



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CONCEPTUALIZACIÓN DE GENERADORES Y TRANSFORMADORES DE UNIDAD PARA UN MODELO A ESCALA REDUCIDA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

DANIEL GERMÁNICO ORBE JÁTIVA

danielorbe1994@gmail.com

DIRECTOR: DR. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA

jjativa@yahoo.com

QUITO, AGOSTO 2014

DECLARACIÓN

Yo, Daniel Germánico Orbe Játiva, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y. que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Daniel Germánico Orbe Játiva

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Germánico Orbe Játiva, bajo mi supervisión.

DR. JESÚS JÁTIVA
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Jesús Játiva por haberme dado la oportunidad de realizar el presente proyecto, y por su permanente orientación y apoyo.

Al Dr. Gabriel Salazar por brindarme sus valiosos consejos y por haberme permitido gracias a su apoyo el culminar mis estudios.

A la Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado la oportunidad de adquirir valiosos conocimientos y obtener un título profesional.

DEDICATORIA

A mis amigos, mis padres, mis maestros y todas las personas que de alguna u otra manera me han ayudado a lograr que este sueño se haga realidad. A quienes me brindaron su apoyo cuando todo parecía perdido, mi eterna gratitud y cariño.

CONTENIDO

RESUMEN	1
PRESENTACIÓN	2
CAPÍTULO 1	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	5
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	6
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	8
1.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SNI	9
1.7 ESQUEMA Y ANÁLISIS DEL MODELO A ESCALA DEL SNI	13
1.7.1 SISTEMA DE GENERACIÓN	14
CAPÍTULO 2: EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL LABORATORIO	26
2.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	26
2.2 CONTRIBUCIONES REALIZADAS Y FUNCIONAMIENTO ESTIMADO DEL LABORATORIO	29
2.2.1 ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA	31
2.2.2 ANÁLISIS DE FALLAS DE CORTOCIRCUITOS	35
2.2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA	35
CAPÍTULO 3: SUBSISTEMA DE TRANSFORMACIÓN	38
3.1 FUNDAMENTO TEÓRICO	38
3.1.1 EL TRANSFORMADOR	38
3.1.2 MODELOS DEL TRANSFORMADOR CON TAPS	39
3.2 MODELAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES	46
3.2.1 REDUCCIÓN DE PARÁMETROS A UNA ESCALA ADECUADA	46
3.2.2 MODELO DE TRANSFORMADORES DEL LABORATORIO	48
3.3 MODELAMIENTO DE LOS NLTC's	54
CAPÍTULO 4: ELEMENTOS DE GENERACIÓN	56
4.1 FUNDAMENTO TEÓRICO	56
4.1.1 EL GENERADOR SINCRÓNICO	56
4.1.2 EL MOTOR DC	63

4.1.3	EL MOTOR DE INDUCCIÓN _____	66
4.2	MODELAMIENTO ELÉCTRICO _____	69
4.3	MODELAMIENTO MECÁNICO _____	75
4.3.1	MECÁNICA DE CUERPOS ROTATORIOS _____	75
4.3.2	INERCIA DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA _____	78
4.4	SISTEMA MOTOR- GENERADOR _____	101
4.5	ESQUEMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL _____	102
CAPÍTULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS _____		106
5.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	106
5.2	ESTUDIOS ELÉCTRICOS A REALIZARSE EN EL SISTEMA DEL LABORATORIO _____	110
5.2.1	ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA _____	110
5.2.2	ESTUDIO DE FALLAS DE CORTOCIRCUITOS _____	113
5.2.3	ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA _____	117
CAPÍTULO 6 _____		132
5.1	CONCLUSIONES _____	132
5.2	RECOMENDACIONES _____	133
BIBLIOGRAFÍA _____		134
ANEXO 1: Despacho de Unidades de Generación _____		137
ANEXO 2: Parámetros Eléctricos de Transformadores del SNI _____		151
ANEXO 3: Parámetros Eléctricos de Generadores del SNI _____		156
ANEXO 4: Parámetros de Motores DC y de Inducción del Laboratorio _____		160
ANEXO 5: Parámetros de Generadores Síncrónicos del Laboratorio _____		170
ANEXO 6: Esquema del Sistema en Digsilent Powerfactory _____		175
ANEXO 7: Presupuesto Estimado del Equipo Modelado _____		1777

RESUMEN

Se presenta una visión general del proyecto de modelo a escala del Sistema Nacional Interconectado (SNI), que se proyecta implementar en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional para la formación de estudiantes y el incentivo a la investigación relacionada con los Sistemas Eléctricos de Potencia.

El modelo del SNI consta de 6 barras con su respectiva generación y carga, 11 grupos motor – generador suministran la potencia al sistema, a través de 5 líneas de transmisión alimentadas a un voltaje de 1 kV. Se contempla la inclusión de generación hidroeléctrica y termoeléctrica, emulando el actual parque generador nacional y los proyectos de generación futuros como Toachi – Pilatón, Coca Codo Sinclair, Sopladora y Cardenillo.

Se conceptualizan los parámetros eléctricos y mecánicos de generadores y transformadores de unidad, de modo que el funcionamiento del sistema reducido se asemeje al comportamiento del sistema real. Se utilizan valores típicos para los parámetros de las máquinas debido a la amplia complejidad y la dificultad de reducir el Sistema Interconectado Nacional a 6 barras.

Se ha previsto que el modelo del SNI permita realizar estudios en estado estable y transitorio. Se comprueba mediante simulación en el programa *DigSilent Power Factory* el comportamiento del sistema y su funcionalidad para diversos estudios.

PRESENTACIÓN

Este trabajo se ha dividido en seis capítulos en los cuales se desarrollan los siguientes temas:

En el Capítulo 1 se presenta una introducción al presente proyecto, incluye sus objetivos, alcance, justificación y características generales. Se presenta un esquema general del modelo reducido en su etapa de generación y transformación.

En el Capítulo 2 se analiza la configuración del modelo a escala del SNI, sus módulos, componentes y áreas funcionales. Se realiza una breve descripción de los estudios que se pueden realizar en el sistema y las contribuciones del mismo a la formación académica y a la investigación.

En el Capítulo 3 se incluye el modelamiento de los transformadores del sistema y su cambiador de taps. Se realiza la correspondiente reducción de parámetros a escala del laboratorio para emular el comportamiento del SNI.

En el Capítulo 4 se aborda el área de generación del sistema. Se realiza el modelamiento eléctrico y mecánico de los generadores sincrónicos, así mismo se analiza el uso de motores como fuente motriz para simular el movimiento de las turbinas en una unidad generadora. El sistema de control de generación es esquematizado para su diseño posterior.

En el Capítulo 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los estudios de flujos de potencia, fallas y estabilidad transitoria, simulados en el programa *DigSilent Power Factory*.

En el Capítulo 6 se detallan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano en la actualidad presenta una amplia complejidad de manejo, desde el punto de vista económico, técnico y de seguridad. Al ser el CENACE, el encargado de administrar operativa y comercialmente el sector eléctrico en el Ecuador, incluyendo el Sistema Nacional Interconectado, interconexiones internacionales, y el Mercado Eléctrico Mayorista, se ha planteado una estrategia de desarrollo, complementación y modernización constante de su infraestructura técnica, que le permita cumplir con su rol esencial para el país.

En los últimos años el gobierno nacional realiza una importante inversión en el sector eléctrico, esto ha permitido la implementación de nuevos proyectos que favorecerán al desarrollo de nuestro país. Se ha dado un importante impulso a las energías renovables, aprovechando la riqueza y diversidad de fuentes de energía disponibles.

Según el Plan Maestro de Electrificación del CONELEC (2012 – 2021), en los próximos años se prevé la entrada en funcionamiento de numerosas centrales de generación, además del desarrollo de importantes proyectos en el sistema de transmisión. Estos nuevos elementos que se integran al sistema, además de los inmensos beneficios que conllevan, dificultarán los procesos de planificación, operación y mantenimiento del mismo. Hay que considerar también que las condiciones de operación y el desarrollo de los sistemas eléctricos de potencia están condicionados por los requerimientos crecientes de competitividad y de calidad de servicio.

Otro elemento importante es que la demanda de energía eléctrica crece a un ritmo acelerado, y que además la naturaleza de la carga instalada ha cambiado de tal manera que la misma ha pasado a constituirse en un elemento no lineal en

la red y por tanto de una alta complejidad. En consecuencia, los desafíos a futuro para el sector de la energía eléctrica en el país son realmente considerables.

La Escuela Politécnica Nacional históricamente se ha caracterizado por fomentar una cultura de investigación, aportando al desarrollo nacional en diferentes campos. La carrera de Ingeniería eléctrica forma profesionales con un amplio conocimiento de los Sistemas Eléctricos de Potencia, pero al mismo tiempo dichos conocimientos resultan limitados por la incapacidad para realizar prácticas donde se constata físicamente lo aprendido teóricamente.

Los laboratorios existentes en la carrera resultan obsoletos para fines de investigación, los equipos existentes en su mayoría se utilizan únicamente para prácticas de conversión de energía y máquinas eléctricas. Es por ello que resulta imperiosa la necesidad de dotar de un laboratorio práctico de Sistemas Eléctricos de Potencia a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la institución.

El presente proyecto trata de marcar un inicio para la construcción futura del laboratorio citado, el cual cuente con los elementos necesarios que favorezcan la experimentación e investigación esenciales para el desarrollo del sector eléctrico del país.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Definir un modelo a escala de los generadores y sus correspondientes transformadores para la construcción de un modelo a escala del Sistema Nacional Interconectado (SNI) reducido a 6 barras, mediante el análisis y síntesis de las centrales de generación reales, estableciendo así la base conceptual que posibilite la implementación física de dicho modelo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar en una escala adecuada los distintos parámetros de las máquinas sincrónicas, incluyendo los del tipo mecánico y eléctrico, en base a sus datos reales.
- Modelar en una escala adecuada, los transformadores correspondientes a cada unidad de generación, con sus respectivos cambiadores de taps fijos.
- Dimensionar los elementos necesarios que permitan construir físicamente el sistema de generación y transformación del modelo planteado, de manera que la respuesta del mismo resulte comparable en gran medida al sistema real del SNI.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El presente proyecto de titulación constituye una pequeña aunque importante aportación al ambicioso proyecto planteado para el laboratorio de Sistemas de Potencia y que será desarrollado por estudiantes de Pregrado y Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. El proyecto general contempla la conceptualización de los diversos elementos del sistema, construcción física, diseño de los sistemas de control, protecciones eléctricas y demás acondicionamientos del laboratorio.

El tema en el que se va a centrar el presente proyecto de titulación es la conceptualización de la parte concerniente a las etapas de transformación y generación del modelo a escala del SNI.

El sistema eléctrico del laboratorio será diseñado en base a una reducción del SNI con el afán de que la experimentación y el desarrollo tecnológico llevado a cabo en el mismo, puedan ser en gran medida aplicables al sistema real. Por tanto se toman en cuenta mayoritariamente para el modelamiento, valores reales de los elementos presentes en el SNI. Para el caso de parámetros donde la reducción

no permita estimar su valor real, se toman como base valores típicos que se prevé no afectarán significativamente a la exactitud del modelo a escala final.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

La conceptualización del SNI se realiza reduciéndolo a 6 barras principales alimentadas a 230 kV, con su respectiva generación a 13,8 kV. Los voltajes de diseño a escala reducida son de 1 kV y 220 V respectivamente.

En el plan del proyecto se contempló la realización del sistema con 5 barras, lo cual después de un análisis exhaustivo no resultó muy adecuado por lo que se decidió la incorporación de una barra adicional.

Se toman en cuenta los distintos tipos de generación presente en el SNI, incluyendo centrales del tipo hidroeléctrico y termoeléctrico, teniendo en cuenta las particularidades de cada generador. El modelamiento de turbinas se realiza mediante el funcionamiento de motores DC y de inducción, controlados y acoplados a los generadores sincrónicos.

Cada conjunto motor-generador tendrá un volante inercial, el cual permitirá emular la inercia de máquinas a escala real, mediante la variación de la constante de inercia.

Los motores DC o de Inducción, tendrán un regulador de velocidad y un control de excitación mediante software y hardware, el diseño de los sistemas de control no serán parte del estudio del presente proyecto de titulación.

En la Figura 1.1 se representa el sistema a escala del SNI a 5 barras, se incluye adicionalmente y con fines informativos, la barra atribuida a la central Coca – Codo Sinclair y proyecto de transmisión a 500 kV, los cuales cabe resaltar, no se tratarán en el presente proyecto.

Tómese en cuenta que el diagrama completo de la Figura 1.1 se muestra más adelante en la Figura 1.5.

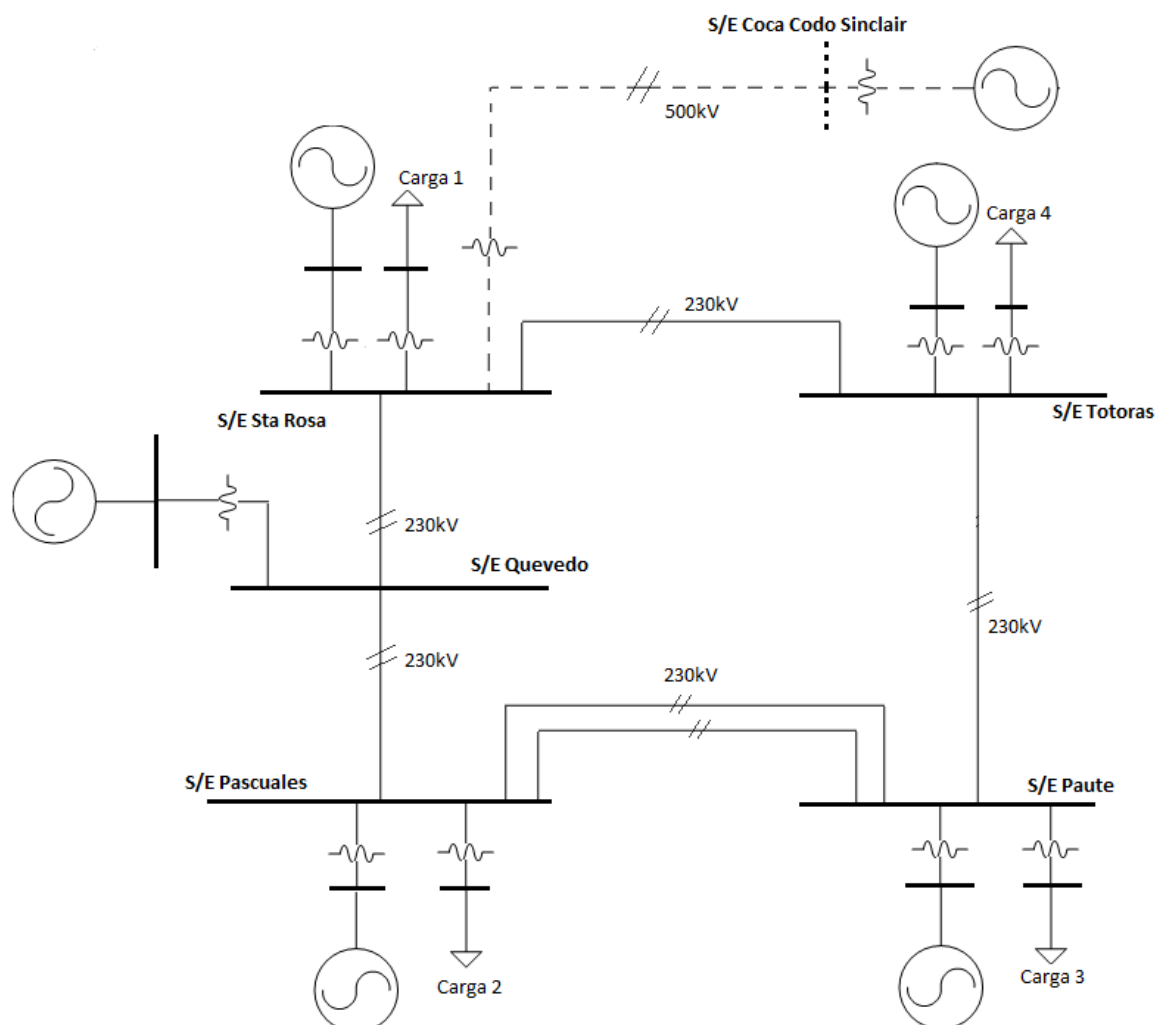


Fig 1.1 Vista General del Sistema Reducido (se incluye la barra de Coca Codo Sinclair, a pesar de que no forma parte del presente proyecto)

Los transformadores incluyen sus respectivos cambiadores de tomas sin carga en el lado de alto voltaje, para la realización de futuros estudios de control de voltaje y distribución del flujo de reactivos en el sistema.

Se toma en cuenta los parámetros eléctricos y mecánicos de los generadores, con el fin de obtener respuestas comparables a los del sistema real, debido a que estudios como los de estabilidad, implican tener una respuesta transitoria del sistema y requieren el análisis de variables propias de las máquinas muy dependientes de la parte mecánica.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad debido a la gran complejidad del SNI, incluyendo sus sistemas de control y monitoreo, resulta esencial para la formación de futuros ingenieros un entendimiento pleno de los fenómenos presentes en los sistemas eléctricos.

Con el objetivo de favorecer dicho entendimiento y promover la investigación, se ha planteado el desarrollo de un modelo a escala del SNI con un sistema de control adjunto y que contenga elementos de generación, transformación, transmisión y carga. Los mismos que al construirse, constituirán un laboratorio único que permita el estudio y la experimentación en todo lo referente a sistemas eléctricos de potencia.

La construcción de la combinación de un sistema de control de energía moderno con el modelo de sistema a escala, proporcionará al investigador y los estudiantes, un laboratorio que permita el estudio minucioso del sistema y sus componentes individuales.

Este laboratorio permitirá también desarrollar e implementar diversas estrategias de control para distintos escenarios posibles del sistema.

Las áreas de investigación que podrían ser estudiadas en el laboratorio incluyen:

1. Estabilidad de sistemas eléctricos
2. Sistemas de control
3. Operación del sistema: despacho económico, estimación de estado, y análisis de confiabilidad
4. Protecciones de sistemas eléctricos
5. Estudio y modelamiento de carga en sistemas de potencia.

Aunque en la actualidad existen programas muy avanzados para la simulación de sistemas eléctricos de potencia, éstos no permiten tener una concepción física del mismo. Es bastante habitual observar el apareamiento de fenómenos anormales

y no convencionales en el sistema real que no pueden ser analizados por un software de simulación, esto es debido a que las simulaciones llegan a ser tan buenas como los modelos pre diseñados del programa.

Existen muchos fenómenos que no pueden ser simulados por software y que solo pueden aparecer en un modelo físico, fruto de las interacciones entre sus distintos elementos y a las características propias de cada sistema. Por tanto, los modelos y resultados obtenidos de una simulación deben ser probados en un modelo físico antes de ser aplicados al sistema real.

En varias universidades de primer nivel alrededor del mundo se cuenta con este modelo de laboratorio, incluyendo universidades europeas, norteamericanas y japonesas.

1.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SNI

El Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano posee una estructura mixta, está conformado por un anillo central a 230 kV, del cual surgen diversas ramificaciones de sistemas radiales a 138 kV.

Su topología ha sido influenciada a lo largo del tiempo por la localización geográfica de las fuentes de energía primaria y los principales centros de consumo.

La generación eléctrica en el país históricamente ha tenido dos principales fuentes: los recursos hídricos y el petróleo, por lo que actualmente se cuenta con una matriz energética constituida principalmente por centrales térmicas e hidroeléctricas.

Cabe resaltar que el 83% de la capacidad existente en centrales hidroeléctricas está constituida principalmente por seis grandes centrales: Paute Molino (1.100 MW), Mazar (160 MW), San Francisco (230 MW), Marcel Laniado (213 MW), Agoyán (156 MW) y Pucará (73 MW).

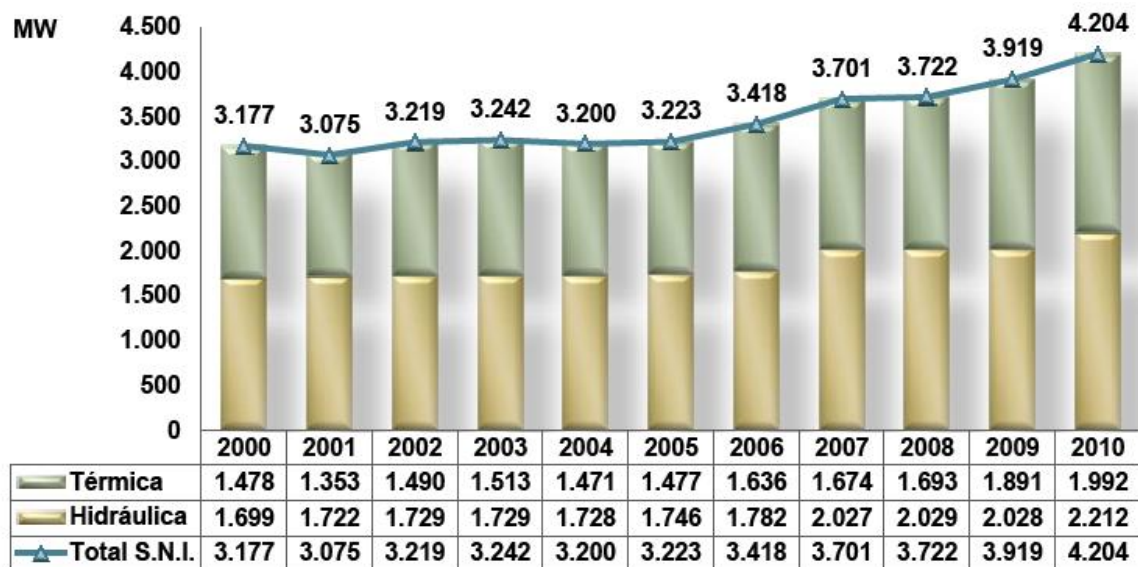


Fig 1.2 Evolución de la Capacidad de Potencia Efectiva en el SNI
Periodo 2000-2010 [1]

En la Figura 1.2 se puede identificar las principales fuentes de generación eléctrica del país y su evolución a través de la década anterior. Se proyecta que en los próximos años, la energía hidroeléctrica se posea en gran medida como la mayor fuente de energía en Ecuador, como resultado de un ambicioso plan de cambio de la matriz energética impulsado por el gobierno nacional.

En la actualidad el Gobierno Nacional impulsa el desarrollo de importantes proyectos de generación hidroeléctrica como son: Coca Codo Sinclair (1.500 MW), Sopladora (487 MW), Toachi Pilatón (253 MW). Además de otros proyectos que se detallan en la Tabla 1.1, los cuales entrarían en funcionamiento los próximos años.

Tabla 1.1 Expansión de Generación en Ecuador 2012-2021 por tecnología

Año	Hidroeléctrica [MW]	Térmica [MW]	Eólica [MW]	Geotérmica [MW]
2012	69	236	16,5	
2013	33,1	180		
2014	58,8	196		
2015	1097			
2016	1776			

2017			30	50
2018	30			
2019				30
2020				
2021				
Total	3063,9	612	46,5	80

El mapa energético ecuatoriano se está modificando debido al desarrollo de nuevos proyectos de generación hidroeléctrica, lo que implica que en años futuros se reduzca a cantidades mínimas el despacho de generación termoeléctrica en el país y principalmente en la ciudad de Guayaquil, lo cual obliga a una mayor solicitud del sistema troncal de transmisión, mediante el cual se atiende a esta zona del país.

Por lo mismo, dentro del Plan de Expansión del CONELEC, se contempla la integración de elementos nuevos al sistema interconectado como son la construcción del sistema de transmisión de 500 kV con sus respectivas subestaciones.

CELEC EP-TRANSELECTRIC determinó que la forma más adecuada para transmitir la potencia del proyecto Coca- Codo Sinclair, es la implementación de dos líneas de 500 kV entre las subestaciones El Inga, ubicada en el suroriente de la ciudad de Quito y Coca Codo Sinclair. De esta manera, la mayor parte de la producción de la central de generación Coca Codo Sinclair se la utilizaría en la zona norte del SNI.

El otro segmento del sistema de transmisión a 500 kV permitiría el enlace entre Quito (El Inga) y Guayaquil (Daule), con una subestación intermedia en la zona del centro del país (Subestación Central). Cabe resaltar que, la operación de este enlace se realizará inicialmente a 230 kV, y que la operación de la línea se realizará de manera definitiva a nivel de 500 kV, una vez que se desarrollen más proyectos de generación en la cuenca del río Guayllabamba o se concrete la integración del corredor energético de 500 kV de la región andina [1].

Con el fin de aumentar la exactitud del modelo planteado para el laboratorio, se han incluido dentro del mismo, los elementos de mayor relevancia del sistema real. De esta manera se contará con un modelo reducido de la línea con doble circuito a 500 kV que formará parte del sistema de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga, el cual se muestra en la Figura 1.3.

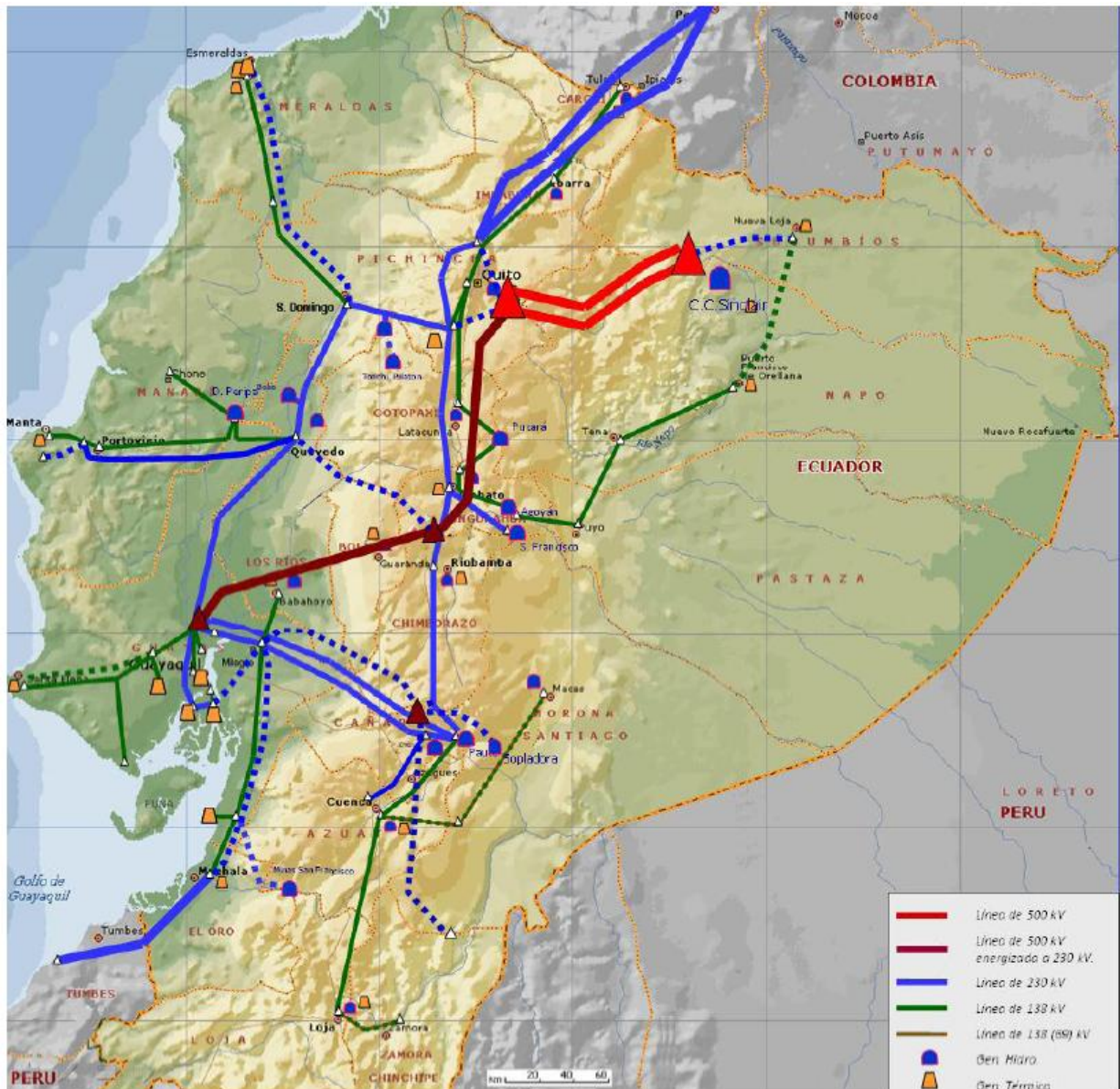


Fig 1.3 Sistema Nacional de Transmisión a 500 kV: Coca Codo Sinclair- El Inga- Central-Daule [1]

1.7 ESQUEMA Y ANÁLISIS DEL MODELO A ESCALA DEL SNI

Con el fin de simplificar el modelo, se ha concentrado en 6 barras los sistemas de generación, transmisión y carga del SNI. Se toma como referencia las zonas operativas del sistema nacional de transmisión, las cuales se detallan en la Figura 1.4.

