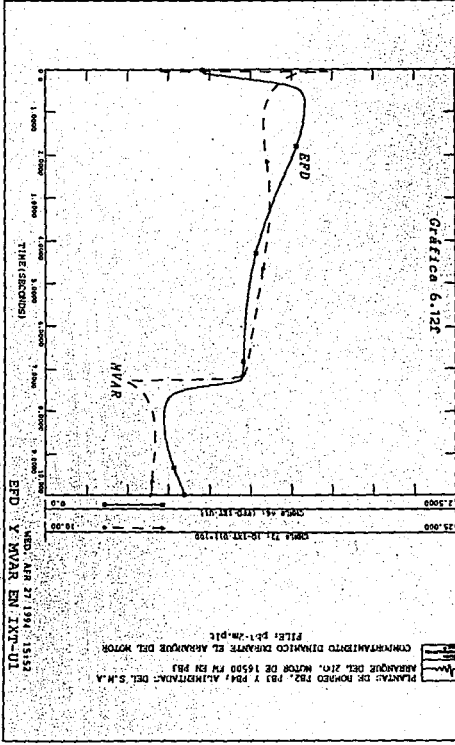


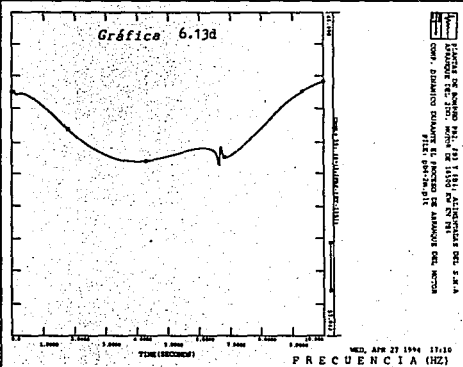
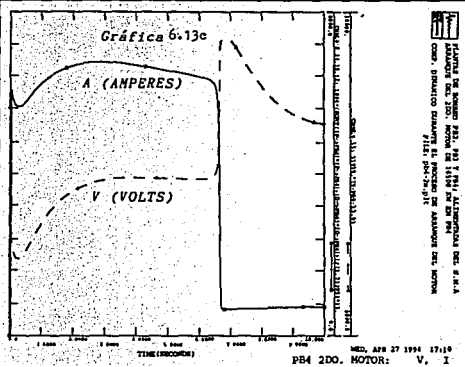
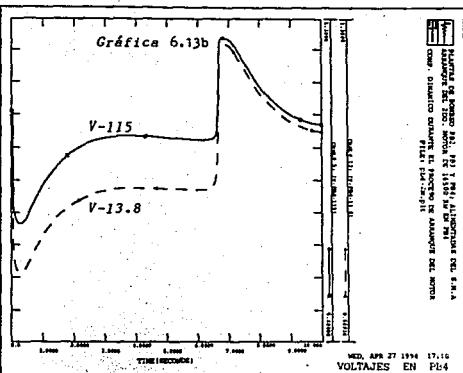
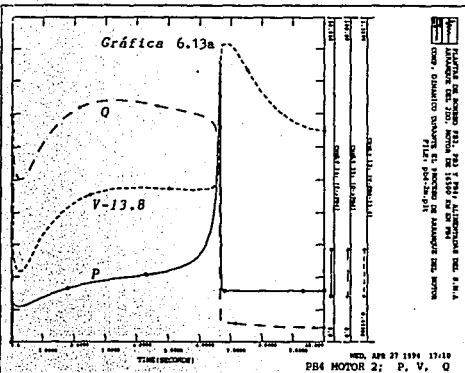
MD, APR 27 1994 14:58
 EPD Y NVAR EN BBR-UI

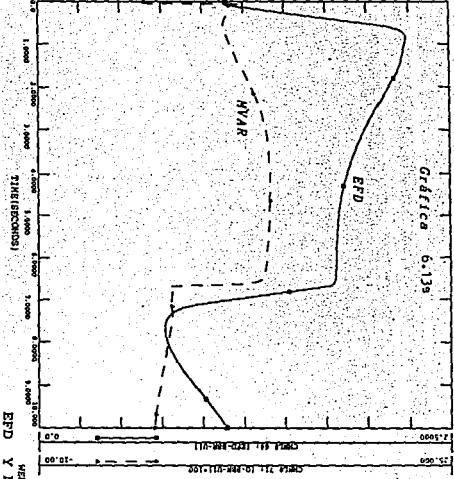






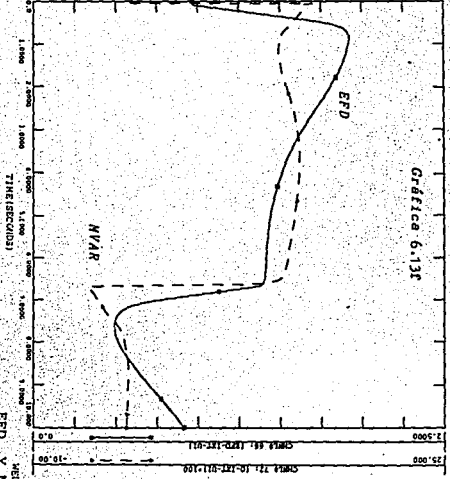






PLANTAS DE BOMBEO P22, P23 Y P24; ALIMENTADAS DEL S.M.A.
ARRANQUE DEL 2DO. MOTOR DE 16500 KM EN P24
CONFORMAMIENTO DINAMICO DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR
FILE: p24-2m.plc