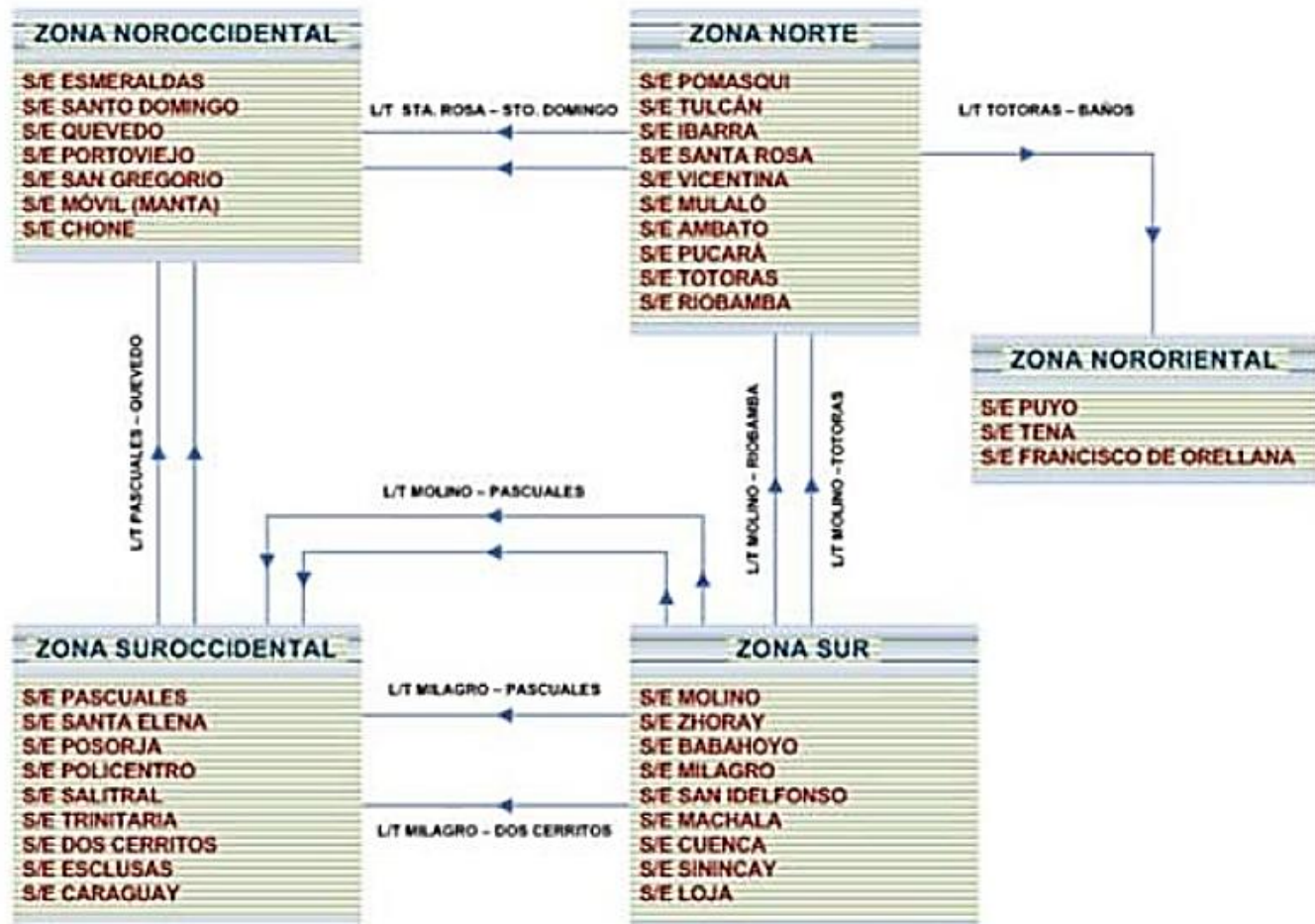


Fig 1.4 Zonas operativas del sistema nacional de transmisión [1]

En cada zona se ha seleccionado una subestación o barra principal, en base a distintos criterios como son:

- Capacidad de generación que agruparía
- Carga asociada a la subestación
- Localización geográfica y dentro del sistema
- Líneas de transmisión asociadas, tratando en lo posible de considerar las líneas más largas y/o importantes del sistema

En la Tabla 1.2 se puede apreciar las subestaciones que se han escogido como base para la reducción del sistema.

Tabla 1.2 Barras principales del sistema reducido

ZONA	SUBESTACIÓN
Noroccidental	Santa Rosa
Suroccidental	Pascuales
Norte	Totoras
Sur	Paute

Adicionalmente a la mencionada zonificación, se observó la necesidad de dividir la zona noroccidental en dos zonas independientes. Esto debido a dos razones principales:

- La línea de transmisión Quevedo-Santa Rosa tiene una extensión importante.
- La barra de Quevedo posee generación importante tanto hidroeléctrica como térmica, la cual no puede ser adicionada a ninguna de las barras vecinas.

Se decide finalmente agregar la barra Quevedo y una barra adicional, que constituiría la subestación adjunta al Proyecto Coca Codo Sinclair. De esta manera, el modelo planteado es una reducción a 6 barras del SNI, como se puede observar en la Figura 1.5, cada barra se encuentra asociada a un grupo de generación.

Cabe mencionar que el sistema de generación del proyecto en construcción Coca Codo Sinclair y su respectivo sistema de transmisión a 500 kV no forman parte del diseño del presente proyecto.

1.7.1 SISTEMA DE GENERACIÓN

Para la modelación del sistema reducido se han considerado únicamente las centrales que actualmente son despachadas por el CENACE, por tanto no se

trabaja con la capacidad instalada real del sistema. Además se han descartado algunas centrales que por razones de antigüedad y/o ineficiencia, saldrían de operación en los próximos años, debido a la inminente entrada de la nueva generación, principalmente hidroeléctrica que se encuentra en proceso de construcción o estudio.

Se realiza una evaluación de las centrales que han sido despachadas en el período comprendido entre octubre de 2011 y octubre de 2012 incluyendo así los períodos lluvioso y de estiaje.

En el Anexo 1 se resumen las tablas realizadas para el estudio.

El sistema reducido cuenta con 6 grupos de generadores, los cuales se detallan en las secciones: 1.7.1.1, 1.7.1.2, 1.7.1.3, 1.7.1.4, 1.7.1.5, 1.7.1.6, 1.7.1.7 y 1.7.1.8

1.7.1.1 Grupo Hidroeléctrico 1

El Grupo Hidroeléctrico 1 se encuentra asociado a la Subestación Paute e incluye todas las centrales del proyecto Paute Integral; es decir las cuatro centrales en cascada que aprovechan el agua de la cuenca del río Paute y están ubicadas entre las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago, así como la central hidroeléctrica Abanico, localizada en la provincia de Morona Santiago. En las Tablas 1.3 y 1.4 respectivamente se detallan las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas correspondientes al grupo hidroeléctrico 1.

Tabla 1.3 Centrales Hidroeléctricas – Grupo Hidroeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Molino	1100,0
Mazar	170,0
Sopladora	487,0
Cardenillo	400,0
Abanico	38,5
Saucay	24,0
Saymirin	14,4
Ocaña	26,0
Carlos Mora	2,4
TOTAL	2262,3

Tabla 1.4 Centrales Térmicas MCI – Grupo Hidroeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
El Descanso	19,2
Catamayo	15,2
TOTAL	34,4

Las centrales termoeléctricas de Motores de Combustión Interna MCI, detalladas en la Tabla 1.4, no serán consideradas en el diseño del modelo a escala, debido a que no representan un aporte significativo en comparación a la potencia de las centrales hidroeléctricas del presente grupo, además ambas centrales son antiguas e ineficientes que perderán espacio en el futuro.

Finalmente se considera como potencia total en el grupo 2297 MW.

1.7.1.2 Grupo Hidroeléctrico 2

El Grupo Hidroeléctrico 2 está asociado a la Subestación Totoras, dentro de este grupo se encuentran las centrales hidroeléctricas de la sierra central del país, es decir en las Provincias de Tungurahua y Chimborazo. En las Tablas 1.5 y 1.6 respectivamente se detallan las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas correspondientes al grupo hidroeléctrico 2.

Tabla 1.5 Centrales Hidroeléctricas – Grupo Hidroeléctrico 2

CENTRAL	POTENCIA [MW]
San Francisco	212
Pucará	73
Agoyán	156
Alao	10
Península	3
Río Blanco	3
TOTAL	457

Tabla 1.6 Centrales Termoeléctricas MCI – Grupo Hidroeléctrico 2

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Lligua	3,3
Jivino	60,0
TOTAL	60,3

Las centrales térmicas MCI descritas en la Tabla 1.6, no son incluidas como un generador independiente en la S/E Totoras debido a que su potencia no representa un aporte significativo.

Finalmente se considera como potencia total del grupo 517 MW.

1.7.1.3 Grupo Hidroeléctrico 3

El Grupo Hidroeléctrico 3 se encuentra asociado a la Subestación Santa Rosa, e incluye pequeñas centrales hidroeléctricas de la Sierra Centro – Norte del país. Como se puede observar en la Tabla 1.7, el principal aporte de potencia constituye el proyecto Toachi Pilatón, ubicado al sur-Oeste de Quito, aprovechando el caudal del río Pilatón, en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi.

Tabla 1.7 Centrales Hidroeléctricas – Grupo Hidroeléctrico 3

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Toachi Pilatón	254,4
Cumbayá	40,0
Nayón	30,0
Guangopolo	20,0
Recuperadora	14,7
El Carmen	8,3
Illuchi	9,7
El Ambi	8,0
San Miguel	3,0
Pasochoa	4,5
Los Chillos	1,8
La Playa	1,3
Loreto	2,0
Papallacta	6,0
TOTAL	403,7

Finalmente se considera como potencia total del grupo 404 MW.

1.7.1.4 Grupo Hidroeléctrico 4

El Grupo Hidroeléctrico 4 se encuentra asociado a la Subestación Quevedo, contiene a las centrales administradas por Hidronación, que aprovechan los ríos Daule, Peripa, y Vinces. Incluyéndose además la Central Hidroeléctrica Calope, propiedad de Enermax. La Tabla 1.8 contiene las centrales integrantes del presente grupo.

Tabla 1.8 Centrales Hidroeléctricas – Grupo Hidroeléctrico 4

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Marcel Laniado	213,0
Calope	16,6
Baba	22,0
TOTAL	251,6

Finalmente se considera como potencia total del grupo 252 MW.

1.7.1.5 Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair se encuentra ubicada en la Provincia de Napo, cantón El Chaco, constituye la central generadora más grande del país, representará el 44% y 62 % de la demanda de potencia y energía respectivamente. Aportará al Sistema Nacional Interconectado una potencia de 1500 MW.

1.7.1.6 Grupo Termoeléctrico 1

El Grupo Termoeléctrico 1 se encuentra asociado a la Subestación Pascuales, en éste grupo se incluyen las centrales térmicas del centro-sur del país, localizadas en la Región Litoral e incluidas en las Tablas 1.9, 1.11, 1.12 y 1.13.

Tabla 1.9 Centrales Termoeléctricas a Gas – Grupo Termoeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Pascuales II	136,8
Gonzalo Zevallos	26,0
Aníbal Santos	103,0
Álvaro Tinajero	78,0
Electroquil	192,0
Termogas Machala	260,0
Enrique García	96,0
Victoria II	102,0
TOTAL	993,8

Con la entrada en servicio de los grandes proyectos hidroeléctricos actualmente en proceso de construcción, además de algunas centrales térmicas de alta eficiencia, muchas de las centrales incluidas en la Tabla 1.9, resultarían obsoletas.

Consecuentemente las centrales incluidas en la Tabla 1.10, no serán consideradas para la reducción del SNI debido en gran parte a su baja eficiencia, alto costo operativo e impacto ambiental.

Tabla 1.10 Centrales Termoeléctricas a Gas no consideradas en el sistema

CENTRAL	AÑO ENTRADA A OPERACIÓN	POTENCIA [MW]
Gonzalo Zevallos	1980	26,0
Álvaro Tinajero	1995	78,0
Electroquil	1998	192,0
Enrique García	1997	96,0
Victoria II	1999	102,0

Tabla 1.11 Centrales Termoeléctricas a Vapor – Grupo Termoeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Trinitaria	133
Gonzalo Zevallos	146
Aníbal Santos	33
TOTAL	312

Tabla 1.12 Centrales Termoeléctricas de generación no convencional – Grupo Termoeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
San Carlos	28,0
Ecoelectric	27,5
Ecudos	32,8
TOTAL	88,3

Tabla 1.13 Centrales Termoeléctricas MCI – Grupo Termoeléctrico 1

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Santa Elena	210
Termoguayas	150
Generoca	34
TOTAL	394

Debido a la escasa potencia que suministra, la central hidroeléctrica Sibimbe (15 MW), no será considerada como un generador independiente y su potencia será añadida a las centrales tipo vapor.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el Grupo Termoeléctrico 1 contará con los tipos de generación descritos en la Tabla 1.14.

Tabla 1.14 Resumen de Generación – Grupo Termoeléctrico 1

TIPO	POTENCIA [MW]
Vapor	327
No convencional	88
Gas	500
MCI	394
TOTAL	1309

1.7.1.7 Grupo Termoeléctrico 2

El Grupo Termoeléctrico 2 se encuentra asociado a la Subestación Santa Rosa, incluye las centrales térmicas del sector Norte del país, más particularmente en las provincias de Esmeraldas, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas. Las centrales incluidas en el Grupo Termoeléctrico uno se detallan en las Tablas 1.15, 1.16 y 1.17.

Tabla 1.15 Centrales Termoeléctricas a Vapor – Grupo Termoeléctrico 2

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Termoesmeraldas	132,5
TOTAL	132,5

Tabla 1.16 Centrales Termoeléctricas MCI – Grupo Termoeléctrico 2

CENTRAL	POTENCIA [MW]
La Propicia	9,1
Guangopolo	32,2
Gualberto Hernández	34,2
Luluncoto	9,0
TOTAL	84,5

Tabla 1.17 Centrales Termoeléctricas a Gas – Grupo Termoeléctrico 2

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Santa Rosa	49,8
TOTAL	49,8

La central Termoeléctrica Santa Rosa cuya operación inició en 1981, no será considerada para el modelo a escala, ya que constituye una central con poca eficiencia y con un alto costo operativo. En los próximos años se prevé la salida de funcionamiento de este tipo de centrales, con el ingreso de las nuevas centrales hidroeléctricas.

Consecuentemente en la Tabla 1.18 se describen los tipos de generación que se incluyen en el Grupo Termoeléctrico 2:

Tabla 1.18 Resumen de Generación – Grupo Termoeléctrico 2

TIPO	POTENCIA [MW]
Vapor	132,5
MCI	84,5
TOTAL	217,0

1.7.1.8 Grupo Termoeléctrico 3

El Grupo Termoeléctrico 3 se encuentra asociado a la subestación Quevedo, en este grupo se encuentran las centrales térmicas ubicadas en las provincias de Los Ríos y Manabí, las mismas se detallan en las Tablas 1.19 y 1.20.

Tabla 1.19 Centrales Termoeléctricas a Gas – Grupo Termoeléctrico 3

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Miraflores	22
TOTAL	22

Tabla 1.20 Centrales Termoeléctricas MCI – Grupo Termoeléctrico 3

CENTRAL	POTENCIA [MW]
Miraflores	32
Manta II	20,4
Quevedo	100
Jaramijó	140
TOTAL	292,4

En el presente grupo, se opta por incluir la central térmica a gas Miraflores, dentro de las centrales de MCI, esto debido a que la misma no representa una potencia importante en relación al grupo de generación MCI.

Finalmente el Grupo Termoeléctrico 3 se resume en una central MCI con una potencia de 314 MW.

En la Tabla 1.21 se resume los generadores necesarios para las barras del sistema reducido del SNI:

Tabla 1.21 Cuadro Resumen de Potencia de las Centrales del sistema reducido
(se consideró un factor de potencia de 0.9).

S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Hidroeléctrica	2297,0	2552,0
S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Hidroeléctrica	517,0	574,0
S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Hidroeléctrica	404,0	449,0
Térmica a Vapor	132,5	147,0
Térmica MCI	84,5	94,0

S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Hidroeléctrica	252,0	280,0
Térmica MCI	314,0	349,0
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Térmica a Vapor	415,0	461,0
Térmica a Gas	500,0	555,5
Térmica MCI	394,0	437,8
S/E COCA CODO SINCLAIR		
Tipo de Generación	Potencia [MW]	Potencia [MVA]
Hidroeléctrica	1500,0	1666,7

Se define finalmente que el sistema consta de 12 generadores: 5 hidroeléctricos, 2 térmicos a vapor, 1 térmico a gas y 3 térmicos de MCI.

En la Figura 1.5 se puede observar la disposición de las unidades de generación en el sistema, cabe resaltar que el sub-sistema perteneciente a la Central Coca Codo Sinclair no es parte del estudio del presente proyecto de titulación.

Tómese en cuenta que los generadores mostrados en la Figura 1.5 constituyen en la práctica grupos de generación, es decir que los mismos agrupan generadores de un mismo tipo, ya sea éstos hidroeléctricos o termoeléctricos. El diagrama unifilar del sistema reducido con la respectiva desagregación de generadores se puede observar en el Anexo 6.

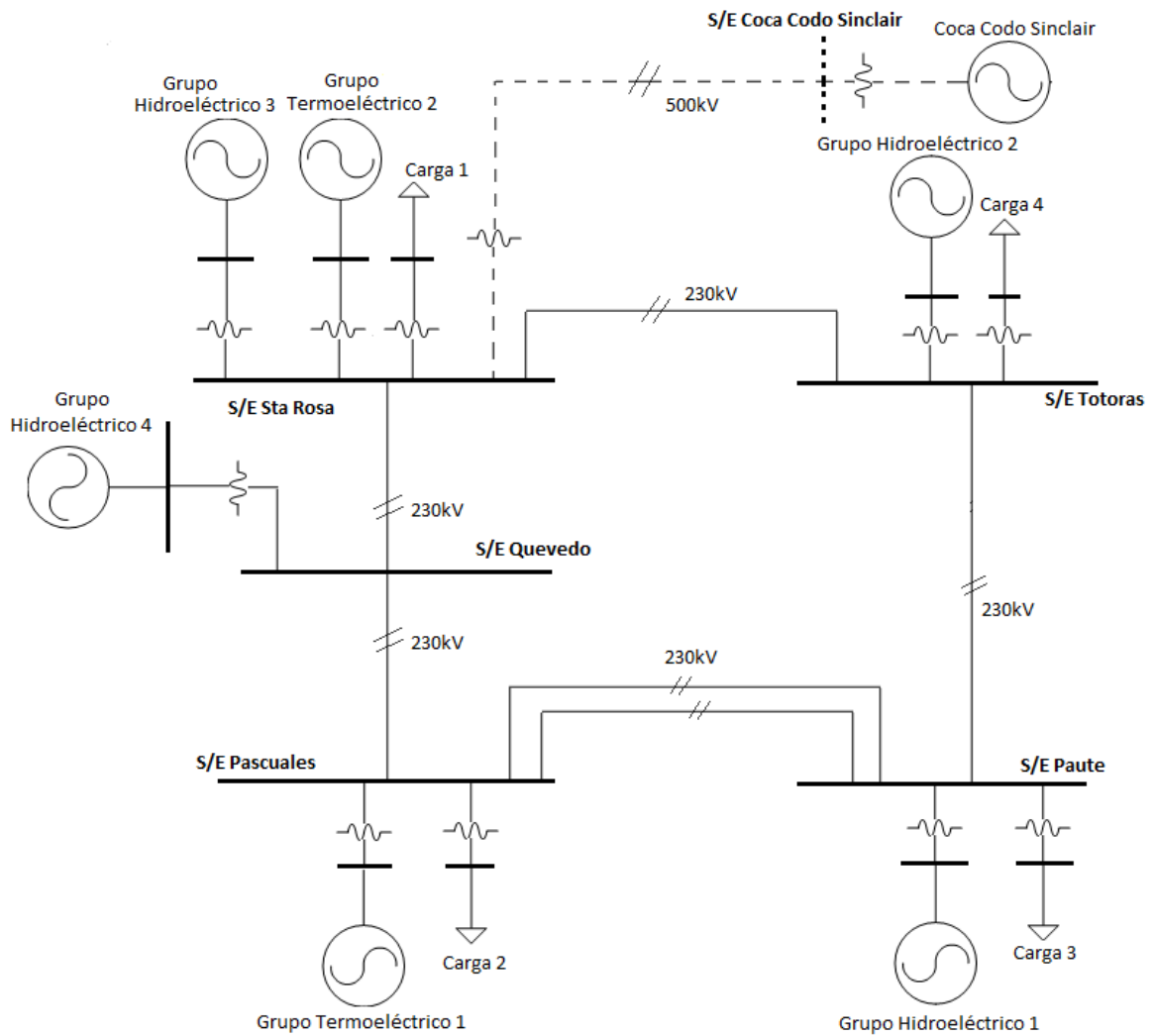


Fig 1.5 Sistema Reducido detallado con grupos de generación

CAPÍTULO 2

EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL LABORATORIO

2.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

El elevado costo del modelo a escala obliga a que posea un gran nivel de adaptabilidad, permitiendo que a futuro pueda realizarse cualquier modificación como la incorporación de nuevas tecnologías de control y operación del sistema. Tomando en cuenta los amplios beneficios educacionales y de investigación, la implementación del sistema a escala en el laboratorio resultaría exitosa y rentable, sólo si su vida útil se contempla a largo plazo.

Una estrategia muy importante para llevar a cabo el proyecto es establecer el modelo a escala en forma de módulos independientes, permitiendo así cambiar la configuración del sistema y adaptarlo a las necesidades del operador o investigador. Esto significaría que la mayoría de componentes del sistema de potencia, no se encuentren ligadas a una configuración particular de la red, y puedan por tanto colocarse en varios puntos del sistema.

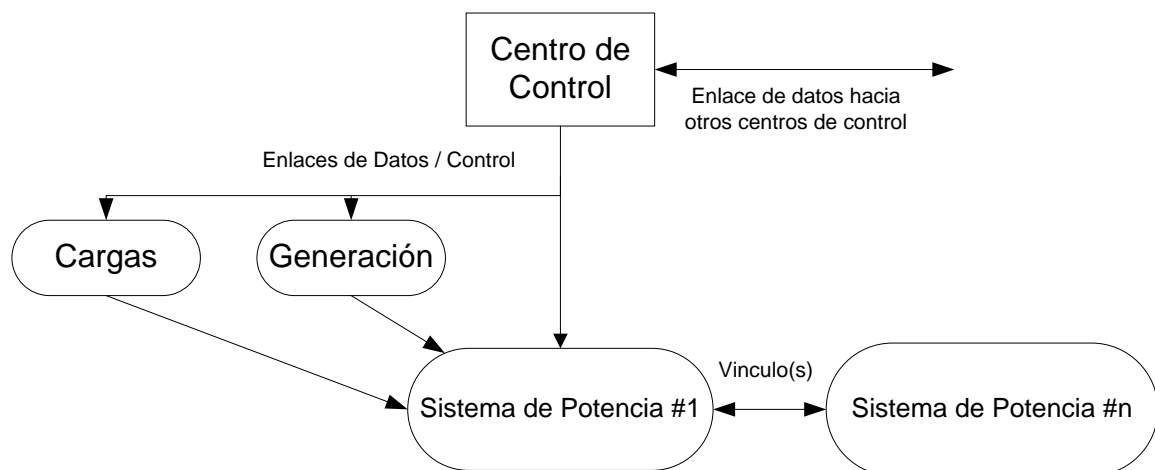


Fig 2.1 Esquema General del Sistema de Potencia [3]

En la Tabla 2.1 se presenta una comparación entre los componentes que van a instalarse en el Laboratorio y los que normalmente existen en un sistema eléctrico de potencia, en nuestro caso el SNI.

Tabla 2.1 Relación entre componentes de un sistema de potencia real y el sistema previsto para el laboratorio [3]

Componentes de un SEP	Componentes del sistema de laboratorio
Líneas de transmisión de diversa longitud, voltaje y configuración	Módulos de líneas de transmisión compactas
Transformadores con cambiadores de tap bajo carga (ULTC)	Transformadores con cambiadores de tap sin carga (NLTC) con operación manual
Centro de Control	Sistema de Control en lo posible idéntico al usado por el Operador Técnico del SNI
Centrales de generación: <ul style="list-style-type: none"> • Turbina • Regulador de Velocidad • Regulador Automático de Voltaje • Generadores 	Sistemas motor – generador: <ul style="list-style-type: none"> • Motores de inducción y de corriente continua • Generadores sincrónicos Controladores con micro-procesadores
Cargas del sistema de potencia	Cargas de naturaleza variable y no lineal, en lo posible muy cercana a la realidad
Relés de protección	Similares a los utilizados en la protección del SNI
Disyuntores, elementos de corte	Interruptores de estado sólido o de vacío con un retraso conveniente en el tiempo de operación
<i>La inclusión en el futuro de los siguientes componentes se considera opcional, especialmente con fines de investigación:</i>	
Líneas de transmisión HV DC	Convertidores e inversores en adición al módulo de línea de transmisión en DC
Capacitores en serie y reactores en paralelo	Módulos de capacitores y reactores
Compensador estático de reactivos	Modulo electrónico SVC

Sistema de distribución	Módulos de líneas en bajo voltaje, barras y cargas.
-------------------------	---

Para satisfacer las diversas necesidades, el Laboratorio será dividido en seis áreas funcionales:

1. Área de Control
2. Área de Experimentación
3. Zona de lectura
4. Área de Generación
5. Área de Carga
6. Área de Transmisión

El área de control debe tener gran parte de los elementos que posea un moderno centro de control de energía, asemejándose en lo posible a la tecnología implementada en el Operador Técnico del SNI, el mismo que en la actualidad es el CENACE.

Tanto el Operador Técnico, como la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC-EP, a través de su Unidad de Negocio TRANSELECTRIC tienen un contrato con *ABB Inc*, empresa que provee el software y hardware necesario para asegurar la administración técnica del suministro de energía eléctrica del país.

De este modo en la actualidad, la herramienta SCADA/EMS es la plataforma que permite, desde instalaciones ubicadas en Quito, tanto al operador Técnico el despacho de la energía eléctrica en el país, a TRANSELECTRIC la supervisión y control de la interconexión eléctrica nacional. Dicha herramienta permite observar el comportamiento del sistema en tiempo real, además de contar con un sistema de operación y control redundante, que ante la falla de uno de ellos, el otro podrá suplir en funcionalidad y responsabilidad, asegurando de manera confiable el suministro eléctrico del país.

2.2 CONTRIBUCIONES REALIZADAS Y FUNCIONAMIENTO ESTIMADO DEL LABORATORIO

Las áreas de investigación y análisis que pueden ser abordadas en el Laboratorio incluyen: flujos de potencia, fallas, estabilidad transitoria, los mismos que pueden servir como comprobación práctica de ejercicios llevados a cabo en clase.

Antes de analizar los casos de estudio, es necesario determinar los factores de escala para poder interpretar acertadamente los resultados obtenidos indistintamente en términos del sistema a escala reducida del Laboratorio o del sistema real del SNI. Los valores base escogidos para la reducción del SNI son 1000 MVA y 230 kV como voltaje de transmisión. Así mismo se determinó que los valores base apropiados para el sistema del laboratorio son 20 kVA, 1 kV como voltaje de transmisión y 220 V para las cargas y generadores.

De lo expuesto anteriormente se puede concluir que el factor de reducción de escala para la potencia es 50, es decir para transformar los kVA del Laboratorio a MVA del sistema real del SNI.

En la Tabla 2.2 se ha reducido de manera equivalente la potencia de las máquinas, tomando en cuenta los valores base escogidos para el sistema del Laboratorio. En la subestación Paute existe la necesidad de dividir la potencia en dos generadores hidroeléctricos debido a la dimensión del generador de 50 kVA que significaría tener máquinas muy grandes para el Laboratorio. Se ha utilizado un factor de potencia de 0.9 considerando un límite de operación permisivo para las máquinas, al tratarse de un modelo para investigación.

Tabla 2.2 Potencia de los generadores del sistema reducido del laboratorio. (Se ha considerado un factor de potencia de 0.9)

S/E PAUTE			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Hidroeléctrica	23,0	26,0	30,0
Hidroeléctrica	23,0	26,0	30,0

S/E TOTORAS			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Hidroeléctrica	10,3	11,5	15,0
S/E SANTA ROSA			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Hidroeléctrica	8,1	9,0	10,0
Térmica a Vapor	2,7	3,0	4,0
Térmica MCI	1,7	1,9	2,0
S/E QUEVEDO			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Hidroeléctrica	5,0	5,6	6,0
Térmica MCI	6,3	7,0	8,0
S/E PASCUALES			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Térmica a Vapor	8,3	9,2	10,0
Térmica a Gas	10,0	11,1	12,0
Térmica MCI	7,9	8,8	10,0
S/E COCA CODO SINCLAIR			
Tipo de Generación	Potencia [kW]	Potencia [kVA]	Capacidad Máxima Generación [kVA]
Hidroeléctrica	30,0	33,3	35,0

Se ha determinado que el sistema de transmisión sea a un voltaje de 1 kV, en base a la experiencia de la Universidad de Arlington Texas y con el fin de evitar la necesidad de un voluminoso sistema de aislamiento que además de ser costoso, ocuparía mucho espacio en el Laboratorio.

Se establece el voltaje de 220 V para generadores y cargas en función de que resulta conveniente el uso de cargas típicas en el Área de Carga, así como máquinas pequeñas que trabajen al voltaje mencionado.

Además de los módulos de transmisión y generación se ha previsto la instalación de transformadores para cada grupo generador que trabajen con una relación de transformación de $1000/220 = 50/11$ o 4,55.

2.2.1 ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA

El estudio de flujos de potencia es una de las herramientas más utilizadas para el análisis de redes eléctricas en estado estable, tanto durante el proceso de diseño, como en la operación del sistema, debido a que permite conocer el estado del mismo para condiciones específicas de carga y/o generación.

Mediante el análisis de flujos de potencia se puede obtener los voltajes nodales, flujos de corriente y potencia en líneas, aportación de potencia reactiva de generadores, pérdidas de potencia activa y reactiva, entre otros parámetros.

El sistema del Laboratorio se ha concebido para que tenga un diseño dinámico, de modo que pueda ser adaptado a los cambios futuros en la red, por lo mismo se han diseñado módulos variables de líneas de transmisión, con niveles de generación y carga variables. Esta característica propia del modelo brinda muchas posibilidades de análisis para flujos de potencia con fines didácticos. Utilizando la configuración base del sistema detallada en 1.7.1 y la Figura 1.5, se determina que se podrán realizar tres casos de estudio que se desarrollan a continuación:

1. Variación de longitud de líneas de transmisión
2. Variación de la carga del sistema
3. Variación de la generación del sistema

2.2.1.1 Caso 1: Variación de Longitud de Líneas de Transmisión

Un ejemplo de variación de longitud de líneas de transmisión se ilustra gráficamente en la Figura 2.2; en donde se puede observar la relación entre los voltajes de barra de un sistema y la longitud de sus líneas de transmisión. Este análisis servirá para de ser el caso, determinar la necesidad de incluir reactores en las líneas y así lograr niveles aceptables de voltaje en las barras.

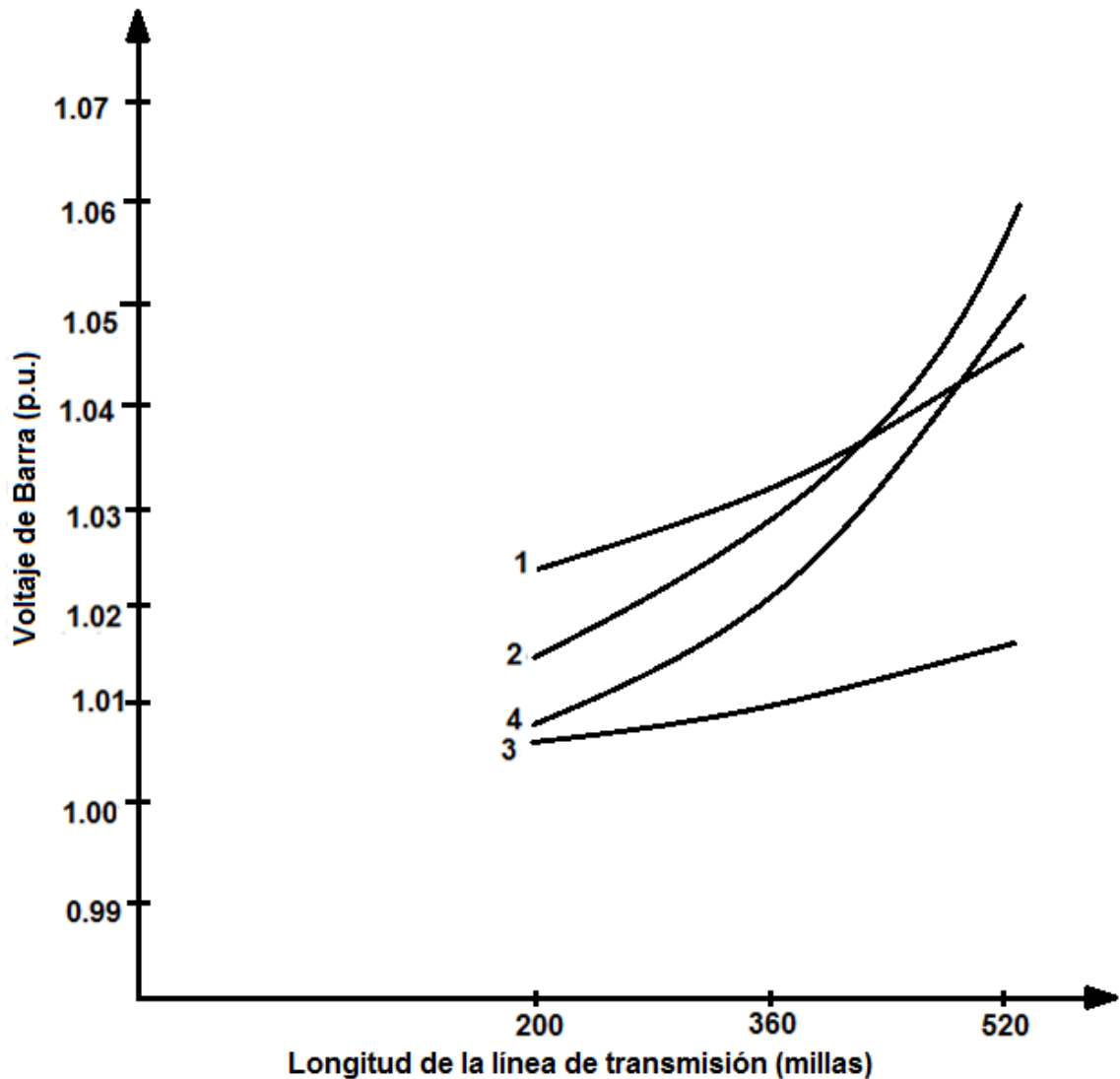


Fig 2.2 Variación del voltaje en vacío de barras en función de longitud de la línea de transmisión [3]

Cabe señalar que los resultados expuestos en la Figura 2.2 corresponden a los obtenidos en el sistema de 4 barras desarrollado en la Universidad de Arlington - Texas, es por ello que se cuenta con 4 curvas distintas.

2.2.1.2 Caso 2: Variación de la Carga del Sistema

Un ejemplo de variación de la carga del sistema se ilustra gráficamente en la Figura 2.3; en donde se puede observar la relación entre los voltajes de barra de un sistema y la carga total en el mismo. Se puede realizar un análisis de los problemas de voltaje que se puede encontrar en cada barra en función de la carga conectada, logrando de este modo prever la inclusión de compensación reactiva en las líneas.

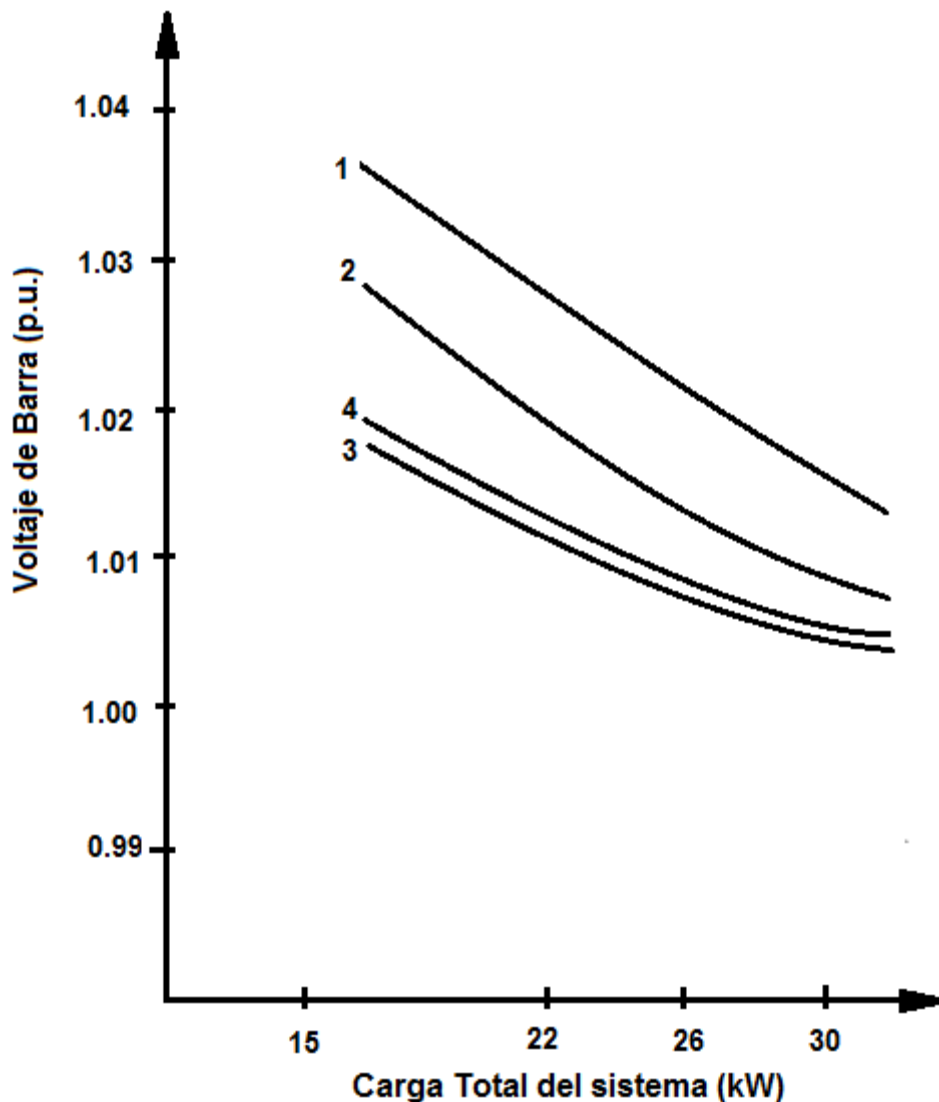


Fig 2.3 Variación del voltaje de barras en función de la carga del sistema [3]

Cabe señalar que los resultados expuestos en la Figura 2.3 corresponden a los obtenidos en el sistema de 4 barras desarrollado en la Universidad de Arlington - Texas, es por ello que se cuenta con 4 curvas distintas.

2.2.1.3 Caso 3: Variación de la Generación del Sistema

Un ejemplo de variación de la generación del sistema se ilustra gráficamente en la Figura 2.4; en donde se puede observar la relación entre los voltajes de barra de un sistema y su generación total. Se puede observar también el perfil de voltaje para un sistema con carga alta y baja. En el presente caso de estudio no se presenta una amplia variación en el voltaje de las barras, por lo que el mismo más bien complementaría el estudio del caso 2.

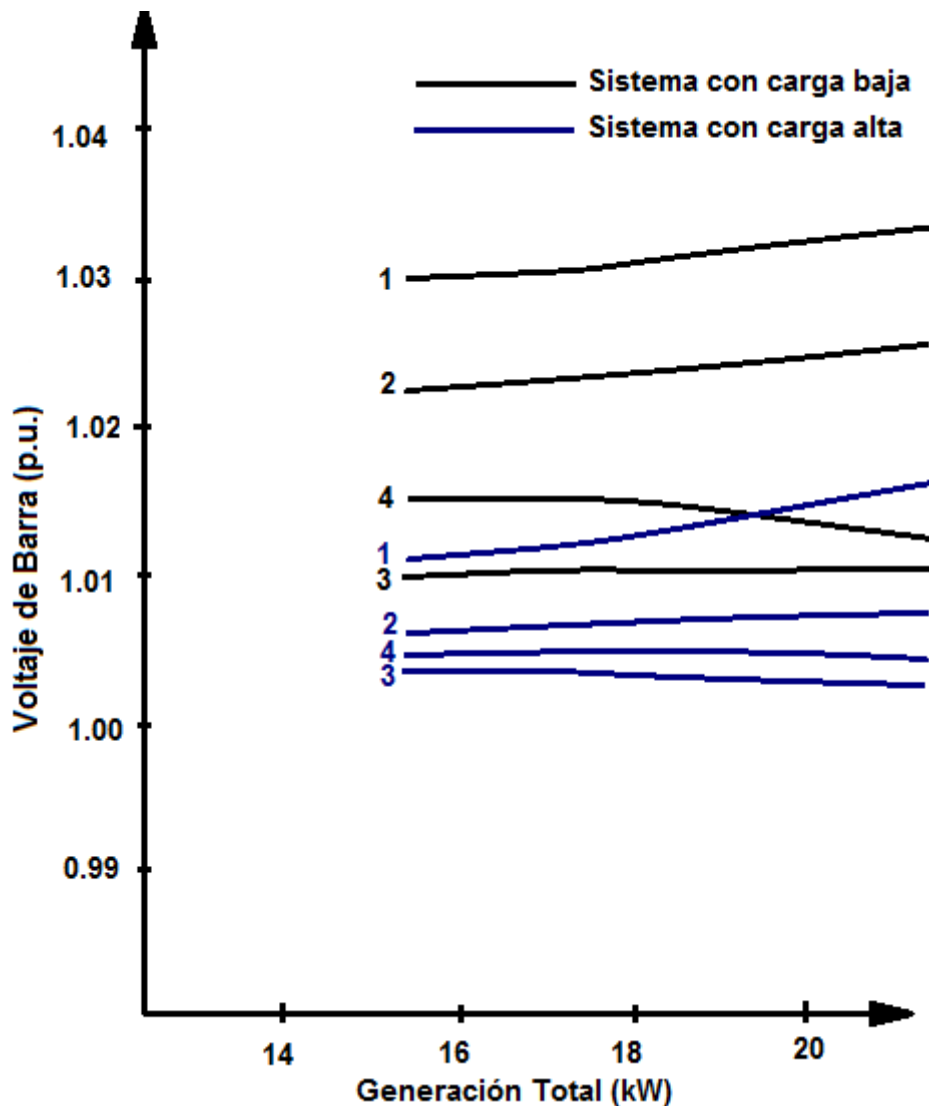


Fig 2.4 Variación de voltaje de barra en función de la generación del sistema [3]

Cabe señalar que los resultados expuestos en la Figura 2.4 corresponden a los obtenidos en el sistema de 4 barras desarrollado en la Universidad de Arlington - Texas, es por ello que se cuenta con 4 curvas distintas para cada caso.

2.2.2 ANÁLISIS DE FALLAS DE CORTOCIRCUITOS

Los análisis de fallas de corto circuitos en sistemas eléctricos de potencia se realizan para conocer la respuesta del sistema ante diversas y posibles condiciones. En el sistema reducido del Laboratorio se estima que puedan realizarse pruebas de cortocircuitos monofásicos, bifásicos y trifásicos.

Una vez obtenidos los resultados del análisis de cortocircuitos es posible dimensionar y calibrar diversos relés de protección (protección de distancia, protección diferencial, protección de sobrecorriente) de acuerdo a la necesidad de análisis del operador del sistema.

Es importante contar para el análisis de fallas con un instrumental de medición gráfico, el cual puede ser un osciloscopio con altas prestaciones. Sería importante contar con un tipo de osciloscopio que además permita realizar el análisis de estabilidad transitoria, por lo tanto resulta indispensable determinar las características técnicas necesarias para su uso en el sistema, tales como:

- Número de canales
- Ancho de banda y tiempo de subida.
- Sensibilidad de los canales verticales (mV/div).
- Velocidad máxima del barrido horizontal
- Exactitud de la ganancia del amplificador vertical
- Precisión de la base de tiempos de la unidad de deflexión horizontal
- Frecuencia de muestreo
- Resolución vertical
- Control mediante programación (instrumentación programable)

2.2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

La estabilidad de un sistema de potencia puede ser definida como la propiedad del sistema que permita permanecer en estado de operación equilibrado para condiciones normales de funcionamiento y pueda recuperar un estado aceptable de equilibrio después de ser sometido a perturbaciones [4].

Dichas perturbaciones pueden ser causadas por diversos factores pudiendo ser grandes o pequeñas. Las pequeñas ocurren continuamente en forma de cambios de carga, cambios de generación o ajuste de controles. Las grandes o de severa naturaleza están asociadas a la pérdida de elementos, tales como líneas de transmisión, transformadores, generadores o grandes cantidades de carga, luego de una falla de corto circuito.

Más precisamente Estabilidad transitoria es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando está sujeto a fuertes perturbaciones desde 1 a 3 segundos. Las respuestas del sistema involucran fuertes variaciones de los ángulos del rotor de los generadores y son influenciadas por la relación no lineal potencia-ángulo. La estabilidad depende de las condiciones iniciales de operación y la severidad de las perturbaciones.

Para el presente análisis resulta indispensable realizar una comparación entre las constantes de inercia de las máquinas del Laboratorio y valores típicos de constantes de máquinas de gran tamaño, como las que se encuentran presentes en el SNI. En la Figura 2.5 se puede observar una respuesta típica del rotor de un generador, frente a una perturbación en 3 posibles casos:

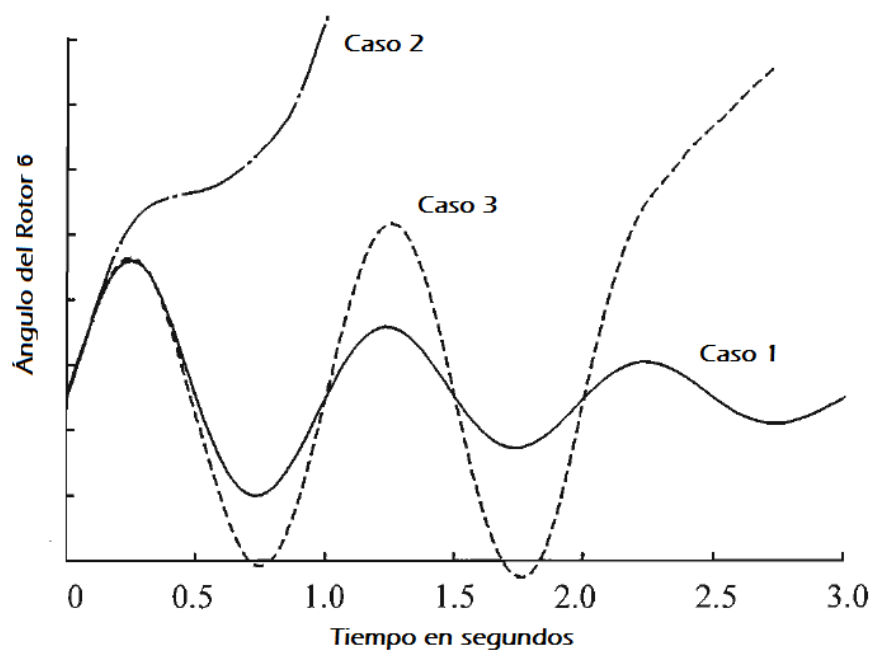


Fig 2.5 Respuesta del ángulo del rotor de un generador ante una perturbación transitoria [4]

A continuación se nombran algunos casos de estudio que se podrán llevar a cabo.

Caso 1. Caso estable

Caso 2. Inestabilidad de primera oscilación, el ángulo del rotor crece constantemente

Caso 3. La inestabilidad se presenta después de la primera oscilación

En la Figura 2.6 se encuentra la respuesta para el ángulo relativo entre dos máquinas de un sistema, al final del mismo se puede observar una condición estable.

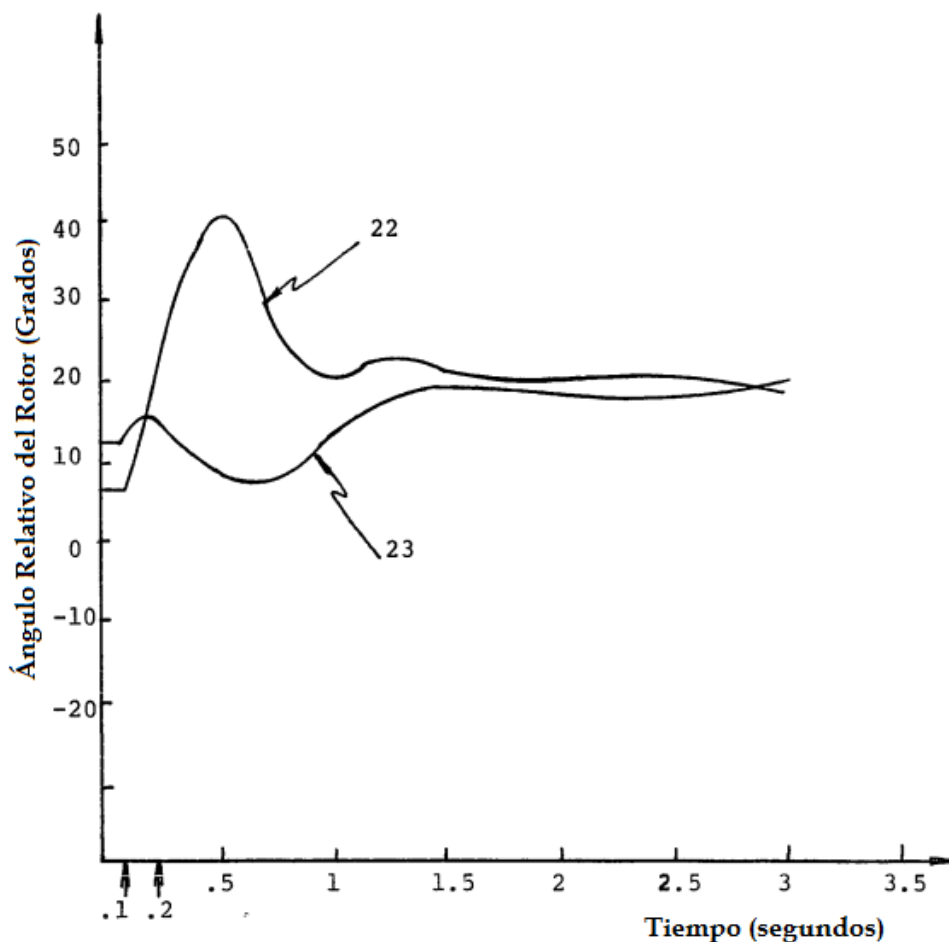


Fig 2.6 Respuesta del ángulo relativo de rotores de dos máquinas para una perturbación transitoria [3]

A partir de los estudios enumerados en esta sección es evidente que el sistema de potencia del Laboratorio debe ser conceptualizado con la capacidad de estudiar una variedad de fenómenos eléctricos.

CAPÍTULO 3

SUBSISTEMA DE TRANSFORMACIÓN

3.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1.1 EL TRANSFORMADOR

El transformador es la máquina eléctrica que permite el adecuado manejo de potencia dentro de un sistema eléctrico alimentado con corriente alterna. Resulta fundamental porque permite contar con los niveles óptimos de voltaje en generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

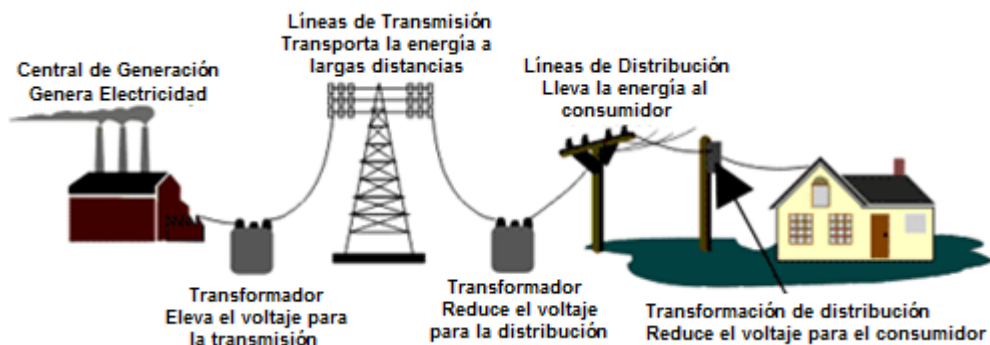


Fig 3.1 Diagrama esquemático de un sistema de potencia

Mediante un acoplamiento electromagnético entre sus devanados, el transformador eleva o reduce el nivel de voltaje, según su relación del número de espiras. En la Figura 3.2 se puede observar el esquema típico de un transformador de dos devanados con su respectiva relación de transformación detallada en la ecuación 3.1.

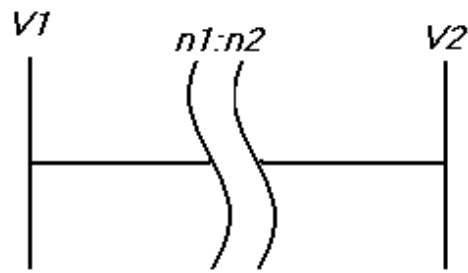


Fig 3.2 Esquema de un transformador de dos devanados

$$a = \frac{n1}{n2} = \frac{V1}{V2} \quad (3.1)$$

Dónde:

$a =$ Relación de transformación

El uso del transformador se encuentra muy extendido debido a que permite contar con niveles adecuados de voltaje en cada una de las etapas de un sistema de potencia (generación, transmisión y distribución); su ubicación determina el nexo entre las mencionadas etapas, como se muestra en la Figura 3.1.

El rol que cumple el transformador no se limita al de variar el nivel de voltaje, sino que al poseer cambiadores de taps y fase, permite el control y distribución de potencia dentro del sistema, con implicaciones en la estabilidad del mismo.

Para el sistema del Laboratorio, los transformadores contarán con automatismos de regulación de voltaje como son los conmutadores sin carga o NLTC's, para estudios de estabilidad.

3.1.2 MODELOS DEL TRANSFORMADOR CON TAPS

Los taps de un transformador permiten cambiar la relación de espiras de sus devanados y por tanto su relación de transformación. Los mencionados taps constituyen un mecanismo de regulación de voltaje muy importante, ya que con su adecuado y coordinado posicionamiento en los transformadores de potencia, se logra mejorar los niveles de voltaje en barras críticas del sistema.

La Figura 3.3 ilustra el esquema de operación de un cambiador de taps de 8 posiciones, cabe recalcar que el cambio de posición se lo debe realizar sin la desconexión de la posición anterior, sino a través de un cortocircuito entre ambas posiciones.

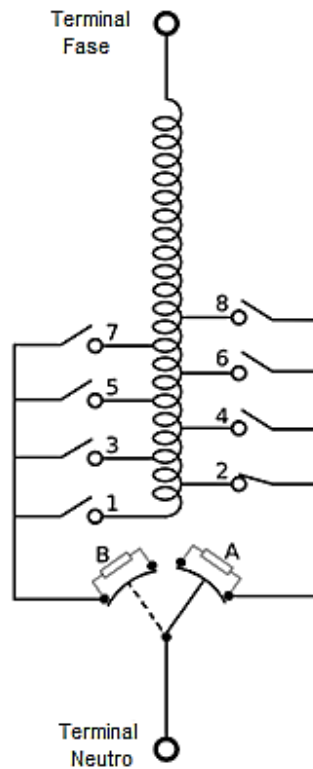


Fig 3.3 Cambiador de derivaciones de un devanado

Hay que aclarar que estos transformadores no generan, ni son fuentes de reactivos, su función es distribuir y controlar el flujo de potencia reactiva a través del sistema, llevando reactivos a las zonas en las que resultan necesarios.

Cuando el cambiador de taps es construido en el lado de alto voltaje (implica baja corriente) con el objetivo de minimizar los requerimientos en los contactos, pero al mismo tiempo se necesita un nivel de aislamiento mayor.

Si por el contrario su ubicación es en el lado de bajo voltaje, se requiere contactos más robustos debido a las altas corrientes en el mecanismo de control.

El cambiador de taps en un transformador puede encontrarse tanto en el lado de alto y bajo voltaje como se ilustra en la Figura 3.4, los transformadores de unidad generalmente poseen su cambiador de taps fijo en el lado de alto voltaje.