WBD, APR 27 1994 17:14
Y NVAR EN BBR-UI



PLANTAS DE BOMBEO P22, P23 Y P24; ALIMENTADAS DEL S.M.A.
ARRANQUE DEL 2DO. MOTOR DE 16500 KM EN P24
CONFORMAMIENTO DINAMICO DURANTE EL ARRANQUE DEL MOTOR
FILE: p24-2m.plc

WBD, APR 27 1994 17:14
EFD Y NVAR EN IXT-UI

6.6 CONCLUSIONES

6.6.1 PARTICULARES DE CADA CASO

OPCION 2: PLANTA DE BOMBEO PB5 ALIMENTADA POR LA CENTRAL GEOTERMICA DE LOS AZUFRES.

- Se concluye que si es factible alimentar de manera satisfactoria los motores de la planta de bombeo PB5 desde la central geotérmica de los Azufres, si son utilizados los recursos de generación, transmisión y compensación reactiva capacitiva considerada en el estudio. Esto es válido, inclusive para la condición que considera indisponibilidad física del bus de 115 KV de la subestación Donato Guerra.
- Es indispensable disponer de la compensación reactiva fija y dinámica instalada en la planta PB5, para mantener el soporte de voltaje, mínimo necesario, durante el proceso de arranque de los motores.
- En este análisis se consideró como única fuente la conformada por la central geotérmica de los Azufres, sin embargo, es conveniente disponer adicionalmente del soporte de voltaje proporcionado a través del enlace de 115 KV proveniente de la subestación Nochistongo; se mejorarían notablemente las condiciones operativas de la planta PB5. Por tanto, de ser posible, se recomienda que para iniciar el arranque de los motores de la planta PB5, se haga uso de la central geotérmica de los Azufres y del enlace proveniente de la SE. Nochistongo.

OPCION 3: SUMINISTRO ELECTRICO PROPORCIONADO POR UNIDADES DEL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN.

A- Considerando la disponibilidad física del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra.

- De acuerdo a los resultados obtenidos del presente estudio, se concluye que si es factible la operación de las plantas de bombeo del sistema Cutzamala, alimentadas mediante el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, siempre y cuando se utilicen los recursos de generación, transmisión y compensación capacitiva considerados.

- Aún cuando en el presente estudio, el envío inicial de suministro de energía eléctrica a la planta de bombeo PB5, se efectuó mediante una sola unidad generadora de la central Ixtapantongo; es conveniente, que en el caso de que realmente se presentara esta situación, el inicio de suministro de energía eléctrica se lleve a cabo con dos unidades generadoras (Por ejemplo, 1er unidad en la planta hidroeléctrica Ixtapantongo y 1er unidad en la planta hidroeléctrica Santa Bárbara) alimentando una carga inicial del orden de 15 MW, y de ser posible, con un mayor número de líneas de transmisión conectadas. Esto con el propósito de disponer de mayor soporte de voltaje y evitar una disminución significativa en el valor de la frecuencia.

B- Considerando que no existe disponibilidad física del bus de 115 KV de la SE. Donato Guerra.

- De acuerdo a los resultados obtenidos del presente estudio, se concluye que es factible la operación de las plantas de bombeo PB2, PB3 y PB4, alimentadas mediante el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, aún sin la interconexión de su red asociada con el bus de 115 KV de Donato Guerra. Esto, siempre y cuando se utilicen los recursos de generación, transmisión y compensación capacitiva considerados.
- Se requiere la disponibilidad de por lo menos las unidades de generación contempladas en el estudio y de la compensación reactiva instalada en las plantas PB3 y PB4, para mantener el soporte de voltaje, mínimo necesario, en las dos redes de transmisión, durante el proceso de arranque de los motores de bombeo del Sistema Cutzamala.

CAPITULO VII

ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN CAMPO E INVERSIONES REQUERIDAS

Las actividades que a continuación se mencionan se deben considerar como el complemento al presente trabajo de tesis, ya que, forman parte de una recopilación de información proporcionada por áreas de trabajo dedicadas a la puesta en marcha de los proyectos como el que aquí se trata. Lo anterior es necesario para validar los estudios tanto en régimen dinámico como permanente tratados en el capítulo anterior y, una vez realizado esto, contar con una representación confiable del sistema eléctrico propuesto. El estudio de los generadores, protecciones..., quedan fuera de nuestro objetivo, sin embargo se mencionan para, como anteriormente se señaló, complementar este trabajo.

En este capítulo se proporciona la información relacionada con las actividades de campo así como del aspecto económico requerido para el desarrollo del presente proyecto considerando las diferentes posibilidades de solución.