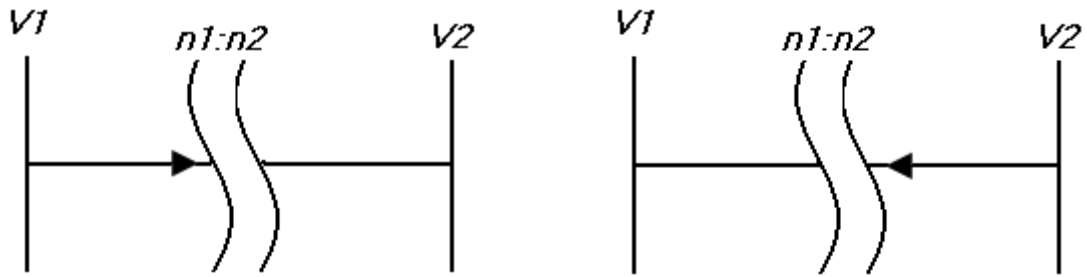


Fig 3.4 Esquema de un transformador con LTC's

Como se ilustra en las Figuras 3.5 y 3.6, el control de voltaje mediante taps puede ser directo o inverso:

Control Directo:

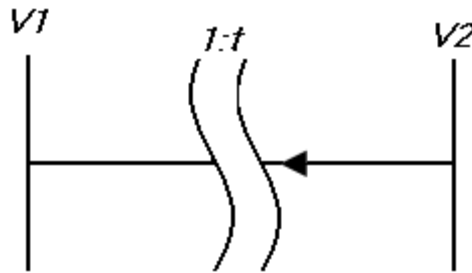


Fig 3.5 Modelo de transformador con control directo

$$\frac{V1}{1} = \frac{V2}{t}$$

$$V2 = t \cdot V1 \quad (3.2)$$

Mediante la ecuación 3.2 se concluye que para subir el voltaje $V2$ es necesario aumentar el valor de t .

Control Inverso:

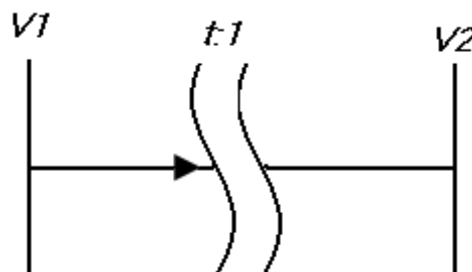


Fig 3.6 Modelo de transformador con control inverso

$$\frac{V1}{t} = \frac{V2}{1}$$

$$V2 = \frac{V1}{t} \quad (3.3)$$

Mediante la ecuación 3.3 se concluye que para subir el voltaje V2 es necesario disminuir el valor de t.

3.1.2.1 Transformadores con Cambiador Automático de Taps

Este tipo de transformadores, llamados también ULTC (Under Load Tap Changer), pueden variar la posición de sus taps bajo carga, es decir en condiciones operativas del sistema.

Como se muestra en la Figura 3.7, sus rangos máximos de variación de voltaje se encuentran entre $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$, usualmente con pasos individuales desde 0,5% a 1,5%.

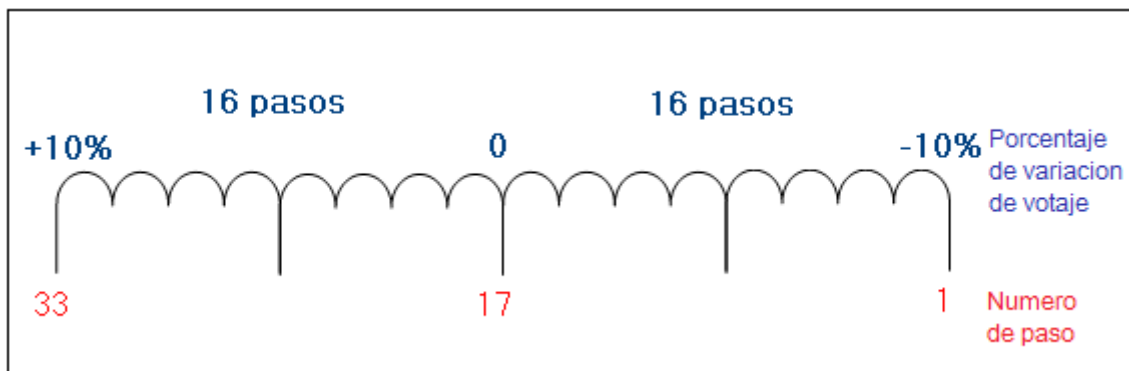


Fig 3.7 Diagrama de un ULTC de rango $\pm 10\%$ con pasos 0,625%

3.1.2.2 Transformadores con Taps Fijos

Este tipo de transformadores, llamados también NLTC (No-Load Tap Changer), requieren que se los ponga fuera de servicio para poder variar la posición de sus taps. Como se muestra en la Figura 3.8, sus rangos máximos de variación de voltaje se encuentran entre $\pm 2,5\%$ y $\pm 5\%$.

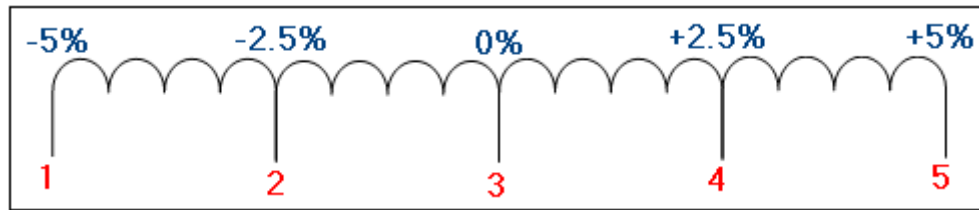


Fig 3.8 Diagrama de un NLTC de rango $\pm 5\%$ con pasos 2,5%

3.1.2.3 Modelo Generalizado de Transformadores con Taps

Al despreciar la rama de magnetización, se puede simplificar el modelo del transformador con taps como se muestra en la Figura 3.9.

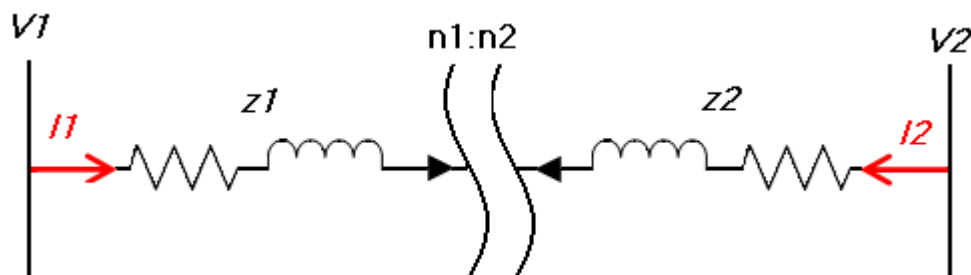


Fig 3.9 Modelo reducido del transformador con taps

Partiendo de la relación de voltajes internos del transformador:

$$\frac{V_1 - z_1 \cdot I_1}{n_1} = \frac{V_2 - z_2 \cdot I_2}{n_2} \quad (3.4)$$

$$\frac{I_1}{n_2} = -\frac{I_2}{n_1} \quad (3.5)$$

Reemplazando (3.5) en (3.4):

$$n_2 \cdot V_1 - n_2 \cdot z_1 \cdot I_1 = n_1 \cdot V_2 - n_1 \cdot z_2 \cdot \left(-\frac{n_1}{n_2} \cdot I_1\right)$$

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1^2 \cdot z_2 + n_2^2 \cdot z_1} n_2 \cdot V_1 - n_1 \cdot V_2 \quad (3.6)$$

Definiendo la variable Y:

$$Y = \frac{1}{n_1^2 \cdot z_2 + n_2^2 \cdot z_1} \quad (3.7)$$

Reemplazando (3.7) en (3.6):

$$I_1 = n_2^2 \cdot Y \cdot V_1 - n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_2 + n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_1 - n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_1$$

Se obtiene:

$$I_1 = n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_1 - V_2 + n_2 \cdot n_2 - n_1 \cdot Y \cdot V_1 \quad (3.8)$$

De la ecuación (3.5):

$$I_1 = -\frac{n_2}{n_1} \cdot I_2$$

Reemplazando (3.5) en (3.4):

$$n_2 \cdot V_1 - n_2 \cdot z_1 \cdot -\frac{n_2}{n_1} \cdot I_2 = n_1 \cdot V_2 - n_1 \cdot z_2 \cdot I_2$$

$$I_2 = \frac{n_1}{n_1^2 \cdot z_2 + n_2^2 \cdot z_1} \cdot n_1 \cdot V_2 - n_2 \cdot V_1 \quad (3.9)$$

Se reemplaza la variable Y de (3.7):

$$I_2 = n_1^2 \cdot Y \cdot V_2 - n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_1 + n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_2 - n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_2$$

Se Obtiene:

$$I_2 = n_1 \cdot n_2 \cdot Y \cdot V_2 - V_1 + n_1 \cdot n_1 - n_2 \cdot Y \cdot V_2 \quad (3.10)$$

Finalmente de las ecuaciones (3.8) y (3.10), se deriva el modelo π del transformador, como se muestra en la Figura 3.10.

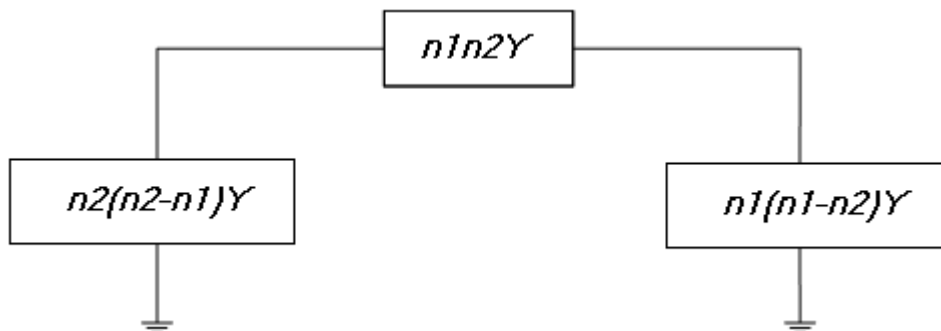


Fig 3.10 Modelo π del transformador con taps

Al considerar un modelo simplificado con $n_1=1$, $n_2=t$, $Z_2=0$; se obtiene el modelo de la Figura 3.11.

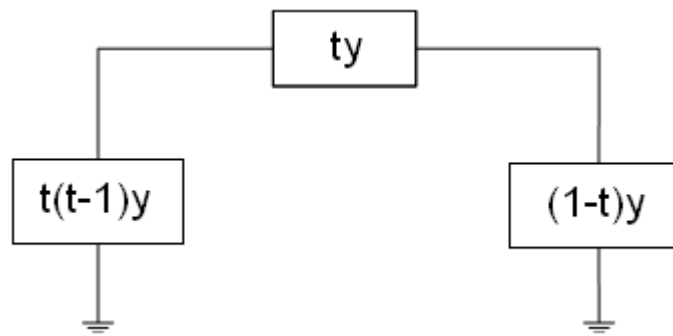


Fig 3.11 Modelo π simplificado del transformador con taps

Según el modelo del transformador obtenido en la Fig 3.10, se puede deducir que las ramas en paralelo pueden convertirse en reactancias inductivas o capacitivas según el valor de t .

- Si se considera $n_2 > n_1$, se obtiene el circuito de la Figura 3.12

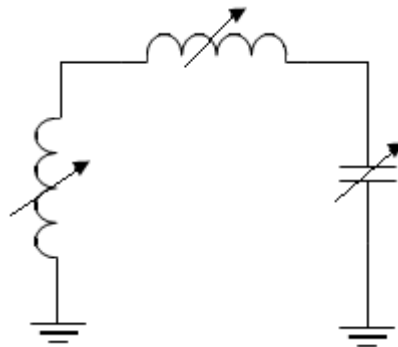


Fig 3.12 Circuito equivalente del transformador para $n_2 > n_1$

- Si se considera $n_1 > n_2$, se obtiene el circuito de la Figura 3.13

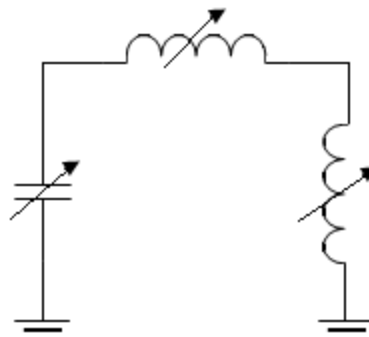


Fig 3.13 Circuito equivalente del transformador para $n_1 > n_2$

3.2 MODELAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES

El sistema del Laboratorio incluye la incorporación de 5 transformadores de unidad para el modelo a escala reducida del SNI. Dichos transformadores de transmisión corresponden a la generación agregada en las subestaciones: Pascuales, Paute, Quevedo, Santa Rosa y Totoras. Cabe mencionar que el modelamiento de los transformadores pertenecientes a la carga de cada subestación y el perteneciente a Coca Codo Sinclair no serán realizados en el presente trabajo.

Los transformadores que formarán parte del sistema trabajarán con un nivel de voltaje de 220 V / 1 kV y contarán con cambiadores de tap fijos (NLTC) para el control de voltajes y reactivos en el sistema.

3.2.1 REDUCCIÓN DE PARÁMETROS A UNA ESCALA ADECUADA

Para el sistema del Laboratorio, los valores base escogidos para potencia y voltaje son 20 kVA y 1 kV / 220 V respectivamente. Se ha escogido 1 kV bajo la premisa de que el área física de transmisión no requiera un nivel de aislamiento muy elevado, y que resulte seguro para estudiantes e investigadores.

Si se considera que los valores base para el Sistema Nacional Interconectado son 230 kV / 13,8 kV (sin tomar en cuenta la transmisión a 500 kV que se implantará a futuro) y 1000 MVA, es necesario establecer la relación entre los dos sistemas, para de esta manera trasladar los resultados del sistema del Laboratorio al sistema real del SNI.

Haciendo el análisis de los dos sistemas en por unidad:

$$Z_{p.u. \text{ lab}} = Z_{p.u. \text{ SNI}} \quad (3.11)$$

$$Y_{p.u. \text{ lab}} = Y_{p.u. \text{ SNI}} \quad (3.12)$$

El escalamiento del modelo está determinado por las impedancias en por unidad que deben tener los mismos valores tanto en el modelo reducido como en el sistema real, bajo esta premisa se escogen potencias y voltajes base en el

modelo. Igualando los valores en por unidad se logra que cualquier medida tomada en el Laboratorio pueda ser convertida a su equivalente en 230 kV o 13,8 kV en el SNI.

Tabla 3.1 Comparación valores base del sistema reducido del laboratorio y el SNI

	VALORES BASE LABORATORIO	VALORES BASE SNI
POTENCIA	20 kVA	1000 MVA
VOLTAJE	1 kV / 220 V	230 kV / 13,8 kV

Con base en la Tabla 3.1 se puede deducir las siguientes relaciones:

- En el sistema real del SNI:

$$Z_{base-230kV} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(230 \text{ kV})^2}{1000 \text{ MVA}} = 52,9 \Omega$$

$$Z_{base-13,8kV} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(13,8 \text{ kV})^2}{1000 \text{ MVA}} = 0,19 \Omega$$

- En el sistema del laboratorio:

$$Z_{base-1kV} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(1 \text{ kV})^2}{20 \text{ kVA}} = 50 \Omega$$

$$Z_{base-220V} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{20 \text{ kVA}} = 2,42 \Omega$$

Por lo tanto, los factores de conversión para las impedancias y admitancias son:

$$Z_{lab} = \frac{Z_{base \text{ lab}}}{Z_{base \text{ SNI}}} Z_{SNI} \quad (3.13)$$

$$Y_{lab} = \frac{Y_{base \text{ lab}}}{Y_{base \text{ SNI}}} Y_{SNI} \quad (3.14)$$

3.2.2 MODELO DE TRANSFORMADORES DEL LABORATORIO

Dentro del presente proyecto se ha previsto el modelamiento de 5 transformadores de unidad correspondientes a los generadores de las subestaciones: Santa Rosa, Quevedo, Pascuales, Paute y Totoras. Los mismos tendrán el modelo detallado en la Figura 3.14, y una configuración YnD que es la más utilizada y conveniente para transformadores de unidad.

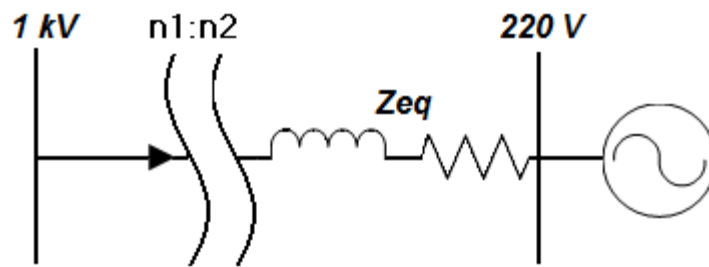


Fig 3.14 Circuito equivalente para los transformadores del Laboratorio

En la etapa inicial del presente proyecto se trató de reducir el SNI en 5 barras, a la medida que sea posible; esto con el fin de lograr un modelo lo más ajustadamente cercano al real.

En vista de la gran dificultad que existe en la reducción del sistema, se decide trabajar con parámetros típicos de generadores y transformadores. A continuación se justifica esta resolución ya que afecta la precisión del modelo, pero así mismo evita el proceso extremadamente complejo de reducción.

La reducción de la Zona Operativa Sur Occidental y Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión inicia con el diagrama unifilar de la Figura 3.15, el objetivo es simplificar dentro de las barras a 230 kV la barra Milagro, debido a que el modelo reducido únicamente considera las barras Pascuales y Paute.

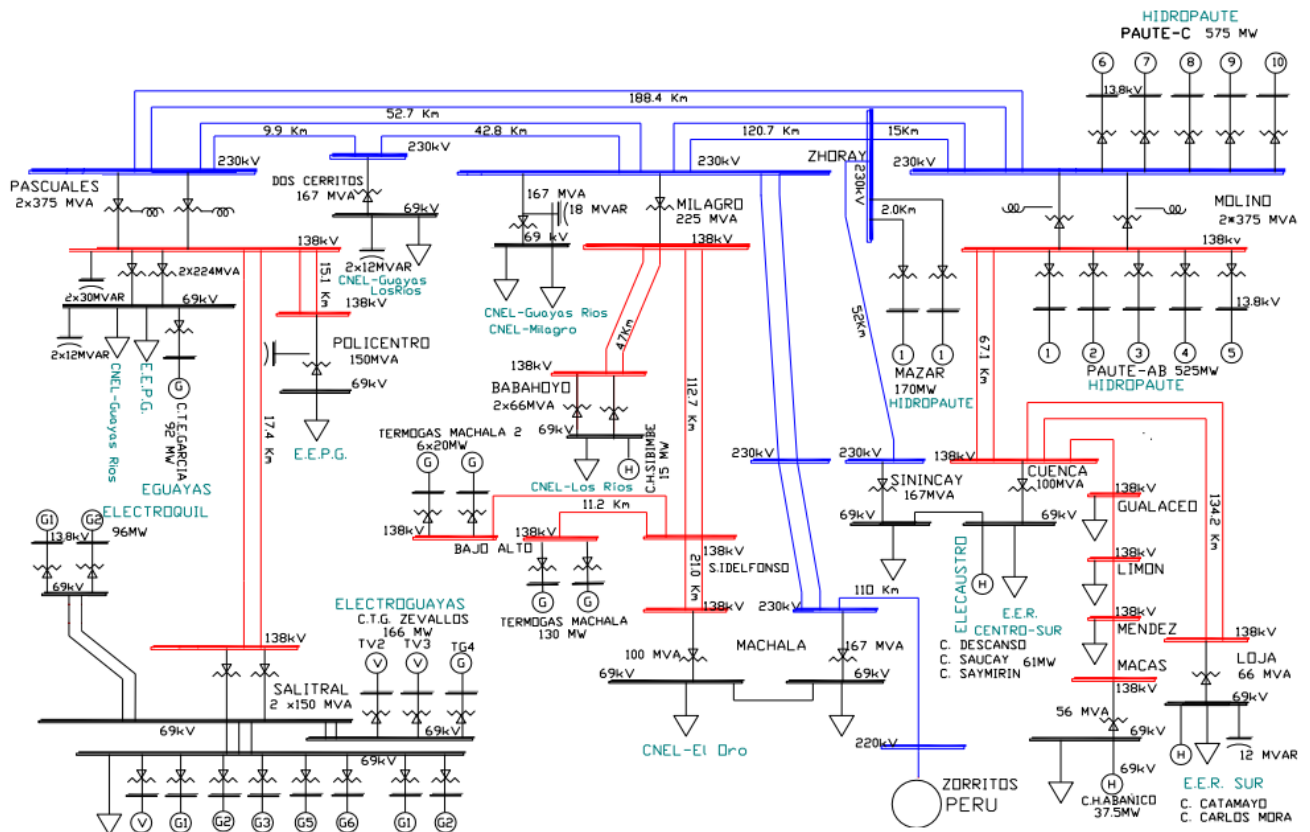


Fig 3.15 Integración Zona Operativa Sur Occidental y Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión

En la figura 3.16 se puede observar el diagrama unifilar de la reducción de esta parte del SNI. Se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se han reducido las barras cuyos generadores y/o cargas no sean representativas para el sistema
- El modelo de cada línea se ha tomado en función de la longitud de la misma.
- Se han agrupado los generadores y/o cargas de cada barra siempre y cuando éstos se encuentren cercanos, y cuando no exista una línea de transmisión de longitud considerable entre ellas

Se ha agrupado la generación y carga en 4 barras principales: Pascuales, Milagro, Zhoray y Paute. Se ha colocado el modelo pi en las líneas de longitud media, es decir mayores a 80 km.

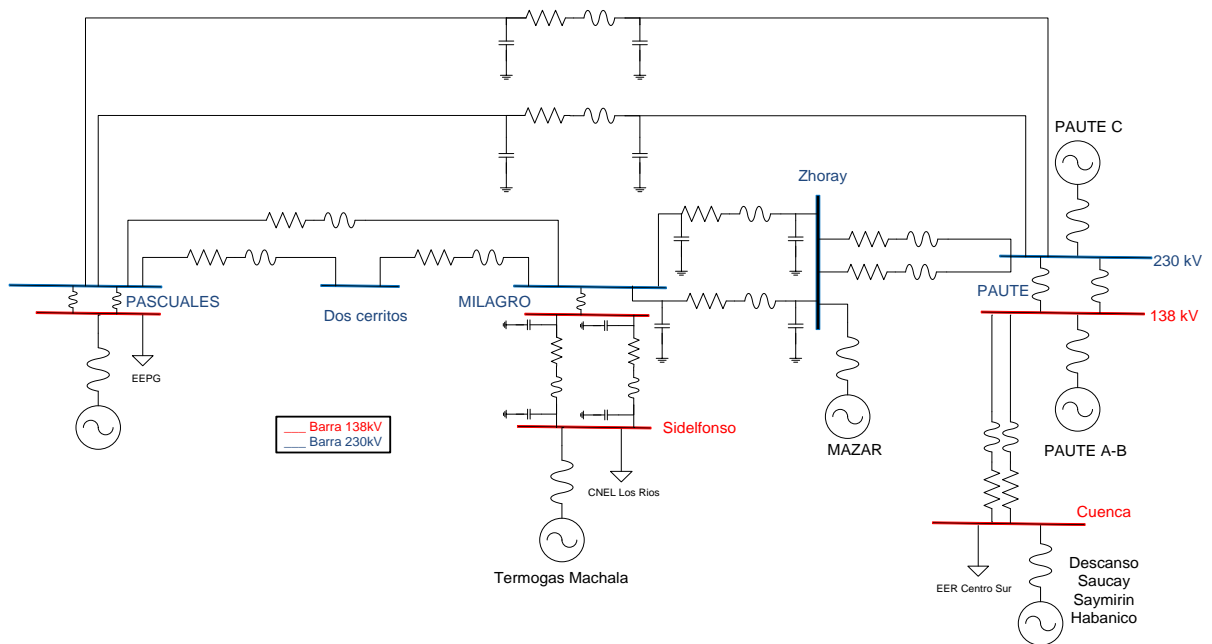


Fig 3.16 Circuito parcialmente reducido Zona Operativa Sur Occidental y Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión

En la figura 3.17 se presenta una versión más reducida de esta zona en la cual se han realizado las siguientes acciones:

- Se reduce los circuitos de las líneas de transmisión (equivalente serie – paralelo en las líneas, según el caso)
- Se elimina la barra Dos cerritos
- Se obtiene el equivalente de los transformadores de cada S/E

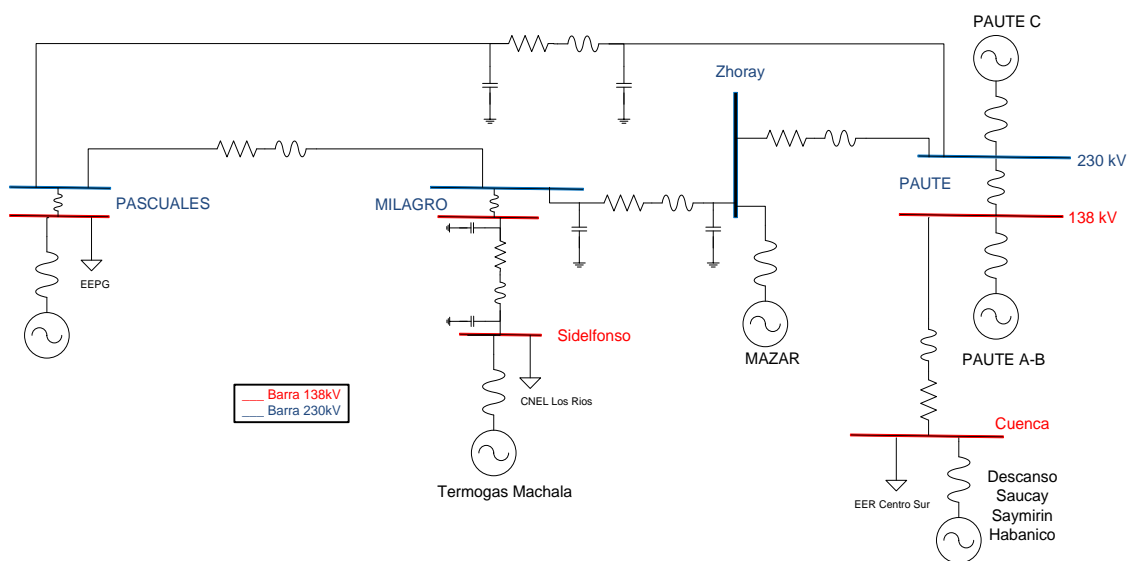


Fig 3.17 Segunda Reducción Zona Operativa Sur Occidental y Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión

Finalmente se obtiene el modelo reducido en su mínima expresión (Figura 3.18), teniendo en cuenta que el sistema reducido se ha planteado sin considerar las barras Milagro y Zhoray, por lo que las mismas han sido unificadas a la barra eléctricamente más cercana. Para el caso de Milagro, su generación y carga se incluyen en Pascuales, mientras que la barra Zhoray con su generación se incorpora a Paute.

Al momento de descartar la línea de transmisión Pascuales – Milagro e incorporar Termogas Machala a la barra Pascuales se encuentra con el problema de integrar a la reactancia del generador de Termo Machala, el modelo π de la línea San Idelfonso - Milagro, la reactancia del transformador de la S/E Milagro y la impedancia de la línea Milagro – Pascuales.

Esta reducción a pesar de resultar teóricamente fácil, al momento de implementarla en el Laboratorio significaría en este caso, incluir un modelo π en vez de la reactancia típica del transformador. Para evitar una innecesaria complejidad en el modelo, se ha decidido trabajar con valores típicos de transformadores y generadores, en base de las potencias reales de las máquinas para mediante el criterio de reducción de parámetros descrito anteriormente, lograr modelos equivalentes en el sistema reducido.

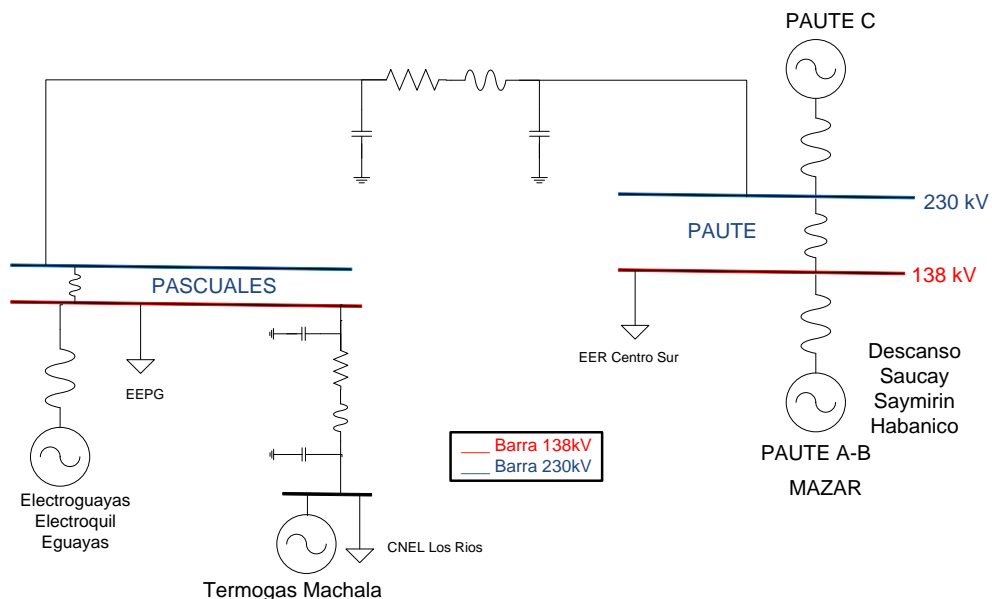


Fig 3.18 Mínima Reducción Zona Operativa Sur Occidental y Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión

En la Tabla 3.2 se presentan las potencias de los transformadores para cada unidad generadora, a ser consideradas en el sistema del Laboratorio, cabe indicar que los transformadores así como todo el modelo son trifásicos.

Tabla 3.2 Máxima capacidad de generadores y capacidad nominal de transformadores del sistema reducido

Tipo de Generación	Máxima Capacidad de Generación [kVA]	Capacidad Nominal Transformador [kVA] 3 ϕ
S/E PAUTE		
Hidroeléctrica	26,0	30,0
Hidroeléctrica	26,0	30,0
S/E TOTORAS		
Hidroeléctrica	11,5	15,0
S/E SANTA ROSA		
Hidroeléctrica	9,0	10,0
Térmica a Vapor	3,0	4,0
Térmica MCI	1,9	2,0
S/E QUEVEDO		
Hidroeléctrica	5,6	6,0
Térmica MCI	7,0	8,0
S/E PASCUALES		
Térmica a Vapor	9,2	10,0
Térmica a Gas	11,1	12,0
Térmica MCI	8,8	10,0

Una vez obtenidas las capacidades de los transformadores del sistema, en la Tabla 3.3 se detallan los valores calculados a escala reducida y en escala real.

Tabla 3.3 Capacidad nominal de transformadores del sistema reducido y convertidos a escala real

Tipo de Generación	Capacidad Nominal Transformador	
	Escala Reducida [kVA]	Escala Real [MVA]
S/E PAUTE		
Hidroeléctrica	30	1500
Hidroeléctrica	30	1500

S/E TOTORAS		
Hidroeléctrica	15	750
S/E SANTA ROSA		
Hidroeléctrica	10	500
Térmica a Vapor	4	200
Térmica MCI	2	100
S/E QUEVEDO		
Hidroeléctrica	6	300
Térmica MCI	8	400
S/E PASCUALES		
Térmica a Vapor	10	500
Térmica a Gas	12	600
Térmica MCI	10	500

Una vez que se han obtenido las potencias a escala real de cada transformador, y debido a las razones anteriormente expuestas, se procede a obtener valores típicos para cada uno de ellos, a partir de la Tabla 3.4.

Asumiendo que todos los transformadores tienen un voltaje nominal de 230 kV y poseen un tipo de enfriamiento forzado con aceite, se toma de la Tabla 3.4 sus correspondientes valores típicos de reactancia.

Tabla 3.4 Valores típicos de reactancias para transformadores de potencia [8]

Transformadores de potencia: 25 MVA y mayores		
Voltaje Nominal (kV)	Reactancia (%)	
	Enfriamiento con aire forzado	Enfriamiento con aceite forzado
34.5	5 – 8	9 – 14
69	6 – 10	10 – 16
115	6 – 11	10 – 20
138	6 – 13	10 – 22
161	6 – 14	11 – 25
230	7 – 16	12 – 27
345	8 – 17	13 – 28

500	10 – 20	16 – 34
700	11 - 21	19 - 35

Finalmente se escogen los valores de reactancia de los transformadores, teniendo en cuenta que en la actualidad los transformadores típicamente se diseñan para el valor mínimo de reactancia mostrado. Los valores de reactancia para cada transformador se detallan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de reactancias para los transformadores del sistema

Grupo de Generación	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%] Base propia	Reactancia [Ω]	Reactancia [Ω]
S/E PAUTE			
Hidroeléctrico 1-1	12	4,23	4
Hidroeléctrico 1-2	12	4,23	4
S/E TOTORAS			
Hidroeléctrico 2	12	8,46	8
S/E SANTA ROSA			
Hidroeléctrico 3	12	12,70	12
Térmico a Vapor	12	31,74	30
Térmico MCI	12	63,48	60
S/E QUEVEDO			
Hidroeléctrico 4	12	21,16	20
Térmico MCI	12	15,87	15
S/E PASCUALES			
Térmico a Vapor	12	12,70	12
Térmico a Gas	12	10,58	10
Térmico MCI	12	12,70	12

3.3 MODELAMIENTO DE LOS NLTC's

Los transformadores de unidad en el sistema interconectado, generalmente poseen un cambiador de taps fijo en el lado de alto voltaje, como se puede ver en la Figura 3.19. En transformadores de potencia se desprecia la parte resistiva de

la impedancia del transformador, por lo que en el modelo tampoco se la toma en cuenta.

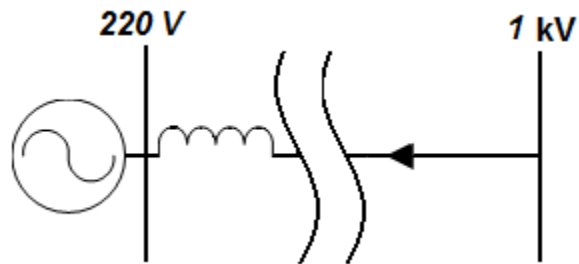


Fig 3.19 Modelo típico utilizado para transformadores de unidad

El cambiador de taps queda estructurado como se detalla en la Figura 3.20, en donde se puede apreciar las desviaciones de voltaje en por unidad y en kV.

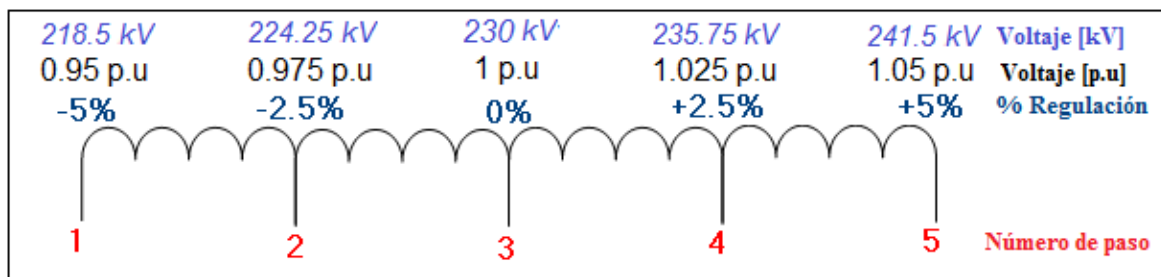


Fig 3.20 Esquema de cambiador de taps para transformadores del sistema

CAPÍTULO 4

ELEMENTOS DE GENERACIÓN

4.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

El modelamiento de los elementos de generación para el sistema a escala requiere realizar un análisis previo de las máquinas a utilizarse; esto incluye a generadores sincrónicos y motores como máquinas motrices. Para el caso de los motores es necesario analizar la conveniencia del uso de motores de corriente directa frente a la utilización de motores de inducción.

Por lo expuesto anteriormente se presenta una descripción condensada de la estructura y funcionamiento de las máquinas eléctricas del modelo. Adicionalmente se incluyen los métodos de control de motores, cuya implementación al sistema motor – generador se analizará posteriormente.

4.1.1 EL GENERADOR SINCRÓNICO

La máquina sincrónica, ya sea generador o motor, opera a velocidad sincrónica, es decir, a la velocidad del campo magnético giratorio creado por las bobinas de campo. La velocidad sincrónica es constante y depende de la frecuencia de generación y el número de polos de la máquina, de acuerdo a la ecuación (4.1):

$$\eta_s = \frac{120 f}{p} \quad (4.1)$$

Dónde:

η_s : Velocidad sincrónica dada [r.p.m]

f: Frecuencia [Hz]

p: Número de polos de la máquina.

El generador sincrónico se encarga de transformar la energía mecánica proporcionada por una turbina de vapor o hidráulica en energía eléctrica.

La utilización de la máquina sincrónica como generador es muy generalizada, siendo un elemento de uso prácticamente exclusivo, en los centros de producción de energía eléctrica. Por tal motivo, se podría decir que el problema de la

estabilidad de un sistema de potencia es en gran medida el mantener interconectado máquinas sincrónicas en sincronismo.

Mantener dicho sincronismo implica que en los sistemas de potencia se tenga que monitorear los ángulos (relativos a una máquina de referencia) de los rotores de las máquinas que oscilan luego de una perturbación (si el sistema es estable, las máquinas interconectadas permanecen "en sincronismo"). La figura 4.1 muestra un esquema básico de la máquina sincrónica, en donde se puede observar la disposición de devanados en el estator y rotor.

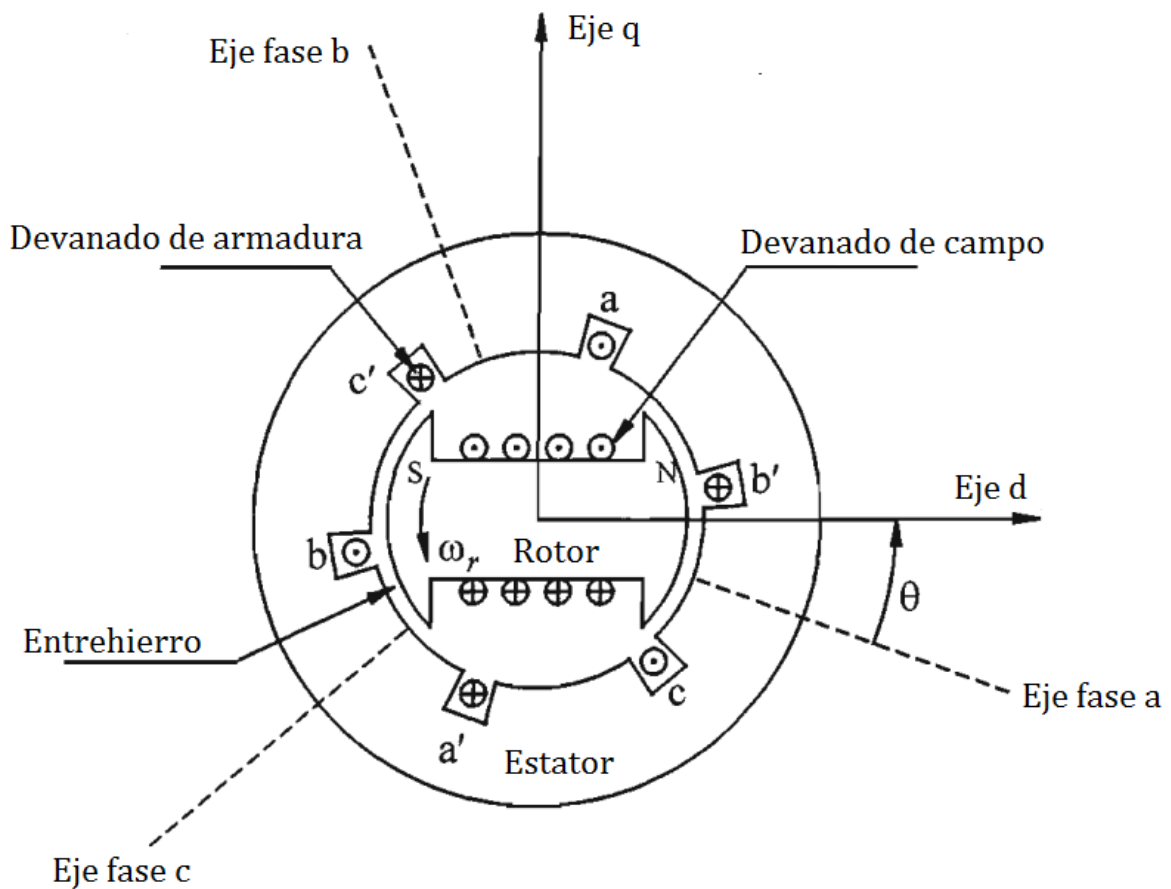


Fig 4.1 Esquema básico de la máquina sincrónica trifásica [4]

4.1.1.1 Partes del Generador Sincrónico

En general el generador sincrónico se compone de dos partes principales: una parte estacionaria llamada armadura o estator, cuyos devanados entregan corriente eléctrica a la carga, y la parte móvil llamada rotor, el cual posee el devanado de campo alimentado por una fuente de corriente continua.

Los generadores sincrónicos pueden ser clasificados según la estructura del rotor, pudiendo ser cilíndrico o de polos salientes; dicha característica depende principalmente de la velocidad de las turbinas acopladas al generador. La Figura 4.2 muestra los dos diferentes tipos de rotor.

Así, turbinas hidráulicas operan a bajas velocidades, por lo tanto se requiere un número relativamente grande de polos para generar a la frecuencia nominal. Es en este caso que se utiliza un rotor con polos salientes, el cual mecánicamente se adapta mejor a esta configuración.

Por otro lado, las turbinas de vapor y gas requieren pocos polos ya que funcionan a altas velocidades. Como consecuencia para este tipo de turbinas, los generadores poseen rotores cilíndricos.

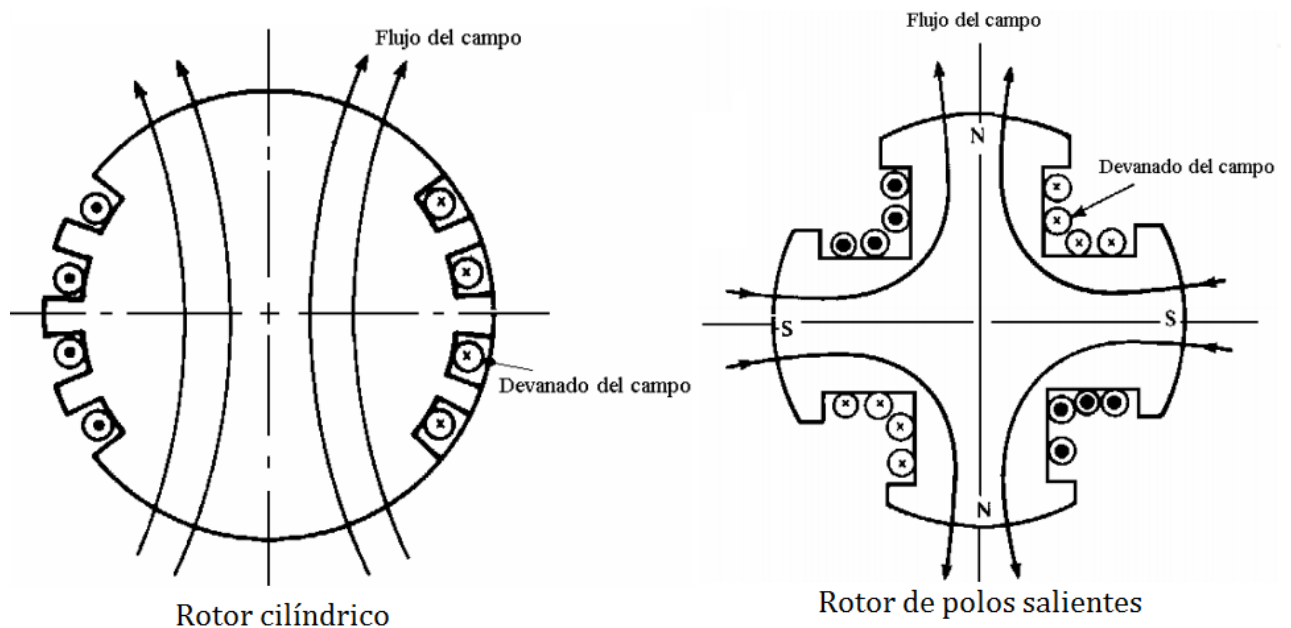


Fig 4.2 Máquinas sincrónicas de rotor cilíndrico y de polos salientes

Hay que destacar que comúnmente los generadores de polos salientes poseen devanados amortiguadores, que constan de barras cortocircuitadas (a manera del devanado de un motor de inducción jaula de ardilla), los cuales reducen las oscilaciones mecánicas del rotor hasta la velocidad sincrónica.

4.1.1.2 Circuito Equivalente

El generador se comporta como una fuente real de voltaje $E \angle \delta$ y una impedancia interna $Z = R + jX_s$; en donde R corresponde a la resistencia de las bobinas del estator y X_s la llamada reactancia sincrónica, la cual incluye la reactancia de las bobinas del estator, la reactancia de dispersión y la reacción del inducido (flujo magnético que se encierra a alrededor del rotor). La Figura 4.3 muestra el circuito monofásico equivalente del generador sincrónico de rotor cilíndrico.

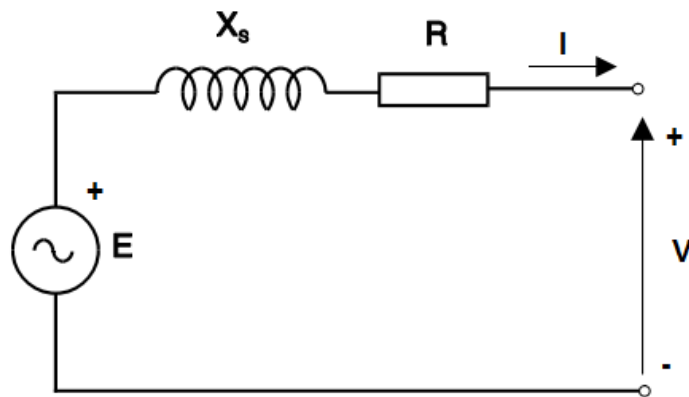


Fig 4.3 Modelo del generador sincrónico de rotor cilíndrico

El voltaje en los bornes del generador de rotor cilíndrico está dado por las ecuaciones (4.2) y (4.3).

$$V = E - R + jX_s \cdot I \quad (4.2)$$

$$V[0^\circ] = E[\delta] - R + jX_s \cdot I[-\phi] \quad (4.3)$$

Dónde:

E: Voltaje inducido por el flujo de la corriente de campo

V: Voltaje en los bornes del generador

δ : Ángulo de voltaje en los bornes del generador

Φ : Ángulo de Corriente

R, X_s : Resistencia y Reactancia sincrónica del generador

Debido al movimiento del rotor y estator a la velocidad sincrónica, resulta conveniente referir las ecuaciones que definen el comportamiento de la máquina a un sistema de coordenadas referidas al rotor. De acuerdo con estos lineamientos se definen los ejes magnéticos directo y de cuadratura.

- Eje directo {d}: gira con respecto al estator a la velocidad del rotor y en todo momento se encuentra colineal con el eje magnético del campo.
- Eje en cuadratura {q}: gira con respecto al estator a la velocidad del rotor y en todo momento se encuentra en cuadratura con el eje magnético del campo.

Por lo que el diagrama fasorial para el generador de rotor cilíndrico resulta ser el de la Figura 4.4.

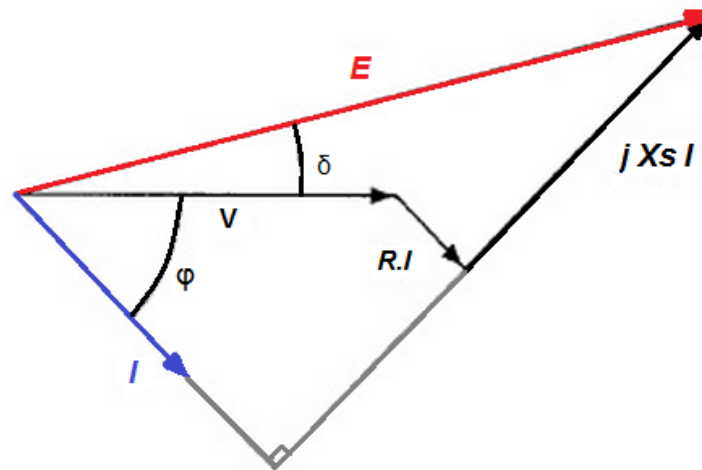


Fig 4.4 Diagrama fasorial del generador sincrónico de rotor liso

En los generadores de polos salientes existe la particularidad de que la reluctancia del circuito magnético depende de la posición del rotor, por lo que se modelan dos reactancias sobre el eje directo {d} y cuadratura {q}, obteniéndose de éste modo dos corrientes ortogonales I_d e I_q . Para este generador, el voltaje en sus bornes es el dado por las ecuaciones (4.4 y 4.5).

$$V = E - R \cdot I - j X_d I_d - j X_q I_q \quad (4.4)$$

$$V \angle 0^\circ = E \angle \delta - R \cdot I \angle -\varphi - j X_d I_d \angle [\delta - 90^\circ] - j X_q I_q \angle [j X_q I_q] \quad (4.5)$$

Para el caso del generador de polos salientes, no es posible el modelamiento mediante un circuito equivalente, el diagrama fasorial queda establecido como se muestra en la Figura 4.5.

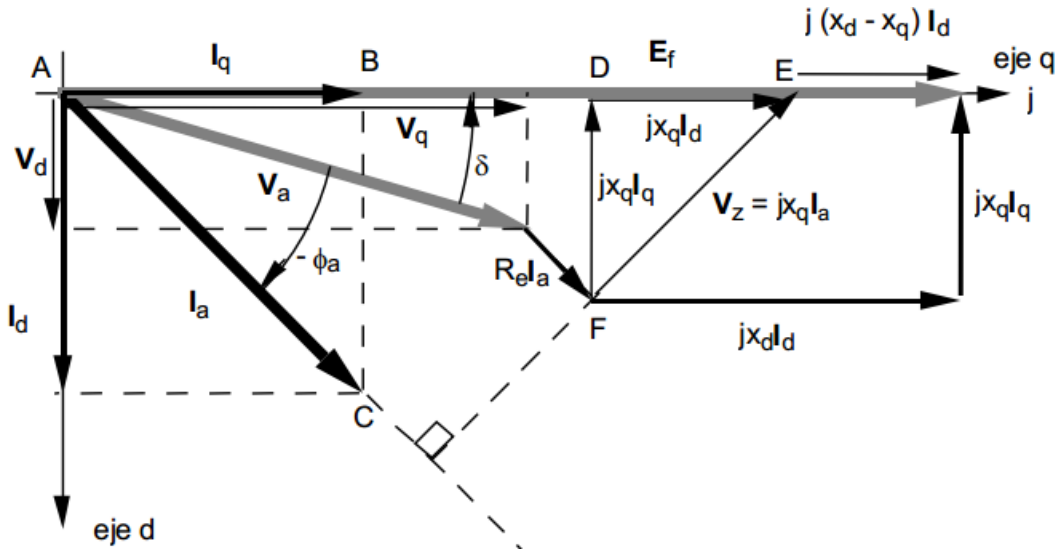


Fig 4.5 Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes [6]

En la Tabla 4.1 se muestran los valores típicos de reactancia síncrona (X_s), reactancia de eje directo (X_d), reactancia de cuadratura (X_q) y Resistencias (R), además de sus rangos de variación, expresados en por unidad con respecto a la propia base del generador.

Tabla 4.1 Valores característicos parámetros de generadores síncronos

	X_s (%)	X_d (%)	X_q (%)	R (%)
Rotor Cilíndrico	1,2 0,95-1,45			0,01 – 0,007
Polos Salientes		1,25 0,6 – 1,5	0,7 0,4 – 0,8	0,003 – 0,015

Al considerar despreciable la resistencia del estator se pueden obtener las potencias activa y reactiva suministradas por el generador.

Para el generador de rotor cilíndrico:

$$P = \frac{E.V}{X_s} \operatorname{sen} \delta \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{E.V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s} \quad (4.7)$$

Para el generador de polos salientes:

$$P = \frac{E.V}{X_d} \operatorname{sen} \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \operatorname{sen} 2\delta \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{E.V}{X_d} \operatorname{cos} \delta - V^2 \left(\frac{\operatorname{cos}^2 \delta}{X_d} + \frac{\operatorname{sen}^2 \delta}{X_q} \right) \quad (4.9)$$

4.1.1.3 Efectos Transitorios y Subtransitorios

Cuando ocurre una falla en una red de potencia, la corriente que fluye está determinada por las fuerzas electromotrices internas e impedancias de las máquinas en la red y por las impedancias que haya entre la máquina y la porción de la red en la que se presenta la falla. La corriente que fluye en una máquina sincrónica inmediatamente después de que ocurre la falla es diferente a la de unos pocos ciclos más tarde y a la del estado permanente de la corriente de falla. Esto se debe al efecto que la corriente de falla en la armadura tiene sobre el flujo que genera el voltaje en la máquina. Debido a los cambios en la reactancia de la máquina sincrónica, la corriente varía desde su valor inicial hasta su valor permanente en forma relativamente lenta [8].

Como se puede observar en la Figura 4.6, la corriente del generador se ve limitada por sus reactancias: *Subtransitoria* X_d'' , *Transitoria* X_d' y *Sincrónica* X_d . Dichas reactancias pueden ser definidas de la siguiente manera:

Reactancia Subtransitoria: Es la reactancia del estator en el instante que se produce la falla y determina la corriente que circula por el devanado del estator durante los primeros ciclos de duración de la falla.

Reactancia Transitoria: Es la reactancia del devanado del estator si se desprecian los efectos de los arrollamientos amortiguadores y determina la corriente que circula durante el intervalo posterior al indicado anteriormente y en el que la reactancia subtransitoria constituye el factor decisivo. La reactancia transitoria aparece durante 1,5 segundos o más, según la construcción de la máquina.

Reactancia Sincrónica: Es la reactancia que determina la corriente en un estado estacionario, es decir después de transcurrir algunos segundos a partir de la ocurrencia de la falla.

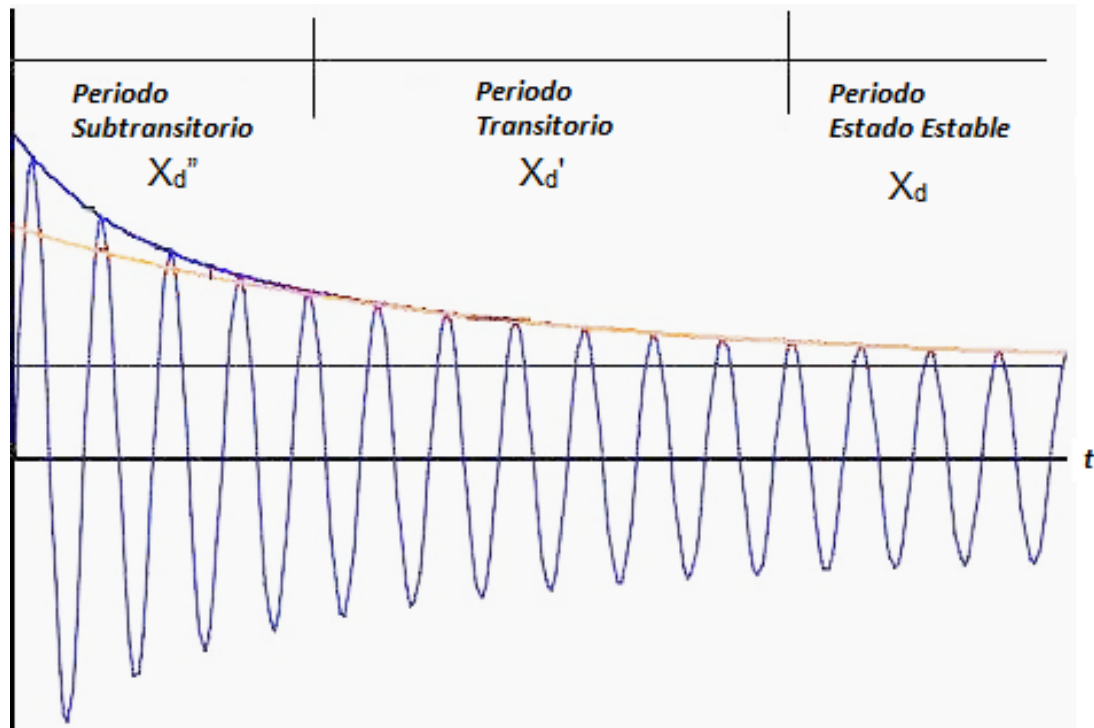


Fig 4.6 Corriente de falla de un generador sincrónico

4.1.2 EL MOTOR DC

El motor de corriente continua se encuentra muy extendido en aplicaciones especialmente industriales, esto a pesar de que necesita la instalación de un equipo adicional para transformar la corriente alterna en continua. El motor DC presenta algunas ventajas significativas con respecto a un motor AC de tamaño comparable, entre las cuales se podría mencionar: un par de arranque mayor, mayor velocidad y mejor precisión para su control.

La Figura 4.7 muestra la vista transversal de un motor de corriente continua, se puede observar la disposición de devanados y el sentido de circulación de la corriente en los mismos.