7.1 ACTIVIDADES PARA CONECTAR LA PLANTA SANTA BARBARA A LA RED DE 115 KV.

Las actividades contempladas para el desarrollo del presente proyecto fueron llevadas a cabo en dos etapas. La primera se cumple con la entrada de la Central Hidroeléctrica Santa Barbara a 115 kV. La segunda etapa es necesaria para cumplir con el proyecto definitivo.

7.1.1 ACTIVIDADES SIN AFECTAR REGIMEN DE GENERACION(4 HORAS)

1ero Entronque en la LT . IXT-83080 a la LT. EDB-73200

- 1.1 Abrir puentes en las estructuras de remate de ambas líneas
- 1.2 Conectar puentes entre LT's IXT-73080 y EDB-73200.
- 1.3 Cambio de ajuste de protección de la LT EDB-73200.
- 1.4 Cambio de ajustes de protección de la LT IXT-73080.

2do Cambios en U - 3 de BBR.

- 2.1 Cambio de ajustes de protecciones de U - 3 para operar a 115 kV
- 2.2 Cambio de la relación del transformador de unidad.
TAP ALTA .- DEL 5 AL 1 (150 A 135 KV)
TAP BAJA .- CONTINUA TAP 1 (13.1 KV)

7.1.2 ACTIVIDADES AFECTANDO REGIMEN DE GENERACION (2 A 6 HORAS)*

1ero LIBRAR LT. BBR-83050

1.1 Cambio de ajuste de protección de la LT. BBR-83050

1.2 Fase de LT. 83050 alimentada desde la Subestación Eléctrica Donato Guerra.

2do CONECTAR UNIDAD BBR-U3 A RED DE 115 KV PARA:

2.1 Comportamiento de unidad en:

-temperaturas,vibraciones,voltaje,corriente.

Para llevar acabo estas pruebas fué necesario adecuar la red eléctrica para la interconexión entre la P.H Sta. Bárbara y la planta de bombeo No. 2 a través de la barra de 115 kV de la S.E Donato Guerra, tal y como se muestra en el diagrama 7.1.

Es importante mencionar que a la fecha, las tres unidades de la P.H Sta. Bárbara siguen operando interconectadas al Sistema de 115 kV de Donato Guerra a través de la planta de bombeo 2.

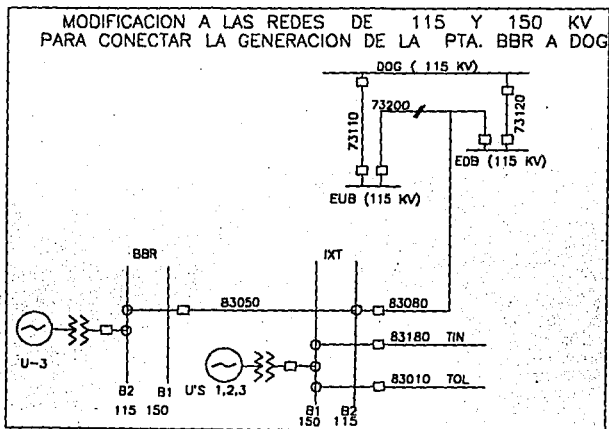


Diagrama 7.1 /

*El tiempo máximo estimado es en caso de que no sea satisfactorio el fiasco y se requieran cambiar puentes.

7.2 REQUERIMIENTOS PARA LA CONVERSION DE VOLTAJE DE 150 KV. A 115 KV EN SANTA BARBARA.

7.2.1 SE's. Y LT's.

- Arreglo de líneas de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 7.1
- Cambio de Tap's en el transformador de potencia de la U-3 de la C.H Sta. Bárbara.
- Instalación de un juego de transformadores de potencial de 115 kV en la barra No. 2 para los esquemas de protección y sincronización de línea y generador.

7.2.2 PROTECCIONES.:

- Instalación y puesta en servicio de esquemas de protección de distancia tipo SEL-121F, en la Subestación Santa Bárbara y Donato Guerra para asegurar el funcionamiento de la red con alta confiabilidad.
- Cambio de ajustes en los esquemas de protección de distancias LZ92-1 de la Subestación planta de Bombeo No. 2 .
- Cambio de ajustes en los esqemas de protección No. 3 de la unidad para operar a 115 kV. 51V, 87T, 59.
- Pruebas de faseo entre línea y generador .

Con las actividades realizadas anteriormente se procedió a sincronizar la unidad con objeto de revisar el comportamiento de la misma y del transformador observando lo siguiente:

7.2.3 GENERADOR.

El día 9 de junio de 1994, a las 18:00 hrs., se sincronizó la unidad No. 3 de la P.H Sta. Bárbara para operar en 115 kV y conectada en la forma de "tap" a la red de asociada al bombeo No. 2 .Revisándose tanto el comportamiento de la unidad generadora como del transformador elevador asociado.

Se anexa hoja de registro del comportamiento a 115 kV. de la unidad, de la cual se concluye lo siguiente:

- a) Se instaló el relevador de distancia SEL-121F en la unidad No. 3 de generación de Sta. Bárbara, lo cual permitió el monitoreo de voltajes y corrientes de dicha unidad, aprovechando los TCs y TPs asociados a este equipo.
- b) De la comparación de los parámetros de medición cuando la unidad generadora operaba a 150 kV , con los parámetros de operación a 115 kV, se observó una variación ligera en lo que respecta al voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva. Esto da la seguridad de que la operación de las unidades en 115 kV. es posible, sin la repercusión en el deterioro de los equipos.

- c) En la temperatura del generador se observó un incremento de 2°C respecto a cuando operaba a 150 kV.

En conclusión el cambio de operación a 115 kV. del generador no varía considerablemente los parámetros.

En las tablas 7.1 a 7.4 se muestra la lectura tomada de la puesta en marcha del 1er generador de la C.H Santa Barbara, en las cuales se puede observar que, para mantener en sincronización esta 1er unidad, se fueron tomando lecturas de los parámetros de funcionamiento del mismo, en un rango muy amplio de tiempo, el necesario como para asegurar que la unidad está operando en buenas condiciones .

Como se puede observar, cada tabla corresponde a una fecha diferente. Esto se hizo con el fin de tener un alto grado de confiabilidad en la puesta en marcha de esta 1er unidad.

Cabe señalar que este mismo procedimiento, se siguió para todas y cada una de las unidades de las centrales generadoras que conforman el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. En el presente estudio se muestra solamente el de la primera unidad puesta en marcha, por considerarse como un procedimiento modelo para las demás.

LECTURA 1

10-JUNIO-94

HORA	VOLTAJE (kV)			CORRIENTE (Amperes)			Volt Piloto	Volt Princ.	C. D. Corriente Excit.	Carga Activa	Carga Reactiva	TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS (°C)				
	4A	4B	4C	4A	4B	4C	Volts	Volts	Amperes	MW	MVAR	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
19:05	12.4	12.35	12.4	945	950	940	102	150	267.5	18.6	7.4	36	36.5	35.8	36.2	36.1
8:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	53.5	54	54
8:30	12.4	12.4	12.4	980	1000	950	125	170	278.2	20	5	54	54	53.5	54	54
9:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	53.5	54	54
9:30	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54.2	54	54	54
10:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54.2	54	54	54
10:30	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20.2	4.7	54	55	54	54	54
11:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	4.7	54	55	54	54	54
11:30	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	54	54	54
12:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	54	54	54
12:30	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	54	54	54
13:00	12.4	12.4	12.4	980	1000	980	125	170	278.2	20	5	54	54	54	54	54
13:30	12.5	12.5	12.5	1130	1130	1130	125	195	308	23	7	60	60	60	60	60
14:00	12.5	12.5	12.5	1130	1130	1130	125	195	308	23	7	60	60	60	60	60
14:30	12.5	12.4	12.5	1130	1140	1130	125	195	308	23	6.3	60.1	61.9	60.2	60.2	61
15:00	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1140	125	195	308	23	6	61	62	60.2	61	61.8
15:30	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1130	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
16:00	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1130	125	195	308	23.2	6	61	62	61	61	62
16:30	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1130	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
17:00	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1130	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
17:30	12.5	12.4	12.5	1130	1150	1130	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
20:00																
20:30																
21:00																

TABLA 7.1

LECTURA 2

11 - JUNIO - 94

HORA	CORRIENTE (Amperes)			VOLTAJE (kV)			Volt Piloto	Volt Priac.	C. D. Corriente Excit. Amperes	Carga Activa MW	Carga Reactiva MVAR	TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS (°C)				
	φA	φB	φC	φA	φB	φC						Volts	Volts	No. 1	No. 2	No. 3
18:00	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
18:30	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
19:00	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
19:30	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
20:00	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
20:30	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
21:00	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
21:30	1130	1150	1130	12.5	12.4	12.5	125	195	308	23	6	61	62	61	61	62
22:00	910	930	930	12.6	12.5	12.6	125	179	286	18	7	54	55	54	54	54
22:30	920	940	920	12.6	12.5	12.6	125	179	286	18	7	53	54	53	53	53
23:00	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
23:30	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
24:00	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
24:30	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
01:00	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
01:30	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
02:00	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
02:30	910	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
03:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
03:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
04:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
04:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
05:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
05:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
06:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52