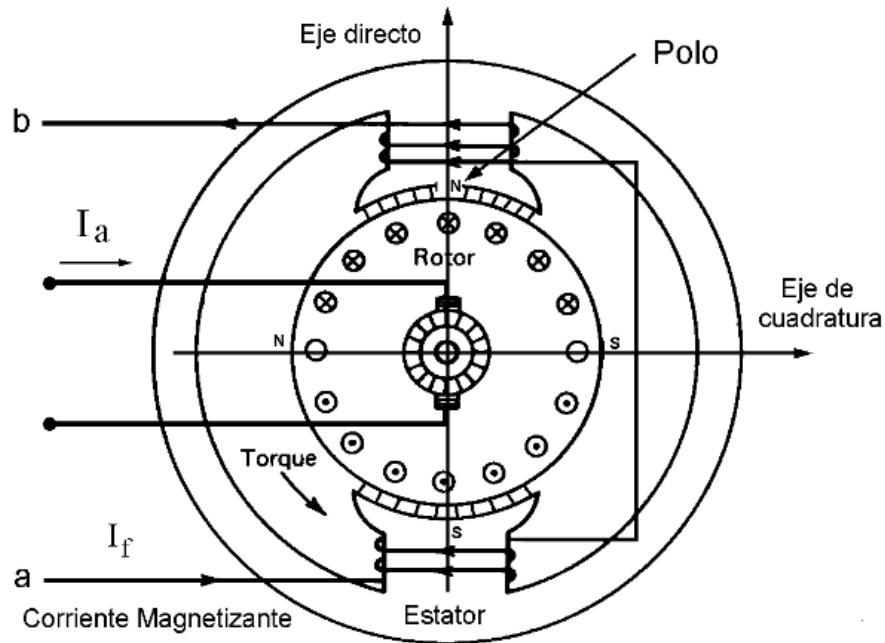


Fig 4.7 Vista transversal de un motor DC

El funcionamiento del motor DC se basa en el campo magnético uniforme creado en los polos de su estator, aquí se localiza el denominado devanado de campo, mientras que los conductores de la armadura llevan corriente eléctrica continua a partir de la red de suministro.

De acuerdo, con la ecuación de fuerza de Lorentz, un conductor que transporta corriente eléctrica, experimenta una fuerza que tiende a moverlo si se encuentra dentro de un campo magnético. Con base en esta ley se puede entender de porqué la fuerza generada por los polos del motor hace que la armadura del rotor gire en dirección del torque desarrollado por el motor.

4.1.2.1 Control de Velocidad de un Motor DC

Una de las ventajas más significativas de un motor DC es que permite modificar su velocidad a cualquier torque sin efectuar ningún cambio en su construcción. Existen dos métodos principales que permiten efectuar el control de velocidad de un motor DC: mediante la variación de la resistencia de armadura y la variación del campo.

Control mediante la resistencia de armadura

Para este método se incluye en el circuito de la armadura del motor una resistencia que reduce la fuerza electromotriz del motor para cualquier corriente de armadura requerida.

La velocidad de un motor DC se puede obtener de la ecuación (4.12).

$$\omega_m = \frac{V_s - I_a R}{K_a \phi_P} \quad (4.12)$$

Donde:

K_a : Constante de la máquina

ϕ_P : Flujo por polo

V_s : Voltaje aplicado a los terminales de armadura

I_a : Corriente de armadura

R : Resistencia total en serie

Como se puede observar en la Figura 4.8, al aumentar el valor de la resistencia, el voltaje aplicado a la armadura del motor disminuye y por tanto su velocidad también disminuye. Este método de control es apropiado para operar al motor a velocidad más baja que la especificada, al tiempo que se mantiene el torque desarrollado.

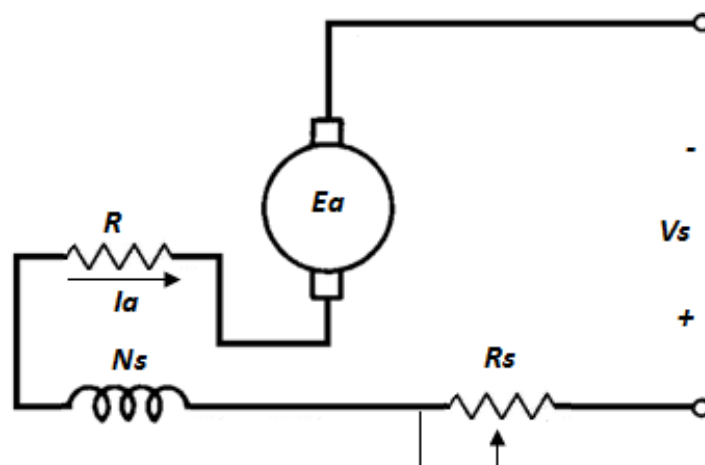


Fig 4.8 Control de la resistencia de armadura en motores DC serie

Sistema Ward - Leonard

Consiste en aplicar un voltaje reducido a las terminales de la armadura del motor, en tanto que el voltaje a través del devanado de campo de un motor compound o shunt se mantiene constante.

La ventaja en relación al control mediante resistencia de armadura es que reduce las pérdidas de potencia.

La desventaja es que necesita dos fuentes de energía para controlar la velocidad de un motor shunt o compound.

El sistema Ward – Leonard necesita dos generadores y un motor de corriente alterna, como se puede observar en la Figura 4.9.

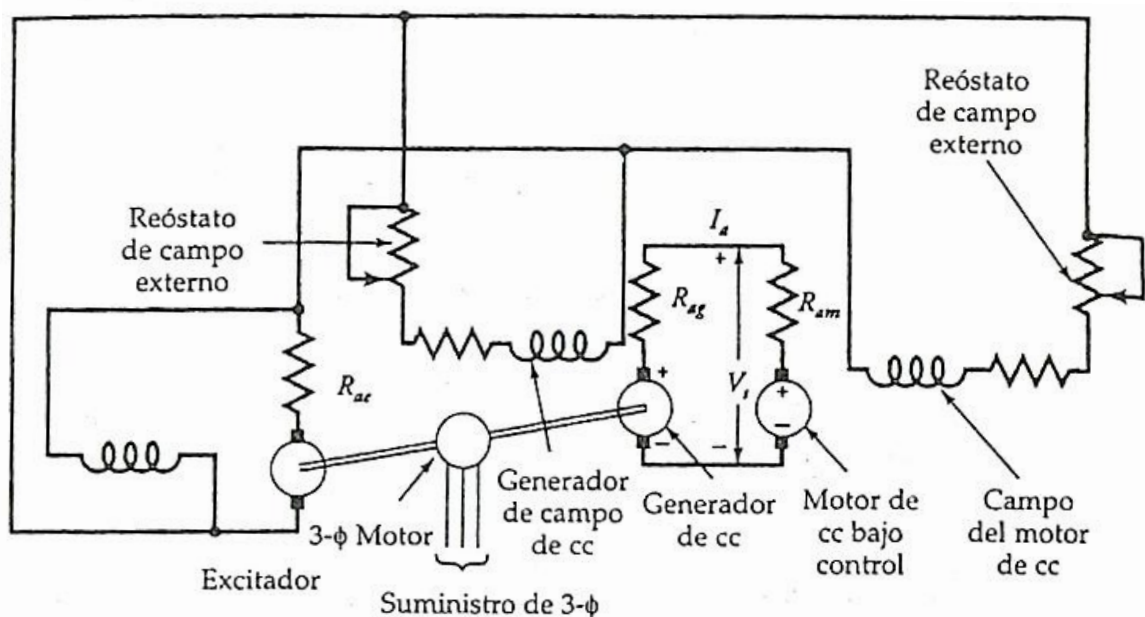


Fig 4.9 Sistema Ward – Leonard para control de velocidad de motores DC [7]

4.1.3 EL MOTOR DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción o asíncronos, son los más utilizados debido a su robustez, sencillez constructiva y poco mantenimiento.

Su utilización es apta para aquellos requerimientos en los cuales no se debe mantener una velocidad constante.

Como se muestra en la Figura 4.10, el estator de un motor trifásico de inducción está formado por un conjunto de tres bobinas, las cuales son alimentadas por un sistema trifásico de corrientes, lo cual da origen a un campo magnético giratorio de módulo constante que gira a velocidad sincrónica.

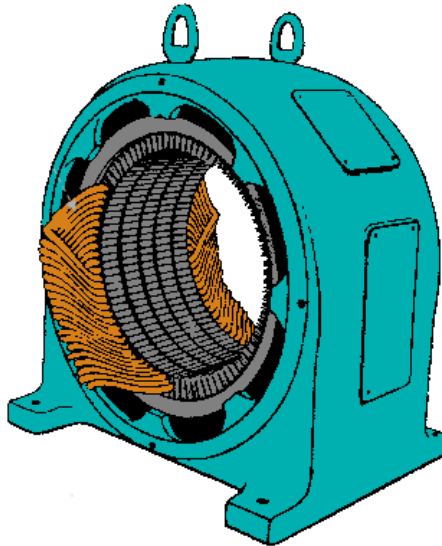


Fig 4.10 Estator de un motor de inducción [17]

El rotor de estos motores puede ser de dos tipos: jaula de ardilla o devanado.

El rotor *jaula de ardilla* constituye un cilindro montado en un eje, el cual contiene internamente barras conductoras longitudinales y conectadas en ambos extremos poniendo en cortocircuito los anillos que forman la jaula de la Figura 4.11. Generalmente este tipo de rotor se utiliza cuando la carga requiere un torque de arranque reducido.

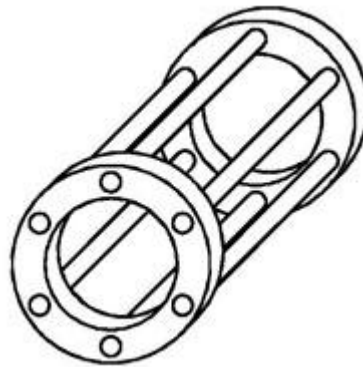


Fig 4.11 Rotor Jaula de Ardilla para un motor de inducción

El motor de *rotor devanado* tiene tantos polos y fases como el estator, la colocación de sus bobinas es igual que la del estator. Sus devanados trifásicos están conectados internamente para formar una conexión neutra interna y los otros extremos se conectan a anillos rozantes, como se muestra en la Figura 4.12.

Mediante escobillas se puede agregar resistencias internas en el circuito del rotor, logrando de este modo controlar el torque y la velocidad del motor. Los motores de rotor devanado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

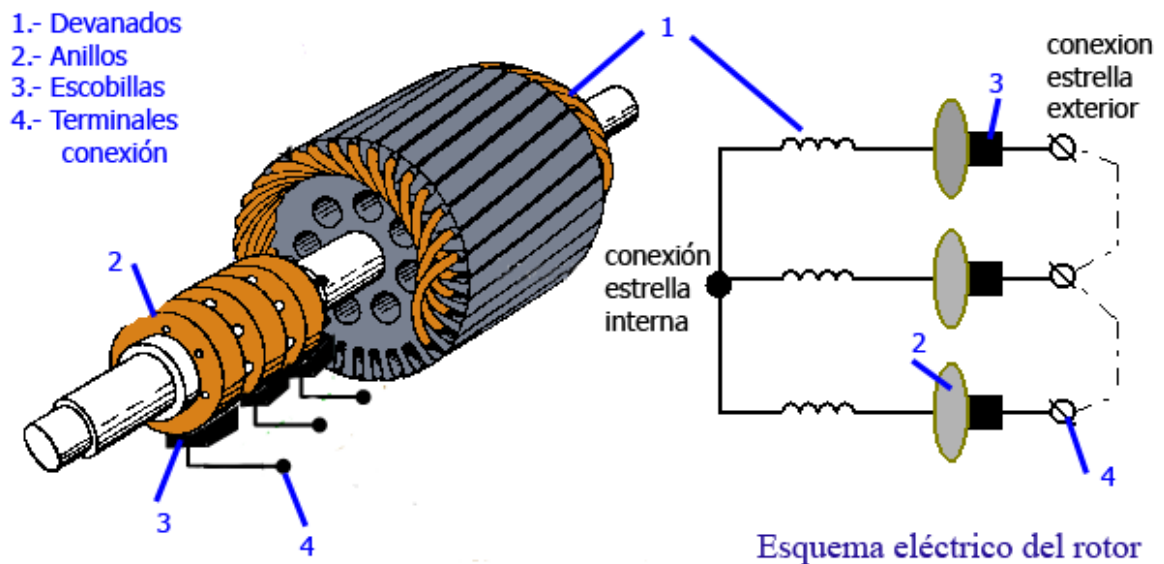


Fig 4.12 Rotor devanado de un motor de inducción [17]

4.1.3.1 Control de Velocidad de un Motor de Inducción

La velocidad de operación de un motor de inducción puede controlarse variando la frecuencia del voltaje de suministro, cambiando el voltaje aplicado y añadiendo o retirando resistencias en la armadura del motor (rotor devanado).

El método más utilizado es mediante el control de frecuencia, ya que permite lograr un amplio rango de variación en la velocidad. Para mantener constante la densidad de flujo y de ese modo desarrollar el torque máximo, el voltaje aplicado debe variar en proporción directa a la frecuencia.

En la Figura 4.13 se observan las características velocidad – torque para cuatro frecuencias. Se incluye también una curva típica de carga. En cada frecuencia, el motor opera a una velocidad en la que la línea de carga interseca la característica velocidad – torque para esa frecuencia [7].

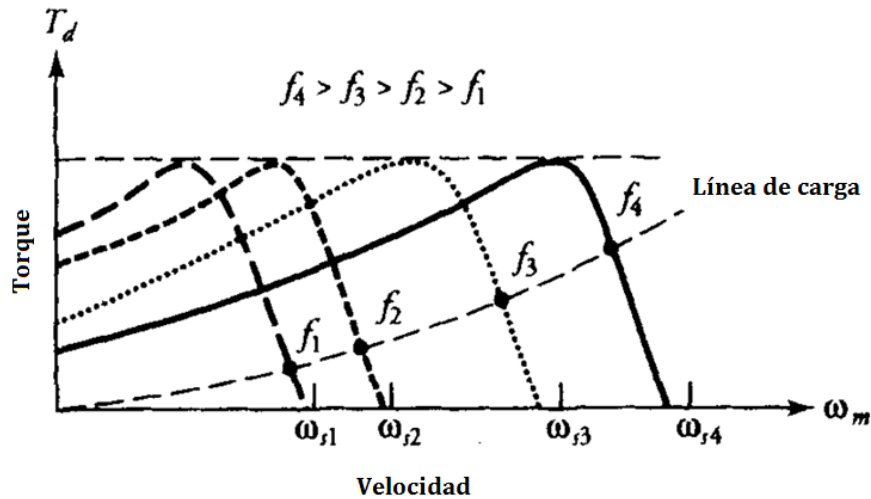


Fig 4.13 Característica velocidad – torque para distintas frecuencias y valores ajustados de voltaje para motores de inducción [7]

4.2 MODELAMIENTO ELÉCTRICO

En base al procedimiento utilizado para el modelamiento del sistema, se consideran valores típicos de transformadores y generadores que representan las centrales de generación del SNI. Las Tablas 4.2 y 4.3 detallan valores típicos de reactancias para generadores sincrónicos de polos salientes y rotor liso.

Se ha contemplado la inclusión de 10 generadores sincrónicos en el modelo reducido del SNI: 4 unidades hidráulicas y 6 térmicas, de las que se obtiene sus valores de resistencias y reactancias en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11.

Tabla 4.2 Rangos de valores típicos para reactancias de generadores sincrónicos [4]

Parámetro		Unidad Hidráulica	Unidad Térmica
Reactancia Sincrónica	X_d (%)	0,6 – 1,5	1,0 – 2,3
	X_q (%)	0,4 – 1,0	1,0 – 2,3
Reactancia Transitoria	X'_d (%)	0,2 – 0,5	0,15 – 0,4
	X'_q (%)	-	0,3 – 1,0
Reactancia Subtransitoria	X''_d (%)	0,15 – 0,35	0,12 – 0,25
	X''_q (%)	0,2 – 0,45	0,12 – 0,25
Resistencia del Estator	R_a (%)	0,002 – 0,02	0,0015 – 0,005

Tabla 4.3 Valores típicos en porcentaje de reactancias de generadores sincrónicos [8]

[%]	Turbo Generadores				Generadores Polos Salientes	
	2 polos		4 polos		Con devanados amortiguadores	Sin devanados amortiguadores
	Enfriamiento convencional	Enfriamiento de conductores	Enfriamiento convencional	Enfriamiento de conductores		
X_d	1,76	1,95	1,38	1,87	1,00	1,00
X_q	1,66	1,93	1,35	1,82	0,60	0,60
X'_d	0,21	0,33	0,26	0,41	0,32	0,32
X''_d	0,13	0,28	0,19	0,29	0,20	0,30
X_2	= X''_d	= X''_d	= X''_d	= X''_d	0,20	0,40

Los grupos de generación hidroeléctrica serán modelados con generadores sincrónicos de polos salientes, (generalmente utilizados en velocidades bajas y medias). Mientras que la generación térmica será modelada con generadores sincrónicos de rotor cilíndrico (4 polos), generalmente utilizados en turbogeneradores de alta velocidad.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se aprecian los valores de reactancias sincrónicas de eje directo y cuadratura para los generadores hidroeléctricos y la reactancia

sincrónica para los generadores termoeléctricos. Se han considerado los valores de reactancias de turbogeneradores de enfriamiento convencional, así mismo las reactancias de los generadores de polos salientes incluyen el devanado amortiguador. A partir de los valores de las Tablas 4.2 y 4.3, se obtienen valores para cada uno de los generadores del sistema reducido, los mismos que son llevados a bases del sistema del Laboratorio mediante la relación 3.13.

Tabla 4.4 Valores de reactancias para generadores hidroeléctricos.

Reactancias Sincrónicas Grupos de Generación Hidroeléctrica						
Grupo	Sistema Real				Sistema Laboratorio	
	Reactancia [%] Base propia		Reactancia [Ω]		Reactancia [Ω]	
	X_d	X_q	X_d	X_q	X_d	X_q
1-1	1,00	0,60	0,15	0,09	1,90	1,14
1-2	1,00	0,60	0,15	0,09	1,90	1,14
2	1,00	0,60	0,33	0,20	4,22	2,53
3	1,00	0,60	0,42	0,25	5,40	3,24
4	1,00	0,60	0,68	0,41	8,66	5,20

Tabla 4.5 Valores de reactancias para generadores termoeléctricos

Reactancias Sincrónicas Grupos de Generación Termoeléctrica			
Grupo	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%] Base propia	Reactancia [Ω]	Reactancia [Ω]
	X_d	X_d	X_d
1	1,38	1,79	22,74
2	1,38	2,80	35,65
3	1,38	0,75	9,59
4	1,38	0,57	7,26
5	1,38	0,47	6,03
6	1,38	0,60	7,65

Siguiendo el mismo procedimiento, en las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11; se obtienen mediante la relación 3.13 las resistencias del estator y las reactancias transitorias y subtransitorias como una referencia para la posterior construcción física del modelo a escala.

Tabla 4.6 Valores de reactancias transitorias para generadores hidroeléctricos

Reactancias Transitorias Grupos de Generación Hidroeléctrica			
Grupo	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%]		Reactancia [Ω]
	Base propia		
	X_d'	X_d'	X_d'
1-1	0,32	0,05	0,61
1-2	0,32	0,05	0,61
2	0,32	0,11	1,35
3	0,32	0,14	1,73
4	0,32	0,22	2,77

Tabla 4.7 Valores de reactancias transitorias para generadores termoeléctricos.

Reactancias Transitorias Grupos de Generación Termoeléctrica						
Grupo	Sistema Real				Sistema Laboratorio	
	Reactancia [%]		Reactancia [Ω]		Reactancia [Ω]	
	X_d'	X_q'	X_d'	X_q'	X_d'	X_q'
1	0,26	0,65	0,34	0,84	4,29	10,73
2	0,26	0,65	0,53	1,32	6,71	16,77
3	0,26	0,65	0,14	0,35	1,81	4,52
4	0,26	0,65	0,11	0,27	1,37	3,42
5	0,26	0,65	0,09	0,22	1,14	2,84
6	0,26	0,65	0,11	0,28	1,44	3,60

Tabla 4.8 Valores de reactancias subtransitorias para generadores hidroeléctricos

Reactancias SubTransitorias Grupos de Generación Hidroeléctrica						
Grupo	Sistema Real				Sistema Laboratorio	
	Reactancia [%] Base propia		Reactancia [Ω]		Reactancia [Ω]	
	X_d''	X_q''	X_d''	X_q''	X_d''	X_q''
1-1	0,2	0,33	0,03	0,05	0,38	0,63
1-2	0,2	0,33	0,03	0,05	0,38	0,63
2	0,2	0,33	0,07	0,11	0,85	1,39
3	0,2	0,33	0,08	0,14	1,08	1,78
4	0,2	0,33	0,14	0,22	1,73	2,86

Tabla 4.9 Valores de reactancias subtransitorias para generadores termoeléctricos

Reactancias SubTransitorias Grupos de Generación Termoeléctrica			
Grupo	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%] Base propia	Reactancia [Ω]	Reactancia [Ω]
	X_d''	X_d''	X_d''
1	0,19	0,25	3,14
2	0,19	0,38	4,90
3	0,19	0,10	1,32
4	0,19	0,08	1,00
5	0,19	0,07	0,83
6	0,19	0,08	1,05

Tabla 4.10 Valores de resistencia del estator para generadores hidroeléctricos

Resistencias del Estator Grupos de Generación Hidroeléctrica			
Grupo	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%] Base propia	Reactancia [Ω]	Reactancia [Ω]
	R_a''	R_a''	R_a''
1-1	0,011	0,0016	0,02
1-2	0,011	0,0016	0,02
2	0,011	0,0036	0,05
3	0,011	0,0047	0,06
4	0,011	0,0075	0,10

Tabla 4.11 Valores de resistencia del estator para generadores termoeléctricos

Resistencias del Estator Grupos de Generación Termoeléctrica			
Grupo	Sistema Real		Sistema Laboratorio
	Reactancia [%] Base propia	Reactancia [Ω]	Reactancia [Ω]
	R_a''	R_a''	R_a''
1	0,0033	0,0043	0,05
2	0,0033	0,0067	0,09
3	0,0033	0,0018	0,02
4	0,0033	0,0014	0,02
5	0,0033	0,0011	0,01
6	0,0033	0,0014	0,02

4.3 MODELAMIENTO MECÁNICO

4.3.1 MECÁNICA DE CUERPOS ROTATORIOS

En base a la Figura 4.14, el ángulo de rotación de un cuerpo θ se puede definir como el cociente entre el arco formado s y el radio r , como se observa en la ecuación (4.13).

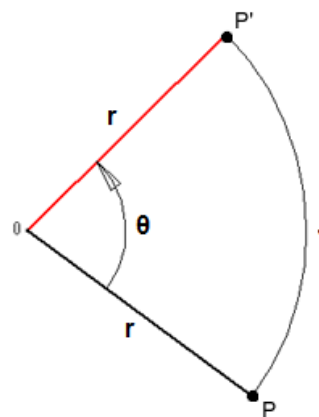
$$\theta = \frac{s}{r} \quad (4.13)$$


Fig 4.14 Definición de ángulo de rotación θ

A partir de la definición de ángulo se obtiene la velocidad y aceleración angular en las ecuaciones (4.14) y (4.15) respectivamente.

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.14)$$

$$\alpha_m = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4.15)$$

Existe una relación entre las cantidades angulares y tangenciales, la cual se describe en la Figura 4.15.

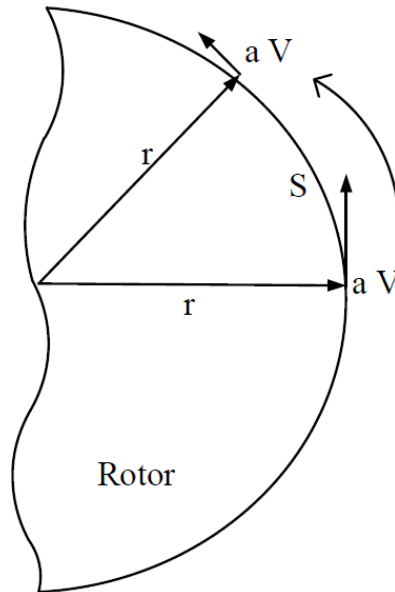


Fig 4.15 Relación entre las cantidades angulares y tangenciales de un cuerpo rotatorio [9]

A partir de la Figura 4.15 se obtienen las relaciones (4.16) y (4.17):

$$v = r \cdot \omega_m = r \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4.16)$$

$$a = r \cdot \alpha_m = r \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4.17)$$

El torque total debido a la fuerza tangencial está dado por las ecuaciones (4.18) y (4.19)

$$T = rF \quad (4.18)$$

$$T = r dF \quad (4.19)$$

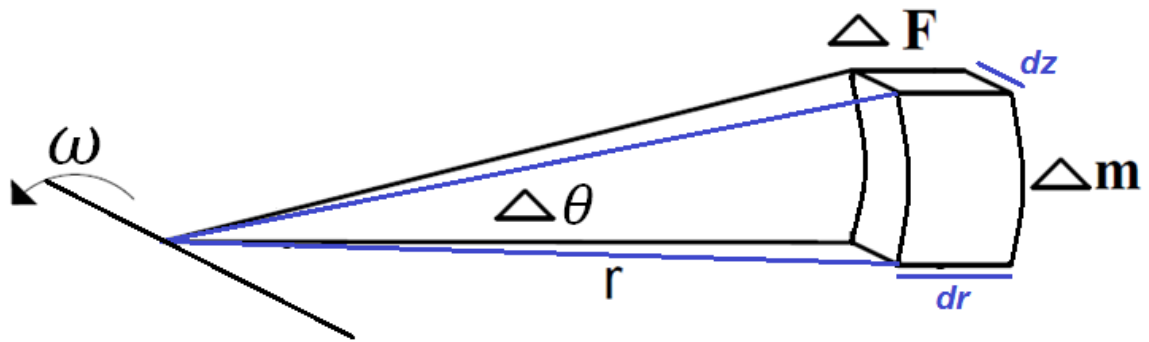
Al aplicar un torque a un cuerpo, experimenta una aceleración angular α_m .

Aplicando la segunda ley de Newton al diferencial de masa de la Figura 4.16, se obtiene la ecuación (4.20).

$$\Delta F = a \Delta m = r \Delta m \alpha_m = r \Delta m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.20)$$

El torque requerido está dado por las ecuaciones (4.21) y (4.22).

$$\Delta T = r \Delta F = r^2 \alpha_m \Delta m \quad (4.21)$$

Fig 4.16 Cuerpo rotatorio de masa Δm [9]

$$T = \alpha_m \quad r^2 \, dm = J \, \alpha_m \quad (4.22)$$

La magnitud J es el momento polar de inercia del cuerpo, su unidad en el SI es el (kilogramo-metro cuadrado), se obtiene mediante la relación (4.23).

$$J = \quad r^2 \, dm \quad (4.23)$$

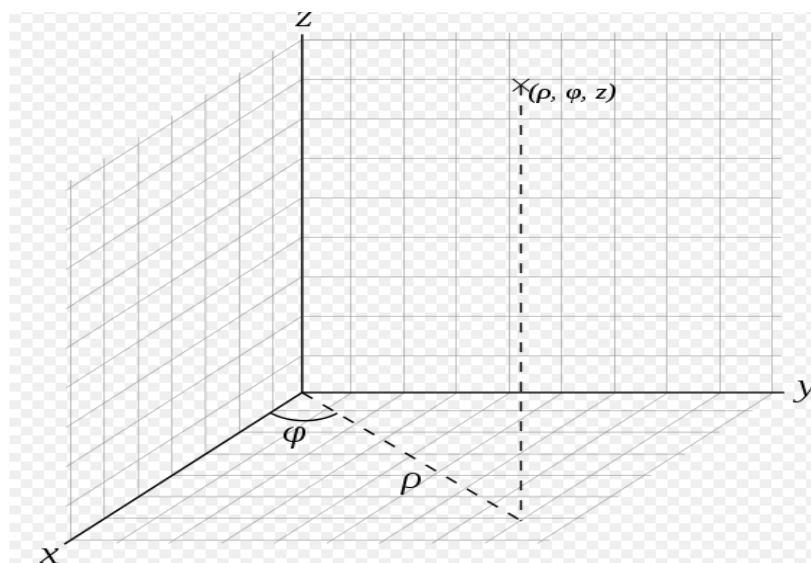


Fig 4.17 Sistema de coordenadas cilíndricas

Si se considera Δm una masa infinitesimal como se observa en la Figura 4.18, y se reemplaza su volumen en las coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , de la Figura 4.17, se obtiene la relación (4.24).

$$\Delta m = \rho \, \Delta V$$

$$\Delta m = \rho r \Delta \theta \Delta r \Delta z \quad (4.24)$$

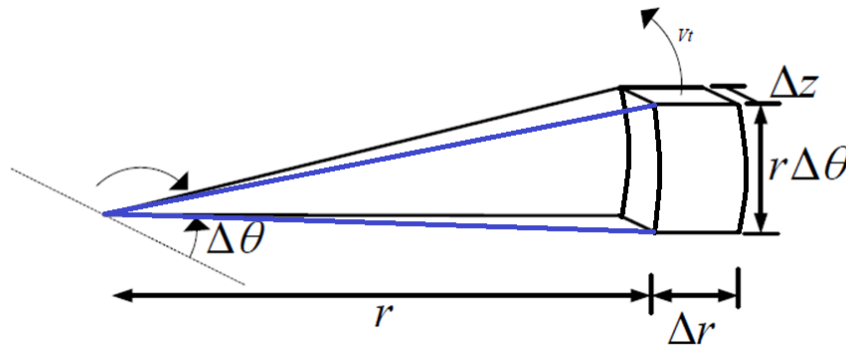


Fig 4.18 Masa Rotatoria Elemental [9]

Se obtiene a continuación la relación (4.25) para el momento de inercia

$$J = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho r, \theta, z r^3 d\theta dr dz \quad (4.25)$$

Así mismo la relación (4.26) para la energía cinética de un cuerpo rotatorio

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2 \quad (4.26)$$

4.3.2 INERCIA DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA

Partiendo de la ecuación 4.25 y si se considera un cilindro uniforme, resulta que θ , r y z con constantes, por lo tanto se obtiene la ecuación (4.27)

$$J = \frac{\rho \pi R^4 L}{2} \quad (4.27)$$

La masa del cilindro está dada por la ecuación (4.28)

$$M = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho r, \theta, z r d\theta dr dz = \rho \pi R^2 L \quad (4.28)$$

Se reemplaza (4.28) en (4.27) y se obtiene la relación (4.29)

$$J = \frac{1}{2} M R^2 \quad (4.29)$$

Al ser T el torque de aceleración, se determina mediante la relación (4.30)

$$T = r F \quad (4.30)$$

Al remplazar en (4.30), la relación (4.20) se obtiene las ecuaciones (4.31) y (4.32) para el torque:

$$T = r^2 dm \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.31)$$

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.32)$$

Siendo T el torque neto, es decir la suma de todos los torques que actúan sobre la máquina.