TABLA 7.2

LECTURA 3

12-JUNIO-94

HORA	CORRIENTE (Amperes)			VOLTAJE (Kv)			Volt Piloto	Volt Princ.	C. D. Corriente Excit. Amperes	Carga Activa MW	Carga Reactiva MVAR	TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS °C				
	φA	φB	φC	φA	φB	φC						No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
6:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
7:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
7:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
8:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
8:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	52	53	52	52	52
13:00	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	50	51	50	50	50
13:30	920	930	920	12.6	12.6	12.6	125	179	286	18	7	51	52	51	51	51
14:00	920	930	920	12.6	12.6	12.4	125	179	286.7	18	6	52	53	52	52	52
14:30	990	1010	1000	12.4	12.6	12.4	125	178	286.7	20	6	53	54	53	53	53
15:00	990	1010	990	12.4	12.4	12.4	125	178	286.7	20	6	53	54	53	53	53
15:30	990	1010	990	12.4	12.5	12.4	125	178	286.7	20	6	54	55	53	54	54
16:00	990	1010	1000	12.4	12.5	12.4	125	178	286.7	20	6	54	55	54	54	54
16:30	990	1010	1000	12.4	12.5	12.4	125	178	286.7	20	6	54	55	54	54	54
17:00	990	1010	1000	12.4	12.5	12.4	125	178	286.7	20	6	54	55	54	54	54
17:30	990	1010	1000	12.4	12.5	12.4	125	178	286.7	20	6	54	55	54	54	54
18:00	990	1010	1000	12.4	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	54	55	54	54	54
18:30	990	1010	1000	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	54	56	54	55	55
19:00	990	1010	1000	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	54	56	54	55	55
19:30	990	1010	1000	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	54	56	54	55	55
20:00	990	1010	1000	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	54	56	54	55	55
20:30	990	1010	990	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	55	56	55	55	55
21:00	990	1010	990	12.5	12.5	12.5	125	178	286.7	20	6	55	56	55	55	55
21:30																
22:00																
22:30																

TABLA 7.3

7.2.4 TRANSFORMADOR:

En lo referente a la temperatura máxima registrada en el banco de potencia operando a 115 kV fue de 56° C. La temperatura máxima registrada operando el banco a 150 kV fué de 52° C.

7.2.5 CONCLUSIONES:

Con el cambio de operación de la Unidad a 115 kV. se comprueba lo realizado en el análisis efectuado en el capítulo anterior.

Con esto se puede afirmar que, es factible operar en estado estable las 3 Unidades de la C.H Santa Bárbara por lo que se tomaron licencias para la conversión a 115 kV.

7.3 ETAPA I

Despues de haber realizado la revisión en campo, de la topología de la red existente funcionando a 150 kV, se procedió a determinar los elementos necesarios, en cuanto a material y equipo, que se requieren para poder efectuar la conexión a 115 kV, que es la tensión necesaria para el correcto funcionamiento de las plantas de bombeo que constituyen el Sistema Cutzamala.

A medida que se fué haciendo el recorrido por el área que ocupa el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y el Sistema de Bombeo Cutzamala se tomó nota de los elementos a requerir para la interconexión de los dos Sistemas

7.3.1 REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN

El material y equipo considerado para la puesta en marcha de este proyecto, fué el que se enumera en la siguiente relación:

7.3.1.1 REQUERIMIENTOS PARA SANTA BARBARA E IXTAPANTONGO

En protecciones

De equipo y material:

- gabinete para TP's 115 kV
- 3 relevadores SEL-121F
- 500 metros de cable Flexanel
- 1000 metros de cable de control
- juego de fusibles tipo botella para TP's
- zapatas azules 3/16 cerradas 1000 pz.
- material miscelaneo (2 relés 87H)

De recursos humanos:

- un Ingeniero
- dos Técnicos

Subestaciones

De equipo y material:

- 3 TP's para 115 kV
- 3 bases para TP's 115 kV en bus
- trinchera para TP's

De recursos humanos:

- contratista
- brigada de mantenimiento eléctrico

Líneas:

De equipo y material:

- 15 postes de 21 mts
- 3 Km de cable ACSR
- 50 cadenas de aislamiento
- lote de herraje
- 2 Km de guarda
- 5 crucetas para 115 kV
- 3 juegos de retenidas
- 15 varillas de tierras con cable

De recursos humanos:

- B.T Colorines
- B.T Toluca

Control

De equipo y material:

- miscelaneas 1 lote

De recursos humanos:

- 2 Ingenieros
- 2 Técnicos

Plantas:

De equipo y material:

- miscelaneas 1 lote

7.4 ETAPA No 2

7.4.1 REQUERIMIENTOS EN SANTA BARBARA

Para subestaciones:

- 5 TP's de 115 kV, ventiladores y control para bancos
- 15 apartarrayos 96 kV (L.T 83030 y 83070)
- 5 Km de hilo piloto
- instrumentación para TR's
- 9 cuchillas 13 kV para máquina

Protecciones :

- 1 relevador SEL-121F
- 2 multimedidores
- 2 registradores de disturbios
- 2 esquemas 87H BBR e IXT
- 10 Km de cable de control

7.4.2 REQUERIMIENTOS EN IXTAPANTONGO

Protecciones :

- 3 relevadores SEL-121F
- 2 esquemas 87H IXT-PB1
- 2 secciones tableros de control
- 4 multimedidores
- 20 Km de cable de control
- 1 lote miscelaneo (zapatas, cable, tablillas, etc)
- 4 registradores de disturbios

Subestaciones :

- 8 TP's 115 kV
- 24 apartarrayos
- 2 Km hilo piloto
- instrumentación para transformadores

Obras civiles :

- rehabilitar trincheras
- rehabilitar tapas
- rehabilitar pisos de concreto
- pintar estructuras con alquitran de hulla
- red de tierras IXT - BBR
- desague en subestación Tingambato

7.4.3 REQUERIMIENTOS EN LA CENTRAL TINGAMBATO

Subestaciones :

- 7 TP's
- 21 apartarrayos
- 12 TC's para 115 kV

Protecciones :

- 4 registradores de disturbios
- 1 multimedidor

Líneas :

- construcción de 12 Km de líneas de doble circuito de la boquilla a PB4
- habilitar 1 Km de línea en entronque a PB1 (definitivo)
- 4 Km de poste para hilo piloto de PB1 A IXT (concreto)
- 5 Km de poste para hilo piloto IXT - BBR (concreto)
- cambio de postes de madera a concreto de LT's 13.8 kV
centrales : IXT - BBR, BBR - TIN, IXT - DUR,
RADIALES (88 Km)

7.4.4 REQUERIMIENTOS EN SUBESTACION DONATO GUERRA

De equipo y material :

- 33 TP's para 115 kV
- 2 verificadores de sincronismo.

7.5 ANALISIS ECONOMICO DE LAS OPCIONES DE SUMINISTRO

A continuación se presenta la información concerniente a las inversiones requeridas para la: *ALTERNATIVA DE SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA AL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA*, analizando las diferentes opciones planteadas con anterioridad.

7.5.1 SUMINISTRO A TRAVES DE LA S.E AGUSTIN MILLAN II (Opción 1)

Como antecedentes a esta obra se consideraron, en su planeación, dos aspectos de importancia:

- a) El SHMA paulatinamente tiende a reducir su energía de generación, debido a que los recursos hidráulicos para abastecer de agua potable a la Ciudad de México y área conurbada son cada vez mayores.
- b). Con la entrada en operación de la C.T Petacalco se presenta la necesidad de suministrar mayor energía hacia el Area Central del país. La S.E San Bernabe cuenta con un esquema de doble relación de transformación con valor de 400/230/150 kV y una capacidad de 990 MVA en 230 kV y 780 MVA en 150 kV.

Tomando en cuenta estos antecedentes y dado que el banco de transformación de la S.E San Bernabe, operando actualmente en la relación de 400/150 kV , se encuentra sub-utilizado, se consideró la ventaja de operar este banco en la relación 400/230 kV modificando la red asociada a la Ciudad de Toluca y a la S.E Estadio. Con esta conversión de voltaje se resuelve parcialmente el problema de suministro de energía al área Central por medio de la S.E. San Bernabe, que en estas condiciones de operación absorbe más carga.

La S.E Agustín Millán II se programó con la finalidad principal de contar con una fuente de transformación que permitiera drenar la energía generada por el SHMA en la tensión de 150kV al bus de 115kV en la S.E Donato Guerra, y de esta manera aprovechar esta energía para el Sistema de Bombeo Cutzamala.

Como anteriormente se mencionó la S.E Agustín Millán II se incluyó en el POISE con fecha de entrada en operación para el año de 1996. Las características de esta subestación son las siguientes:

4 AT-1F-75 MVA-150/115KV-4/7
1 A 115 KV L.T. SAN MATEO
2 A 115 KV L.T DONATO GUERRA
2 A 115 KV L.T TEJUPILCO
1 A 115 KV L.T AGUSTIN MILLAN
1 A 115 KV L.T STO. TOMAS
1 A 150 KV L.T S.E DURAZNO
1 A 150 KV L.T IXTAPANTONGO
1 A 150 KV L.T PARA EL DOBLE CIRCUITO PROCEDENTE DE LA
S.E IXTAPANTONGO
1 A 150 KV L.T PARA EL DOBLE CIRCUITO PROCEDENTE DE
TINGAMBATO

En la tabla 7.5 se muestra el programa de obras asociadas a esta subestación, así como las inversiones correspondientes.

Es conveniente mencionar que considerando los criterios previamente establecidos, esta obra satisface, el drenar la energía generada por el SHMA al Sistema de Bombeo Cutzamala, a través de la barra de 115 kV de la S.E Donato Guerra.

PROGRAMA DE INVERSIONES PARA LA SUBESTACION AGUSTIN MILLAN

<i>N_a</i> <i>OBRA</i>	<i>CARGO</i> <i>CONST.</i>	<i>N_a</i> <i>PAQ.</i>	<i>NOMBRE</i>	<i>TENSION</i> <i>(KV)</i>	<i>PUESTA</i> <i>EN OPERA</i> <i>CION.</i>	<i>COSTO</i> <i>TOTAL</i> <i>MILLON \$</i>
6HUX1	AG	34	LT A. MILLAN II ENTQ. TINGAMBATO-IXT-DZO.	150	ENE-96	638
6HUY1	AG	34	S.E A. MILLAN II BCO. 1 225 MVA 150/115 KV	150/115	ENE-96	23,905
6HT11	AG	34	L.T A. MILLAN-TEJUPILCO	115	ENE-96	7,300
084W4	AG	34	2A S.E TEJUPILCO	115	ENE-96	2,453
6HPV1	AG	34	L.T A. MILLAN-TEJUPILCO(AVANDARO TAP)	115	ENE-96	236
<i>TOTAL DE OBRAS</i>						34,532

Nota: el costo es referido al año de 1994.