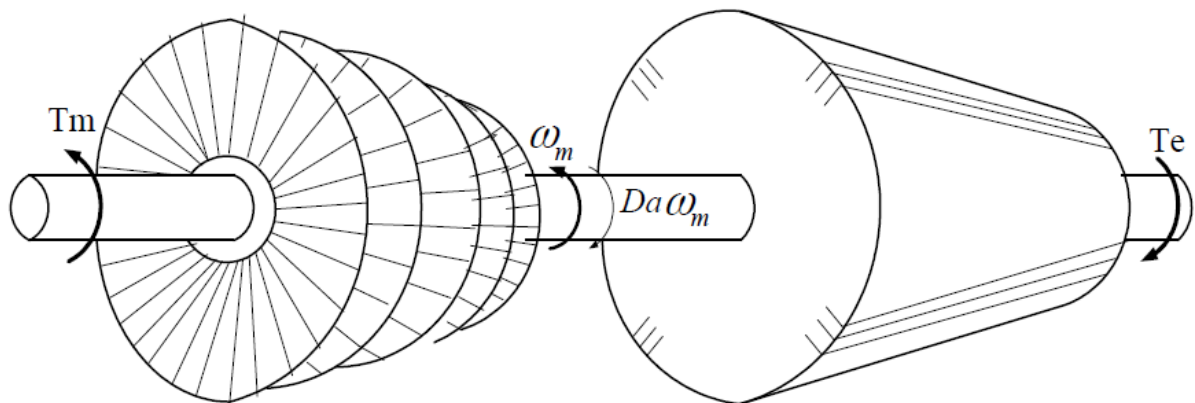


Fig 4.19 Torques aplicados al sistema turbina - generador [9]

Al referirse de manera particular al grupo turbina – generador de la Figura 4.19, se puede escribir la ecuación (4.33).

$$T = T_m - T_e - T_D \quad (4.33)$$

4.3.2.1 La Constante de Inercia H

La constante de inercia es una unidad muy útil y se encuentra determinada por la sumatoria de energías cinéticas de todos los componentes rotativos dividido para la potencia base de la máquina, como muestra la ecuación (4.34).

$$H = \frac{\text{Energías cinéticas}}{\text{Potencia base de la máquina en MVA}} = \frac{Ec}{S_{BM}} \quad (4.34)$$

Remplazando (4.26) se obtiene la ecuación (4.35)

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_m^2}{S_{Bm}} \text{ [Joule/MVA]} \quad (4.35)$$

Finalmente refiriendo la constante a la potencia base del sistema se obtiene la relación (4.36).

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_m^2}{S_B} \text{ [s]} \quad (4.36)$$

Dónde:

J: Momento de Inercia de la máquina

ω_m : Velocidad angular de la máquina

S_B : Potencia base de la máquina

En la Tabla 4.12 y la Figura 4.20 se muestran valores típicos de H para distintos tipos de unidades de generación.

Tabla 4.12 Valores típicos de constante de inercia [4]

Tipo de Generación	H (s)
Unidad Térmica	
3600 rpm (2 polos)	2,5 – 6
1800 rpm (4 polos)	4 - 10
Unidad Hidráulica	
< 200 rpm	2 – 3
> 200 rpm	2 – 4

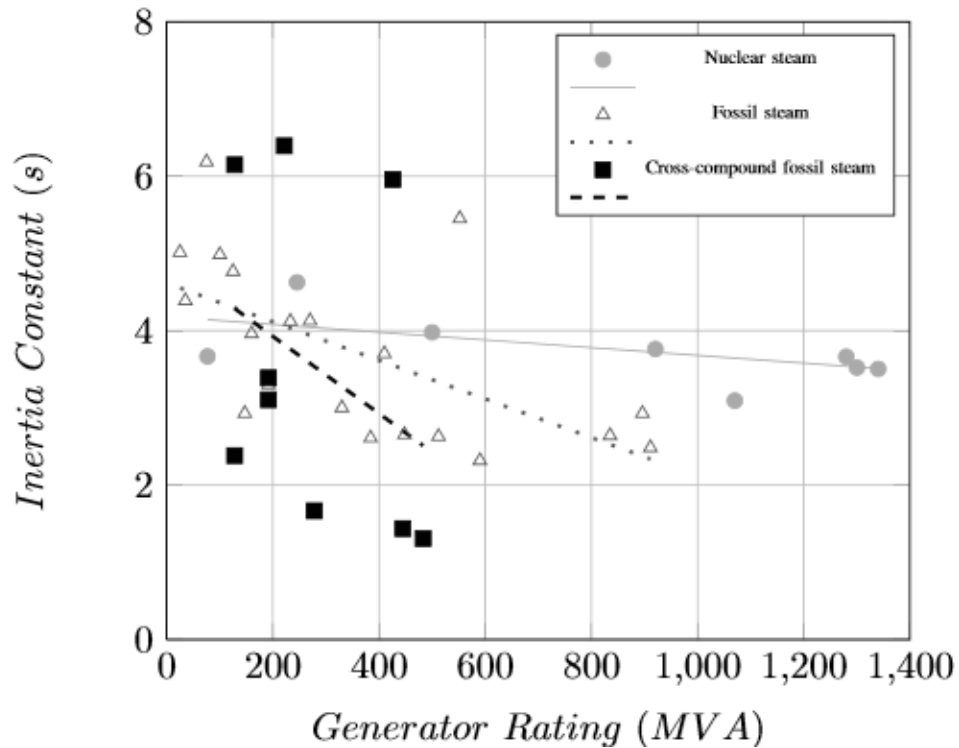


Fig 4.20 Constantes de Inercia para unidades convencionales [11], [12]

4.3.2.2 Cálculo de la constante de inercia en el sistema MKS

Para unidades MKS se define la constante de inercia por la ecuación (4.37)

$$H = \frac{J \omega_m^2 \times 10^{-6}}{2 S_B}$$

$$H = \frac{J (2\pi \text{rpm}/60)^2 \times 10^{-6}}{2 S_B}$$

$$H = 5,48 \times 10^{-9} \frac{J (\text{rpm})^2}{S_B} \quad [\text{s}] \quad (4.37)$$

Siendo:

J: momento de inercia [kg.m²]

ω_m : velocidad nominal en radianes mecánicos por segundo [$2\pi\text{rpm} / 60$]

S_B : Potencia base de la máquina

Se puede calcular el valor de la constante de inercia de una máquina a partir de las dimensiones geométricas y la masa de sus elementos rotatorios, utilizando las ecuaciones (4.29) y (4.37).

4.3.2.3 El disco o volante de inercia

Un volante o disco de inercia es un elemento pasivo, que aporta al sistema de generación una inercia adicional, de modo que permite almacenar energía cinética. Este volante continúa su movimiento por inercia cuando disminuye el torque que lo propulsa. De esta forma, el volante de inercia se opone a las aceleraciones bruscas en un movimiento rotativo, logrando de este modo reducir las fluctuaciones de la velocidad angular.

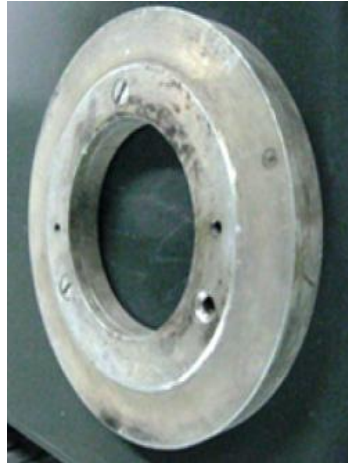


Fig 4.21 Disco de inercia de una máquina sincrónica [9]

En la Figura 4.21 muestra un típico volante de inercia, puede ser utilizado indistintamente en un motor o generador.

Se puede obtener el valor del momento de inercia de un disco a partir de su concepto fundamental, es decir de la ecuación (4.22).

$$J = \int_0^M r^2 dm \quad (4.22)$$

El diferencial de masa se puede analizar como un cilindro de espesor radial con la relación (4.38).

$$dm = \rho dV = \rho L 2\pi r dr \quad (4.38)$$

Siendo:

ρ : Densidad del material del disco

L: Longitud del disco

r: Radio del disco

En base a la Figura 4.22 y reemplazando (4.38) en la ecuación (4.22) se obtiene la ecuación (4.39).

$$J = 2\pi\rho L \int_a^b r^3 dr = 2\pi\rho L \left[\frac{b^4}{4} - \frac{a^4}{4} \right] \quad (4.39)$$

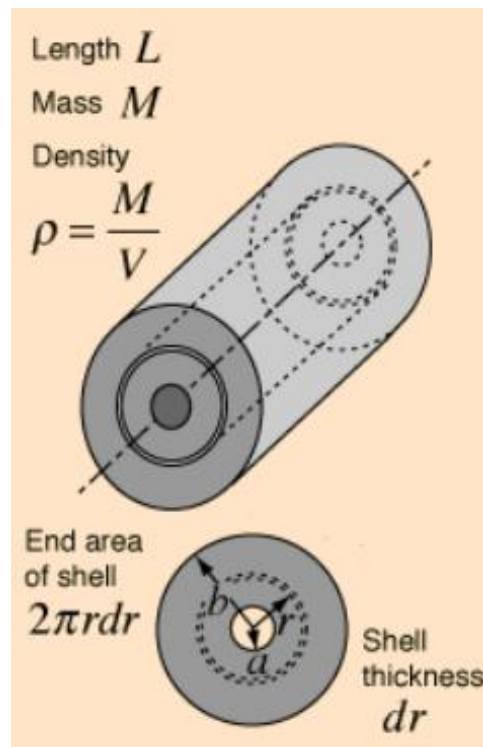


Fig 4.22 Parámetros de un cilindro hueco [19]

La densidad se la obtiene de la relación (4.40)

$$\rho = \frac{M}{\pi L (b^2 - a^2)} \quad (4.40)$$

Finalmente, reemplazando (4.40) en (4.39):

$$J = \frac{\pi}{2} \frac{M}{\pi L (b^2 - a^2)} L (b^2 - a^2) (b^2 + a^2)$$

Se obtiene la ecuación (4.41) para el momento de inercia de un disco hueco

$$J = \frac{1}{2} M (b^2 + a^2) \quad (4.41)$$

Dónde:

- M es la masa del disco,
- a es el radio interno del hueco, y
- b es el radio externo del disco.

Si la masa de un disco hueco, dada su densidad se obtiene de la ecuación (4.42)

$$M = \rho\pi L(b^2 - a^2) \quad (4.42)$$

Reemplazando (4.42) en la ecuación (4.41), se obtiene finalmente la ecuación (4.43) para el momento de inercia.

$$J = \frac{1}{2}\rho\pi L(b^2 - a^2) b^2 + a^2$$

$$J = \frac{1}{2}\rho\pi L(b^4 - a^4) \quad (4.43)$$

En la tabla 4.13 se encuentran los datos mecánicos de distintos materiales de los que generalmente son construidos los volantes de inercia.

Tabla 4.13 Densidades y Tensiones para distintos materiales [10]

Elemento	Densidad [kg/m ³]	Tension [MN/m ²]	Tension específica [MNm/kg]
Acero (AISI 4340)	7800	1800	0,22
Aleación (AlMnMg)	2700	600	0,22
Titanio (TiAl6Zr5)	4500	1200	0,27
GFRP (E-Cristal De 60 Vol%)	2000	1600	0,80
Cfrp (60 Carbón Del Vol% HT)	1500	2400	1,60

Se pueden diferenciar dos tipos fundamentales de volantes de inercia.

- Volantes rápidos: Estos volantes giran a muy altas revoluciones y tienen momentos de inercia muy bajos. Su masa y volumen son reducidos lo que les hace apropiados para aplicaciones donde el espacio disponible para el elemento almacenador es reducido y el peso está limitado, se utiliza en generadores térmicos.
- Volantes lentos: Estos volantes giran a velocidades angulares inferiores que los rápidos, su momento de inercia es elevado, y en consecuencia su masa y

volumen también lo son. Son apropiados para instalaciones donde el espacio no es un inconveniente, como en instalaciones estacionarias, se utiliza en generadores hidroeléctricos.

4.3.2.4 Dimensionamiento de volantes de inercia

En virtud de que las máquinas del Laboratorio tendrán un funcionamiento similar al del sistema real, se ha visto la necesidad de incorporar volantes de inercia a cada una de las máquinas y de este modo simular la respuesta dinámica de los generadores reales.

Partiendo del concepto de que el momento de inercia de un sistema es igual a la suma de los momentos de inercia de cada cuerpo que se halla involucrado en el mismo, se puede incrementar la inercia de las máquinas del Laboratorio, a fin de asemejarlas a las reales.

Para las unidades hidroeléctricas, en cada estación se escoge una unidad de generación representativa y dependiendo del tipo de turbina, y en base de las Tablas 4.12 y la Figura 4.20, se obtienen los valores típicos de constante de inercia para cada grupo de generadores pertenecientes a las barras del sistema, como se muestra en la Tabla 4.15.

A través de la Tabla 4.14 se determina la velocidad típica de rotación de las turbinas hidráulicas, dato necesario para el modelamiento posterior.

Tabla 4.14 Velocidades sincrónicas de turbinas hidráulicas [12]

n_s (rpm)	Tipo de Turbina
3600	Pelton
1800	Francis Rápida
1200	Francis Lenta
900	Kaplan

Para las unidades termoeléctricas, se ha considerado máquinas de 4 polos para todos los casos, y en base de la Tabla 4.12 y la Figura 4.20, se obtienen los valores típicos de constante de inercia de cada grupo de generadores pertenecientes a las barras del sistema como se muestra en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Valores de Constante de Inercia de las unidades de generación del sistema reducido del SNI

S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Potencia [MVA]	H [s]
Hidroeléctrica I	1276	2,5
Hidroeléctrica II	1276	2,5
S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Potencia [MVA]	H [s]
Hidroeléctrica (TF)	574	2,5
S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Potencia [MVA]	H [s]
Hidroeléctrica (TF)	449	2,5
Térmica a Vapor	147	6
Térmica MCI	94	6
S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Potencia [MVA]	H [s]
Hidroeléctrica (TF)	280	3
Térmica MCI	349	6
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Potencia [MVA]	H [s]
Térmica a Vapor	461	6
Térmica a Gas	555,5	6
Térmica MCI	437,8	6

Para todos los grupos motor – generador se puede plantear la ecuación (4.44).

$$Ec_T = Ec_{máquinas} + Ec_{volante} \quad (4.44)$$

Dónde:

E_{CT} : Energía cinética total

$E_{Cmáquinas}$: Energía cinética de las máquinas (grupo generación motor – generador)

$E_{Cvolante}$: Energía cinética del volante inercial

Despejando la energía cinética de la ecuación (4.34)

$$H = \frac{\text{Energías cinéticas}}{\text{Potencia base de la máquina en MVA}} = \frac{E_C}{S_B}$$

Se obtiene la ecuación (4.45)

$$E_C = H S_B \quad (4.45)$$

En base de la ecuación (4.45) se obtienen los valores de energía cinética para cada uno de los grupos motor – generador del laboratorio, los cuales se incluyen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Energías cinéticas obtenidas para los grupos de generación del sistema del laboratorio

S/E PAUTE	
Tipo de Generación	E_C [kVA.s]
Hidroeléctrica I	65,00
Hidroeléctrica II	65,00
S/E TOTORAS	
Tipo de Generación	E_C [kVA.s]
Hidroeléctrica (TF)	28,75
S/E SANTA ROSA	
Tipo de Generación	E_C [kVA.s]
Hidroeléctrica (TF)	22,50
Térmica a Vapor	12,00
Térmica MCI	7,60
S/E QUEVEDO	
Tipo de Generación	E_C [kVA.s]
Hidroeléctrica (TF)	16,80
Térmica MCI	28,00

S/E PASCUALES	
Tipo de Generación	E_c [kVA.s]
Térmica a Vapor	36,80
Térmica a Gas	44,40
Térmica MCI	35,20

Para obtener la energía cinética exclusivamente de las máquinas, se toma en cuenta la ecuación (4.46).

$$E_{C_{máquinas}} = E_{C_{motor}} + E_{C_{generador}} \quad (4.46)$$

Dónde:

$E_{C_{motor}}$: Energía cinética de los motores DC o de inducción

$E_{C_{generador}}$: Energía cinética de los generadores sincrónicos

Partiendo de la ecuación (4.47), se calculan los valores de energía cinética para motores y generadores.

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (4.47)$$

En la Tabla 4.17 se pueden observar valores típicos de momentos de inercia para motores DC y de inducción que se utilizan para los cálculos de energía posteriores.

Tabla 4.17 Valores típicos de momento de inercia para motores de inducción y motores DC (tomado de varios catálogos de equipos) Anexo 4

POTENCIA		Momento de Inercia	
		Motor de Inducción	Motor DC
Hp	kW	kg-m ²	kg-m ²
0,5	0,37	0,0049	0,004
0,75	0,55	0,0055	0,004
1	0,75	0,0066	0,004
1,5	1,10	0,0127	0,0061
2	1,50	0,0220	0,0061
3	2,20	0,0740	0,015
4	3,00	0,0838	0,017
5	3,70	0,1033	0,020
6	4,50	0,1053	0,022

7,5	5,50	0,1317	0,025
10,0	7,50	0,1668	0,042
12,5	9,20	0,2029	0,065
15,0	11,00	0,2299	0,090
20,0	15,00	0,2705	0,110
25,0	18,50	0,3686	0,140
30,0	22,00	0,6183	0,140
40,0	30,00	0,7901	0,290
50,0	37,00	1,0600	0,320
60,0	45,00	1,1500	0,330
75,0	55,00	3.0500	0,380
100,0	75,00	6.2100	0,650

Para los motores de inducción se consulta el Catálogo Técnico de la marca WEG del segmento Latinoamericano [27], que maneja sus productos en base a 4 clases de eficiencia:

IE1: Eficiencia Estándar

IE2: Alta Eficiencia

IE3: Eficiencia Premium

IE4 Eficiencia Súper Premium

Para el mercado ecuatoriano se cuenta en stock principalmente modelos con eficiencias IE1 e IE2, por lo que se toman los datos del catálogo IE2 de motores de inducción de 8 polos. Complementariamente en el Anexo 4 se puede observar los datos de motores de 2, 4, 6 y 8 polos.

Para el caso de los motores de corriente continua, se obtiene los datos del catálogo de la empresa *Crompton Greaves* [25], excluyendo los motores de potencia menor a 2.5 kW para los que se consulta catálogos de equipos de la marca Lenze [24].

En base a las Tablas 4.15 y 4.16 se calculan las energías cinéticas para cada motor del sistema del Laboratorio.

Es importante tener en cuenta que para cada generador se necesita como máquina motriz a un motor cuya potencia aparente o activa sea un 10 a 15% mayor a la del generador, por concepto de pérdidas propias. Para el presente

caso, el motor hace las veces de turbina, por lo que para determinar la potencia de los motores, se considera el factor de potencia del generador. Bajo estas consideraciones se obtiene en la Tabla 4.18 los valores de potencia de los motores de inducción y DC, dejando abierta la posibilidad de la utilización de ambos tipos de motores.

Como se muestra en la Figura 4.23, el motor como máquina motriz, se diseña para un factor de potencia uno.

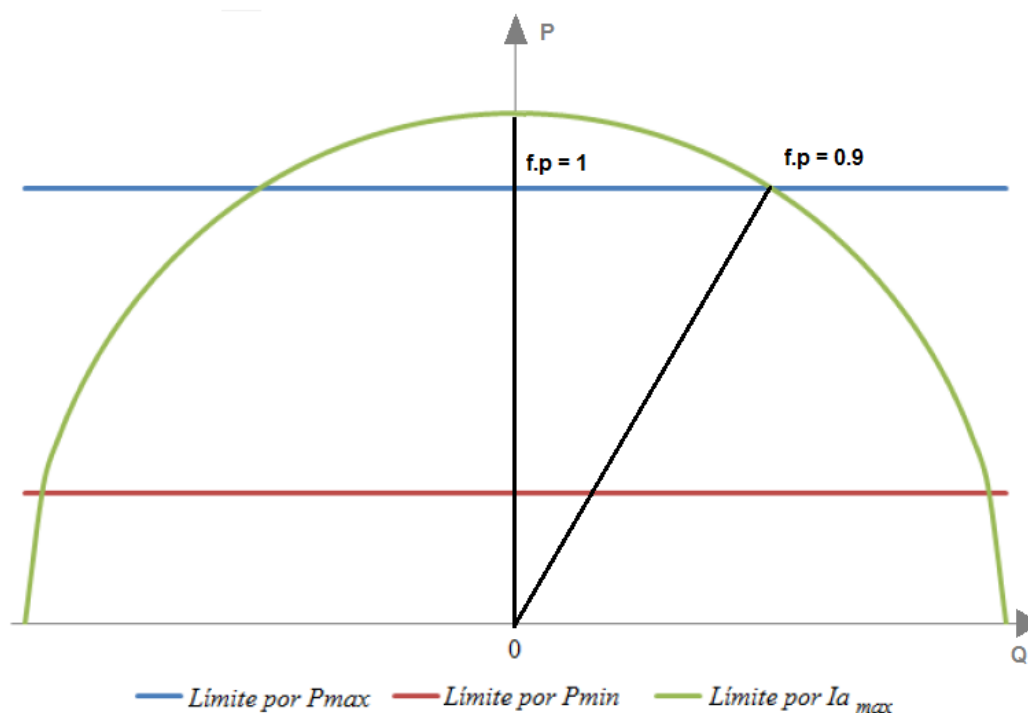


Fig 4.23 Límites de potencia para operación del generador sincrónico

Tabla 4.18 Valores de potencias para generadores y motores del sistema del Laboratorio

S/E PAUTE				
Tipo de Generación	Potencia Generador [kVA]	Potencia Motor Inducción [kVA]	Potencia Motor DC [kW]	HP
Hidroeléctrica I	26,0	33,33	30,0	40
Hidroeléctrica II	26,0	33,33	30,0	40
S/E TOTORAS				
Tipo de Generación	Potencia Generador [kVA]	Potencia Motor Inducción [kVA]	Potencia Motor DC [kW]	HP
Hidroeléctrica	11,5	16,67	15,0	20

S/E SANTA ROSA				
Tipo de Generación	Potencia Generador [kVA]	Potencia Motor Inducción [kVA]	Potencia Motor DC [kW]	HP
Hidroeléctrica	9,0	12,22	11,0	15
Térmica a Vapor	3,0	4,11	3,7	5
Térmica MCI	1,9	2,44	2,2	3
S/E QUEVEDO				
Tipo de Generación	Potencia Generador [kVA]	Potencia Motor Inducción [kVA]	Potencia Motor DC [kW]	HP
Hidroeléctrica	5,6	8,33	7,5	10
Térmica MCI	7,0	10,22	9,2	12,5
S/E PASCUALES				
Tipo de Generación	Potencia Generador [kVA]	Potencia Motor Inducción [kVA]	Potencia Motor DC [kW]	HP
Térmica a Vapor	9,2	12,22	11	15
Térmica a Gas	11,1	16,67	15	20
Térmica MCI	8,8	12,22	11	15

En base a los valores de potencia de la Tabla 4.17, se obtiene los momentos de inercia de los motores de Inducción y DC. Esta información se detalla en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Valores de momentos de inercia de motores DC y de inducción utilizados en el sistema del Laboratorio

MOMENTOS DE INERCIA DE MOTORES DE INDUCCIÓN Y DC			
S/E PAUTE			
Tipo de Generación	Motor Inducción J [kg-m²]	Motor DC J [kg-m²]	HP
Hidroeléctrica I	0,7901	0,29	40
Hidroeléctrica II	0,7901	0,29	40
S/E TOTORAS			
Tipo de Generación	Motor Inducción J [kg-m²]	Motor DC J [kg-m²]	HP
Hidroeléctrica	0,2705	0,11	20

S/E SANTA ROSA			
Tipo de Generación	Motor Inducción J [kg-m²]	Motor DC J [kg-m²]	HP
Hidroeléctrica	0,2229	0,09	15
Térmica a Vapor	0,1033	0,02	5
Térmica MCI	0,0740	0,016	3
S/E QUEVEDO			
Tipo de Generación	Motor Inducción J [kg-m²]	Motor DC J [kg-m²]	HP
Hidroeléctrica	0,1668	0,042	10
Térmica MCI	0,2029	0,065	12,5
S/E PASCUALES			
Tipo de Generación	Motor Inducción J [kg-m²]	Motor DC J [kg-m²]	HP
Térmica a Vapor	0,2229	0,09	15
Térmica a Gas	0,2705	0,11	20
Térmica MCI	0,2229	0,09	15

Partiendo de la ecuación 4.47 se obtiene la Tabla 4.20 en la que se obtiene la energía cinética de los motores a utilizar en el Laboratorio. Cabe resaltar que las velocidades de rotación de los grupos motor – generador se han estandarizado de la siguiente forma:

Generadores Hidroeléctricos: 1800 rpm (4 polos)

Generadores Termoeléctricos: 360 rpm (20 polos)

Esto se realiza debido a que se trata de simplificar y estandarizar el modelo, dada la amplia variedad de velocidades de rotación y por tanto de número de polos de los generadores existentes en el SNI.

Tabla 4.20 Valores de energía cinética de motores DC y de inducción utilizados en el sistema del laboratorio

ENERGÍA CINÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN Y DC		
S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Motor Inducción [kW.s]	Motor DC [kW.s]
Hydroeléctrica I	0,56	0,21
Hydroeléctrica II	0,56	0,21
S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Motor Inducción [kW.s]	Motor DC [kW.s]
Hydroeléctrica	0,19	0,08
S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Motor Inducción [kW.s]	Motor DC [kW.s]
Hydroeléctrica	0,16	0,06
Térmica a Vapor	1,84	0,36
Térmica MCI	1,31	0,28
S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Motor Inducción [kW.s]	Motor DC [kW.s]
Hydroeléctrica	0,12	0,03
Térmica MCI	3,60	1,15
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Motor Inducción [kW.s]	Motor DC [kW.s]
Térmica a Vapor	3,96	1,60
Térmica a Gas	4,81	1,95
Térmica MCI	3,96	1,60

Se puede resaltar de la Tabla 4.20 que desde el punto de vista de la inercia, es conveniente utilizar motores de inducción como máquinas motrices, para de este modo lograr una mayor energía cinética en el conjunto motor – generador y que el

volante de inercia no sea de un tamaño excesivo. Independientemente de lo anterior, la decisión final sobre el tipo de motor a utilizar recae sobre la disponibilidad y precios en el mercado.

A continuación se realiza un análisis similar para los generadores sincrónicos del sistema a escala del Laboratorio, con el fin de obtener la energía cinética que aportarán al sistema. En la Tabla 4.21 se puede observar los datos típicos de momentos de inercia de generadores sincrónicos, tomados del catálogo de la marca WEG [28]. En el caso de generadores que no superen los 10 kVA de potencia, se ha realizado una regresión cuadrática para la obtención de datos aproximados de estos generadores, dado que los mismos no se fabrican para uso comercial.

Tabla 4.21 Valores típicos de momento de inercia para generadores sincrónicos [29]

POTENCIA [kVA]	Momento de Inercia [kg-m ²]
1	0,10436
2	0,11224
3	0,12004
12,3	0,198
14,6	0,208
16,9	0,208
20,8	0,218
21,8	0,254
25,9	0,304
43,4	0,37
56,4	0,41
68,5	0,46

La curva obtenida de los datos se muestra en la Figura 4.24.