TABLA 7.5

7.6 INVERSIONES REQUERIDAS PARA ADECUAR LA RED ELECTRICA ASOCIADA AL SISTEMA HIDROELECTRICO

A manera de interconectar el SHMA y el Sistema de Bombeo Cutzamala, se requiere de las obras que se muestran en la tabla 7.6. La tabla 7.7 nos muestra los requerimientos de equipo para el funcionamiento del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán en red de 115 kV. La tabla 7.8 proporciona un resumen comparativo de las diferentes opciones contempladas en nuestro trabajo de tesis, tal y como se consideraron en el proyecto original.

OBRAS REQUERIDAS PARA INTERCONECTAR EL SISTEMA DE BOMBEO CUTZAMALA AL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMAN

<i>Nombre de la Obra</i>	<i>Características</i>	<i>Inversión (millón de N\$ de 1994)</i>
PB4-Entq. P.H Ixtapantongo-El Alamo	115KV-2C-10KM-795ACSR/TA	2,842.494
PB3-Entq. P.H Tingambato-Odon de Buen	115KV-2C-7KM-795ACR/TA	1,989.743
PB1-Entq. P.H Ixtapantongo-Toluca	115KV-2C-1KM-795ACSR/TA	284.249
TOTAL		5,116.486

Nota : las inversiones son referidas al año de 1994.

TABLA 7.6

REQUERIMIENTOS DE EQUIPO PARA EL FUNCIONAMIENTO CONFIABLE DEL SISTEMA HIDROELECTRICO "MIGUEL ALEMAN" EN RED DE 115 KV.

PARTIDA	CANTIDAD	EQUIPO	CARACTERISTICAS	COSTO UNITARIO NIS	COSTO PUESTA EN SERVO.	OBSERVACIONES	NOTAS
1	1	Planta de emergencia C.H Istapatsongo	150 KV	250,000	30,000	Sustitución de equipo por encontrarse en malas cond.	A)**
2	1	Planta de emergencia C.H Santa Bárbara	150 KV	250,000	30,000	Sustitución de equipo por encontrarse en malas cond.	A)**
3	2	Sistema de excitación estática y AVR C.H Istapatsongo unidades 1 y 2	150KW	700,000	200,000	Sustitución de equipo	B)**
4	1	Sistema de excitación estática y AVR C.H Istapatsongo unidad 3	270KW	450,000	150,000	Sustitución de equipo	B)**
5	3	Sistema de excitación estática y AVR C.H Santa Bárbara unidades 1, 2 y 3	150 KW	1050,000	200,000	Sustitución de equipo	B)**
6	3	Sistema de excitación estática y AVR C.H Tingambato unidades 1, 2 y 3	150 KW	—	650,000	Sustitución de equipo	B)**
7	1	Regulador automático de velocidad de la C.H Istapatsongo unidad 3	Para unidad de 50MW 600 rps	300,000	100,000	Sustitución de equipo	B)**
8	1	Regulador automático de velocidad de la C.H Santa Bárbara unidad 3	Para unidad de 25MW 600 RPM	400,000	80,000	Sustitución de equipo	B)**
9	10	Inversores para motores de la C.H Istapatsongo unidades 1 y 2	Varias potencias	60,000	—	Equipo nuevo	C)**
10	4	Inversores para motores de la C.H Santa Bárbara unidades 1 y 2	Varias potencias	20,000	—	Equipo nuevo	C)**

Nota: los costos son referidos al año d. 1994.

TABLA 7.7

- A).- Se tendrá que adquirir equipo para sustituir el actual en malas condiciones y reparación incosteable.
- B).- Se tendrá que sustituir este equipo ya que el tipo y tiempo de operación, no responde correctamente a las variaciones del sistema.
- C).- Se tendrá que adquirir equipo, para poder tener posibilidad de "arranque negro" con estas centrales utilizando los bancos de baterías de las mismas.
- Se considera la instalación a corto plazo de este equipo : 01/03/95
 - ** El equipo no incluido en el punto anterior se deberá considerar a mediano plazo 01/09/96

RESUMEN COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES OPCIONES

OPCION	REQUERIMIENTOS	INVERSIONES (MILES DE N\$) AÑO 1994	OBSERVACIONES
Suministro de energía eléctrica al Sistema Cutzamala a través de la S.E. Agustín Millán II (Opción 1)	Subestación Agustín Millán y red asociada	34,532.00	Contemplada actualmente en el POISE y su objetivo principal es el de permitir el flujo de energía eléctrica generada en el SHMA hacia la S.E. Donato Guerra en 115 KV
Suministro de energía eléctrica al Sistema Cutzamala a través de la S.E. Nochistongo y la C.G. Los Azufres (Opción 2)	Esquema de protecciones y comunicaciones Control supervisorio		Se puede implementar en forma inmediata para suministrar energía a la Planta de Bombeo No. 5 exclusivamente en caso de no contar con los bancos de la S.E. Donato Guerra. Lo que implica un suministro parcial de 9 m ³ /seg de agua potable a la Cd. de México y áreas conurbadas.
Suministro de energía eléctrica al Sistema Cutzamala operando el SHMA A 115 KV (Opción 3)	Red eléctrica asociada al Sistema Cutzamala. (L.T 115 KV-18 KM-795ACSR-TA) doble circuito	5,116.00	Se puede suministrar energía al Sistema Cutzamala en su totalidad de manera continua y confiable durante 30 días sin contar con la fuente de la S.E. Donato Guerra

Nota: las inversiones son referidas al año de 1994.

TABLA 7.8

CONCLUSIONES GENERALES

Las principales conclusiones derivadas de este proyecto son las siguientes:

- 1.- De los diferentes estudios realizados, es factible la operación del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán en la tensión de 115 kV, teniéndose bien definidas la políticas de generación del Sistema en su conjunto, tanto en estado normal como en emergencia.
- 2.- Del análisis de las diferentes opciones planteadas, la opción 3 que consiste en el suministro de energía eléctrica al Sistema de Bombeo Cutzamala operando el Sistema Miguel Alemán a 115 kV, es la opción que requiere menor inversión para llevarse a cabo, garantizando la totalidad de suministro de agua potable a la Ciudad de México. La implantación de esta opción, es prácticamente inmediata.
- 3.- Considerando la conclusión anterior, la opción 3 sustituye las obras correspondientes a la S.E Agustín Millán y su red asociada actualmente incluidas en el Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico.
- 4.- Se requieren de inversiones en forma inmediata para implementar la operación en 115 kV del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y la red asociada, y así estar en condiciones de efectuar las pruebas de arranque de los motores, coordinación de protecciones, ajustes de controles y enlaces de comunicación que permitan garantizar la operación satisfactoria del sistema hidroeléctrico antes mencionado.
- 5.- En caso de contingencia mayor en la S.E Donato Guerra, es factible mantener el 56% ($9\text{m}^3/\text{seg.}$) del suministro de agua potable a la Ciudad de México, alimentando exclusivamente PB5 del Sistema Cutzamala, contando con la generación total de la Central Geotérmica Los Azufres y de la energía aportada a la barra de 115 kV de la S.E Donato Guerra proveniente de la S.E Nochistongo. El periodo de operación en estas condiciones depende de la capacidad de almacenamiento de agua de la presa Villa Victoria cuya capacidad total es de 210 millones de metros cúbicos. Se estima que alcance el agua para 30 días.

RECOMENDACIONES

1. Durante el arranque de los motores, es necesario considerar una carga del orden de 20MW a la barra de 115 de la S.E Donato Guerra . Esto es con la finalidad de evitar un abatimiento crítico de la frecuencia en los motores.
2. Se requiere del ajuste de protecciones de los motores de las estaciones de bombeo, tomando en consideración los estudios dinámicos correspondientes.
3. De los estudios en régimen permanente , en terminos generales, se observó que el voltaje en la barra de 115 kV de la S.E Donato Guerra, así como el voltaje en las plantas de bombeo, presentan voltajes del orden de 3.7 % (119.5 kV), por lo que se recomienda considerar el impacto de esta tensión en los motores.
4. Durante la etapa de la red que contempla a las plantas Santa Bárbara e Ixtapantongo conectadas a Donato Guerra en 115 kV a través de dos líneas y ante la eventualidad de no disponer de las barras de 400 kV de esta última subestación, se señala lo siguiente:

Para una generación total de 150 MW entre Santa Bárbara e Ixtapantongo al dispararse por falla monofásica cualquier tramo de línea entre Ixtapantongo y Donato Guerra, los turbogeneradores de estas centrales soportan las contingencias sin problemas de sincronismo. Sin embargo, por restricciones de límite térmico en el tramo Ixtapantongo a Planta de Bombeo 2, es necesario desconectar automáticamente 75 MW de generación en estas centrales. También por cuestiones de seguridad operativa, al quedar un circuito con un flujo de 150 MW, se recomienda la incorporación de un esquema de disparo automático de generación que desconecte 75 MW al dispararse cualquier tramo de 115 kV entre Ixtapantongo-Donato Guerra.

5. Para garantizar la operación del SHMA en 115 kV es de vital importancia realizar las pruebas de arranque de motores de las plantas de bombeo.
6. En este mismo periodo los niveles de voltaje de operación en la zona Toluca, de acuerdo a estudios efectuados, no sufren cambios significativos una vez que el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán opere en 115 kV y aislado eléctricamente de esta zona. La calidad de energía proporcionada a la zona de Toluca se incrementará una vez que se realice la conversión de voltaje a 230 kV en la S.E San Bernabé.

BIBLIOGRAFIA

- Power Technologies, Inc.
Manual de Operación y Aplicación del programa PSS/E
- Irving L. Kosow.
Máquinas Eléctricas y Transformadores.
Prentice Hall.
- Matsch.
Máquinas Eléctricas y Transformadores.
Representaciones y servicios de ingeniería.
- Enríquez Harper Gilberto.
Curso de Transformadores y Motores de Inducción.
Limusa.
- Edwin P. Anderson.
Electric Motors.
Mac. Millan publishing Company. .
- Fitzgerald.
Electric Machinery.
Mc Graw Hill.
- Staff.
Circuitos Magnéticos y Transformadores.
Reverte. 352-377 pp.
- Paul C. Krause.
Electromechanical Motion Devices.
Mc. Graw Hill.