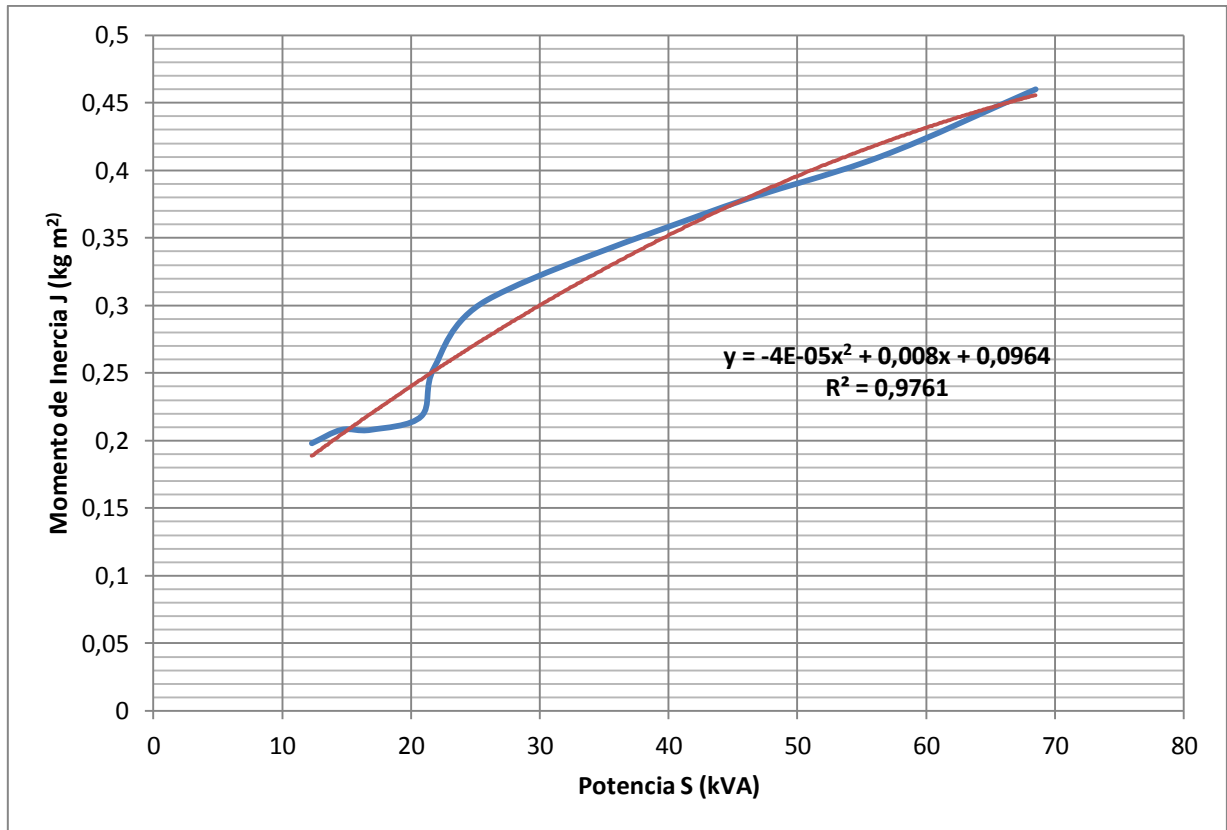


Fig 4.24 Regresión cuadrática para la obtención de valores aproximados de momento de inercia de generadores sincrónicos

En base a la Tabla 4.21 se toma los valores de momentos de inercia correspondientes a cada generador y se detallan en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Valores de momentos de inercia de generadores sincrónicos utilizados en el sistema del laboratorio

MOMENTOS DE INERCIA DE GENERADORES SINCRÓNICOS		
S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Potencia [kVA]	Momento de Inercia J [kg-m²]
Hidroeléctrica I	30	0,3004
Hidroeléctrica II	30	0,3004
S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Potencia [kVA]	Momento de Inercia J [kg-m²]
Hidroeléctrica	15	0,2074

S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Potencia [kVA]	Momento de Inercia J [kg-m²]
Hidroeléctrica	10	0,1724
Térmica a Vapor	4	0,1278
Térmica MCI	2	0,1122
S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Potencia [kVA]	Momento de Inercia J [kg-m²]
Hidroeléctrica	6	0,1429
Térmica MCI	8	0,1578
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Potencia [kVA]	Momento de Inercia J [kg-m²]
Térmica a Vapor	10	0,1724
Térmica a Gas	12	0,1867
Térmica MCI	10	0,1724

Finalmente a partir de los valores de momento de inercia obtenidos en la Tabla 4.22 se procede a calcular las energías cinéticas de los generadores sincrónicos, detalladas en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Valores de energía cinética de generadores sincrónicos utilizados en el sistema del laboratorio

ENERGÍA CINÉTICA DE GENERADORES SINCRÓNICOS	
S/E PAUTE	
Tipo de Generación	Energía Cinética [kW.s]
Hidroeléctrica I	5,34
Hidroeléctrica II	5,34
S/E TOTORAS	
Tipo de Generación	Energía Cinética [kW.s]
Hidroeléctrica	3,68

S/E SANTA ROSA	
Tipo de Generación	Energía Cinética [kW.s]
Hidroeléctrica	3,06
Térmica a Vapor	2,27
Térmica MCI	1,99
S/E QUEVEDO	
Tipo de Generación	Energía Cinética [kW.s]
Hidroeléctrica	2,54
Térmica MCI	2,80
S/E PASCUALES	
Tipo de Generación	Energía Cinética [kW.s]
Térmica a Vapor	3,06
Térmica a Gas	3,32
Térmica MCI	3,06

A continuación se reemplaza los valores de energía cinética obtenidos en las ecuaciones (4.44) y (4.46), obteniendo como resultado la energía cinética que debe almacenar el volante de inercia en el caso de cada grupo motor – generador, dichos resultados se muestran en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Valores de energía cinética de volantes de inercia correspondientes a cada grupo motor - generador

ENERGÍA CINÉTICA DE VOLANTES DE INERCIA		
S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Energía Cinética [kVA.s]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica I	59,10	59,45
Hidroeléctrica II	59,10	59,45

S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Energía Cinética [kVA.s]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	24,88	24,99
S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Energía Cinética [kVA.s]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	19,28	19,38
Térmica a Vapor	7,89	9,37
Térmica MCI	4,30	5,33
S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Energía Cinética [kVA.s]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	14,14	14,23
Térmica MCI	21,60	24,05
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Energía Cinética [kVA.s]	
	Motor Inducción	Motor DC
Térmica a Vapor	29,78	32,14
Térmica a Gas	36,27	39,13
Térmica MCI	28,18	30,54

A partir de la ecuación (4.26), se calcula el valor del momento de inercia necesario para cada grupo motor – generador, como se muestra en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Valores de momento de inercia necesarios para volantes correspondientes a cada grupo motor - generador

MOMENTO DE INERCIA PARA VOLANTES		
S/E PAUTE		
Tipo de Generación	Momento de Inercia J [kg-m²]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica I	83,17	83,66
Hidroeléctrica II	83,17	83,66

S/E TOTORAS		
Tipo de Generación	Momento de Inercia J [kg-m²]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	35,01	35,17
S/E SANTA ROSA		
Tipo de Generación	Momento de Inercia J [kg-m²]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	27,13	27,27
Térmica a Vapor	0,44	0,53
Térmica MCI	0,24	0,30
S/E QUEVEDO		
Tipo de Generación	Momento de Inercia J [kg-m²]	
	Motor Inducción	Motor DC
Hidroeléctrica	19,90	20,30
Térmica MCI	1,22	1,35
S/E PASCUALES		
Tipo de Generación	Momento de Inercia J [kg-m²]	
	Motor Inducción	Motor DC
Térmica a Vapor	1,68	1,81
Térmica a Gas	2,04	2,20
Térmica MCI	1,59	1,72

En base de la Tabla 4.25 se diseña un volante de inercia para cada grupo motor – generador, el mismo puede construirse con un momento de inercia variable o constante. Para el presente proyecto se incluye un volante de inercia constante en cada grupo de generación. Un esquema de volante de inercia variable se puede observar en la Figura 4.25.

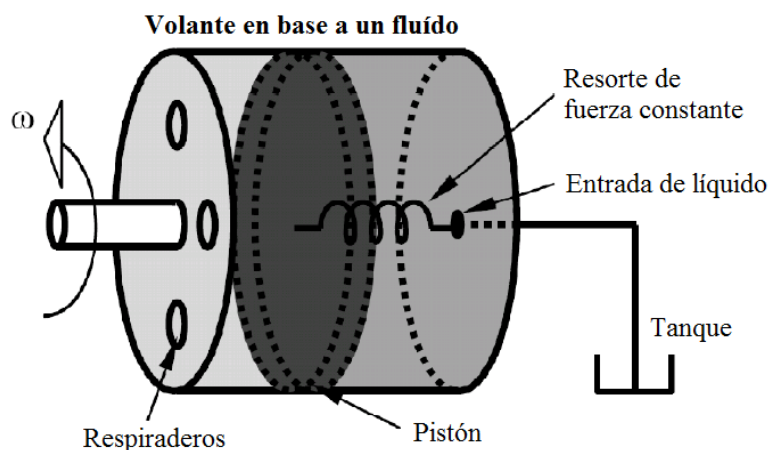


Fig 4.25 Esquema básico del volante de inercia variable

En base de la Ecuación (4.43), se obtienen las dimensiones tentativas de los volantes de inercia, los cuales se detallan en la Tabla 4.26. Las dimensiones finales dependerán de la disponibilidad de espacio y demás requerimientos físicos que presente el laboratorio para su construcción y operación.

Tabla 4.26 Dimensiones de volantes de inercia de generadores del laboratorio

Grupos de Generación	Momento de Inercia [kg-m ²]	Densidad [kg/m ³]	a [m]	b [m]	L [m]
S/E PAUTE					
Hidroeléctrica I	83,660	7800	0,05	0,35	0,453
Hidroeléctrica II	83,660	7800	0,05	0,35	0,453
S/E TOTORAS					
Hidroeléctrica	35,167	7800	0,05	0,3	0,353
S/E SANTA ROSA					
Hidroeléctrica	27,272	7800	0,05	0,3	0,274
Térmica Vapor	0,527	7800	0,05	0,25	0,009
Térmica MCI	0,300	7800	0,05	0,2	0,012
S/E QUEVEDO					
Hidroeléctrica	20,025	7800	0,05	0,35	0,108
Térmica MCI	1,354	7800	0,05	0,2	0,062
S/E PASCUALES					
Térmica Vapor	1,809	7800	0,05	0,2	0,086
Térmica Gas	2,203	7800	0,05	0,25	0,043
Térmica MCI	1,719	7800	0,05	0,2	0,081

El cálculo de los volantes se realiza tomando en cuenta como máquinas motrices a motores DC, ya que brindan mayor momento de inercia, siendo beneficioso para disminuir en lo posible el tamaño del volante de inercia. Como material para la elaboración de estos volantes se ha escogido el acero debido a su alta densidad y resistencia.

4.4 SISTEMA MOTOR- GENERADOR

El sistema utiliza motores de inducción y/o motores DC controlados por software, como máquinas motrices para simular el movimiento de las turbinas que en el sistema real transforman la energía cinética de un fluido (líquido o gaseoso) en movimiento o en energía mecánica.

El esquema conceptual para la generación en el laboratorio se muestra en la Figura 4.26. El uso de micro-procesadores para el control de las máquinas en el laboratorio resulta ventajoso debido a la capacidad del software para cambiar con facilidad los parámetros del modelo.

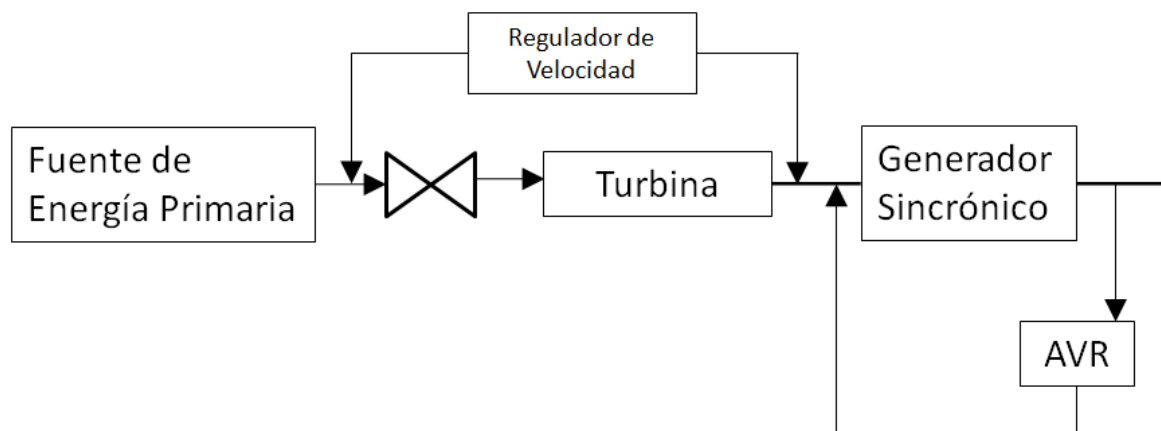


Fig 4.26 Esquema básico considerado para el control de generación

El esquema de control para la generación propuesto a continuación simula en lo posible las características de las unidades de generación hidroeléctrica y termoeléctrica.

En la Figura 4.26, la función del Regulador de Velocidad es monitorear y regular la velocidad de la máquina mediante el cálculo de un error con respecto a un valor

deseado de velocidad. El regulador usa el error calculado para abrir o cerrar la válvula de entrada de fluido hacia la turbina, corrigiendo dicho error.

La función del AVR (Automatic Voltage Regulator) es monitorear y corregir el voltaje de salida del generador sincrónico, mediante el control de su campo de excitación.

Estas funciones serán modeladas por los sistemas de las Figuras 4.28 y 4.29 para el caso de motores DC y de inducción respectivamente.

4.5 ESQUEMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se ha esquematizado para ambos casos, es decir contando como máquina motriz a un motor DC o de inducción. De modo que indiferentemente del tipo de motor implementado en el laboratorio, el sistema de control permita simular adecuadamente el comportamiento de las unidades de generación.

El diseño del sistema de control está orientado a que el operador pueda ajustar manual o remotamente los valores referenciales de frecuencia y voltaje y de esta manera controlar el funcionamiento del grupo motor – generador.

Para el caso del motor DC, la turbina puede ser simulada directamente a partir del control de su corriente de armadura que es directamente proporcional al torque e inversamente proporcional a su velocidad, como se puede observar en la Figura 4.27.

Por otro lado, el control de velocidad de un motor de inducción se realiza mediante la variación de frecuencia del voltaje de alimentación, para este caso es necesario el desarrollo de un software que permita una característica proporcional del torque de la máquina. La característica velocidad - torque para distintas frecuencias se puede observar en la Figura 4.13.

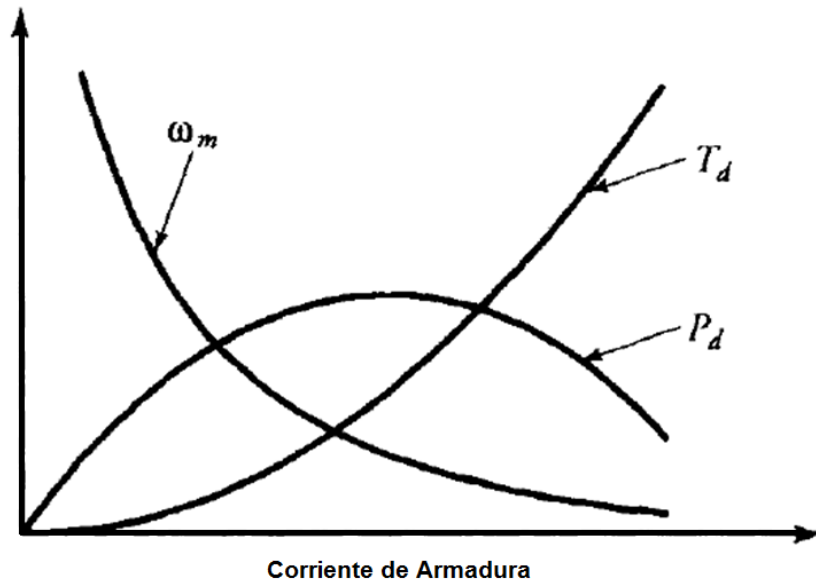


Fig 4.27 Torque, potencia y velocidad de un motor DC en función de la corriente de armadura [7]

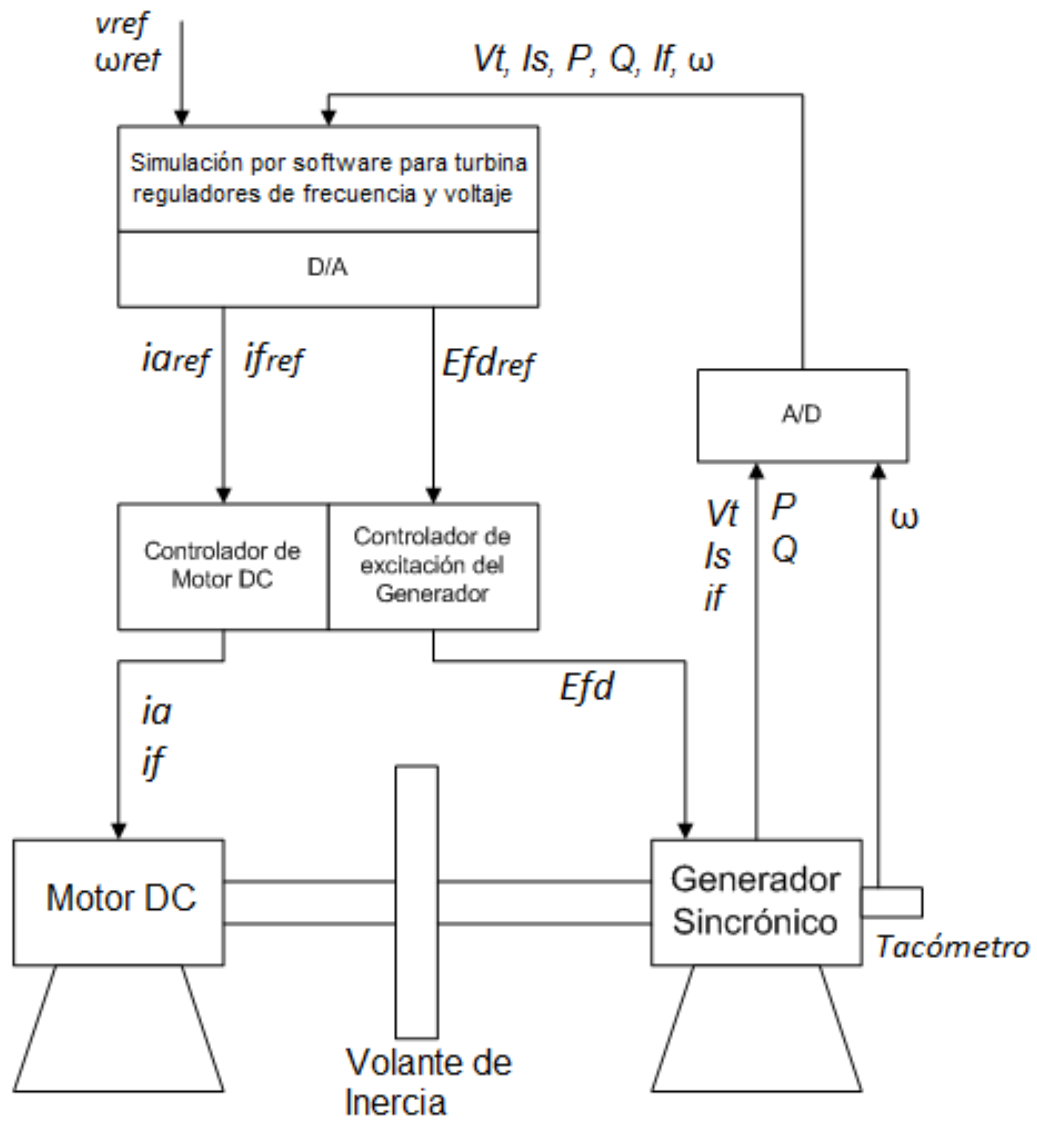


Fig 4.28 Esquema de control para el grupo motor DC – generador sincrónico

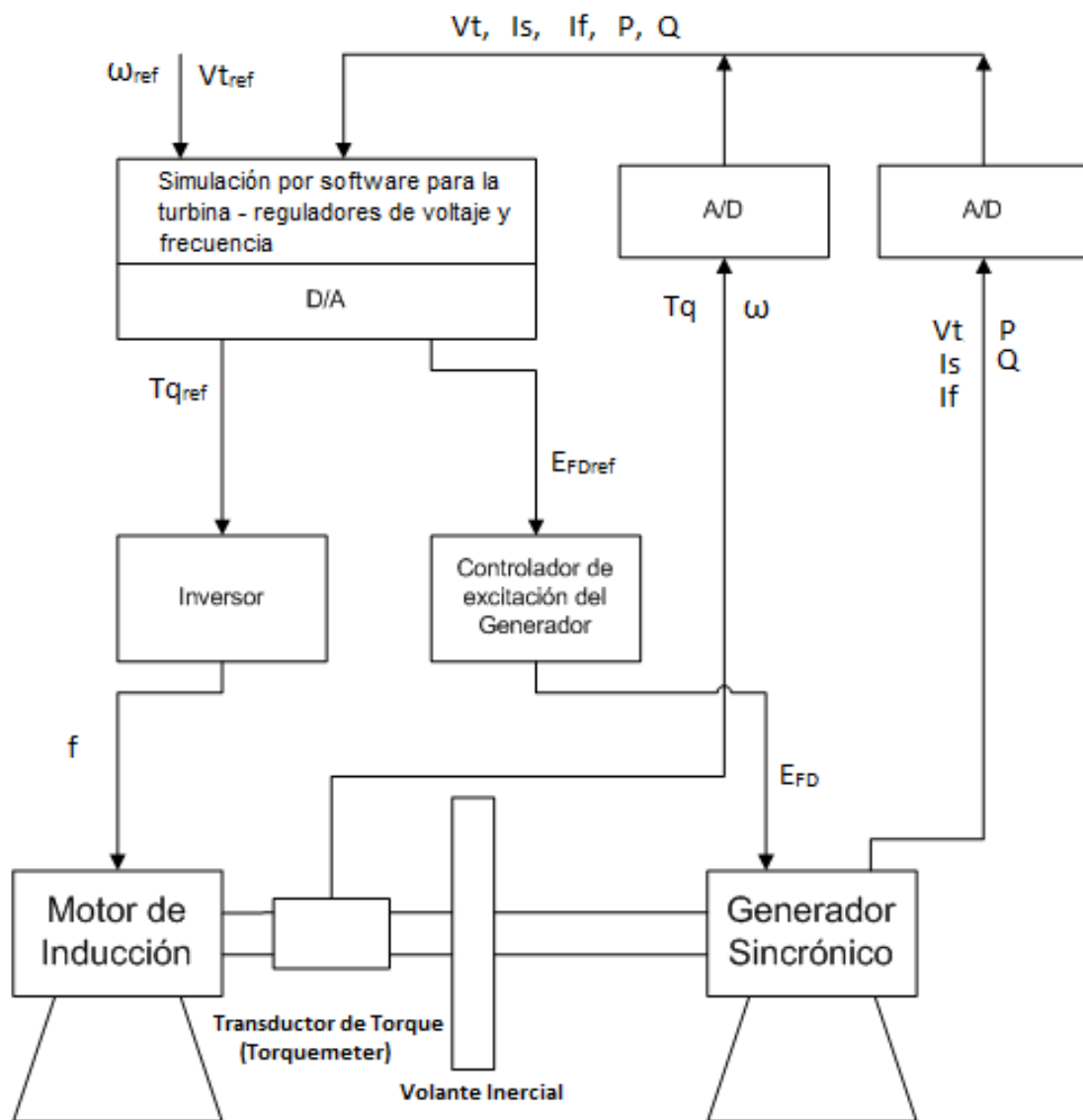


Fig 4.29 Esquema de control para el grupo motor de inducción – generador sincrónico

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se simula en *Digsilent Powerfactory*, el comportamiento del sistema de Laboratorio. Cabe señalar que para dicha simulación se han tomado algunos datos del proyecto de titulación de José Enríquez, cuyo trabajo abarca el modelamiento de las líneas de transmisión del sistema. Así mismo debido a que aún no existen resultados en el proyecto de modelación de carga, para la simulación se ha procedido a estimar valores a partir de despachos efectuados por el CENACE.

Para la simulación del sistema se han tomado los datos de carga correspondientes a demanda máxima, descritos en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Datos de carga del SNI para simulación en demanda máxima

SUBESTACION	P [MW]	Q [MVA]
PAUTE	189,82	57,93
PASCUALES	1130,68	279,58
SANTA ROSA	763,93	155,96
QUEVEDO	252,76	75,90
TOTORAS	188,14	29,10
TOTAL	2525,33	598,47

Los datos correspondientes a demanda mínima se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Datos de carga del SNI para simulación en demanda mínima

SUBESTACION	P [MW]	Q [MVA]
PAUTE	103,67	35,42
PASCUALES	662,22	164,11
SANTA ROSA	429,90	126,11
QUEVEDO	144,48	47,40
TOTORAS	96,77	29,91
TOTAL	1437,04	402,95

Para la simulación se ha realizado la reducción correspondiente de los valores de carga en las diferentes barras, mediante el factor de reducción de potencia descrito en 2.2, obteniéndose los valores de las Tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3 Datos de carga del sistema reducido del Laboratorio para simulación del SNI en demanda máxima.

SUBESTACION	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]
PAUTE	3,80	1,16	3,97
PASCUALES	22,61	5,59	23,29
SANTA ROSA	15,28	3,12	15,59
QUEVEDO	5,06	1,52	5,28
TOTORAS	3,76	0,58	3,81
TOTAL	50,51	11,97	51,91

Tabla 5.4 Datos de carga del sistema reducido del laboratorio para simulación del SNI en demanda mínima

SUBESTACION	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]
PAUTE	2,07	0,71	2,07
PASCUALES	13,24	3,28	13,24
SANTA ROSA	8,60	2,52	8,60
QUEVEDO	2,89	0,95	2,89
TOTORAS	1,94	0,60	1,94
TOTAL	28,74	8,06	28,74

Los datos de parámetros de las líneas de transmisión utilizados en la simulación se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Parámetros de líneas de transmisión para el sistema reducido del Laboratorio [30]

Línea de Transmisión	R1 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	C1 [uF/km]	B1 [uS/km]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]	C1 [uF/km]	B0 [Ω/km]
Santa Rosa -Totoras	0,051	0,463	0,010	3,598	0,248	1,384	0,006	2,292
Paute - Totoras	0,051	0,463	0,010	3,598	0,248	1,384	0,006	2,292
Paute - Pascuales								
Zona 1	0,050	0,446	0,010	3,727	0,231	1,455	0,006	2,251
Zona 2	0,051	0,463	0,010	3,598	0,248	1,384	0,006	2,292
Quevedo - Pascuales	0,050	0,446	0,010	3,727	0,231	1,455	0,006	2,251
Santa Rosa - Quevedo								
Zona 1	0,050	0,446	0,010	3,727	0,231	1,455	0,006	2,251
Zona 2	0,051	0,463	0,010	3,598	0,248	1,384	0,006	2,292

Los datos de generación tomados y reducidos al sistema del Laboratorio mediante el factor de reducción de potencia descrito en 2.2, se detallan en las Tablas 5.6 y 5.7 para demanda máxima y mínima respectivamente.

Tabla 5.6 Despacho de generación para el sistema reducido del Laboratorio en demanda máxima

Subestaciones	Grupo	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]
Quevedo	Hidro	2,66	2,11	3,40
	MCI	0,11	0,00	0,11
Paute	Hidro 1	10,80	2,86	11,17
	Hidro 2	10,80	2,86	11,17
Totoras	Hidro	4,95	1,38	5,14
Santa Rosa	Hidro	1,00	0,27	1,04
	Vapor	0,68	0,45	0,81
	MCI	0,54	0,15	0,56
Pascuales	Vapor	5,89	1,98	6,21
	Gas	6,68	0,89	6,74
	MCI	1,57	0,84	1,78
TOTAL		45,68	13,80	47,72

Tabla 5.7 Despacho de generación para el sistema reducido del laboratorio en demanda mínima

Subestaciones	Grupo	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]
Quevedo	Hidro	1,06	0,08	1,06
	MCI	0,08	0,00	0,08
Paute	Hidro 1	10,25	1,63	10,38
	Hidro 2	10,25	1,63	10,38
Totoras	Hidro	3,69	0,22	3,70
Santa Rosa	Hidro	0,75	0,22	0,78
	Vapor	0,00	-0,08	0,08
	MCI	0,25	0,02	0,25
Pascuales	Vapor	2,15	0,96	2,36
	Gas	0,00	0,35	0,35
	MCI	0,07	0,02	0,07
TOTAL		28,54	0,00	28,54

Se ha procedido a simular el sistema en *Digsilent Powerfactory*, obteniéndose el diagrama unifilar de la Figura 5.1. El diagrama unifilar del SNI completo se encuentra incluido en el Anexo 6.

La finalidad de la simulación es dar un ejemplo del tipo de estudios que se pueden llevar a cabo en el sistema reducido del Laboratorio. Se efectúan a continuación estudios de flujos de potencia, cortocircuitos y estabilidad transitoria.

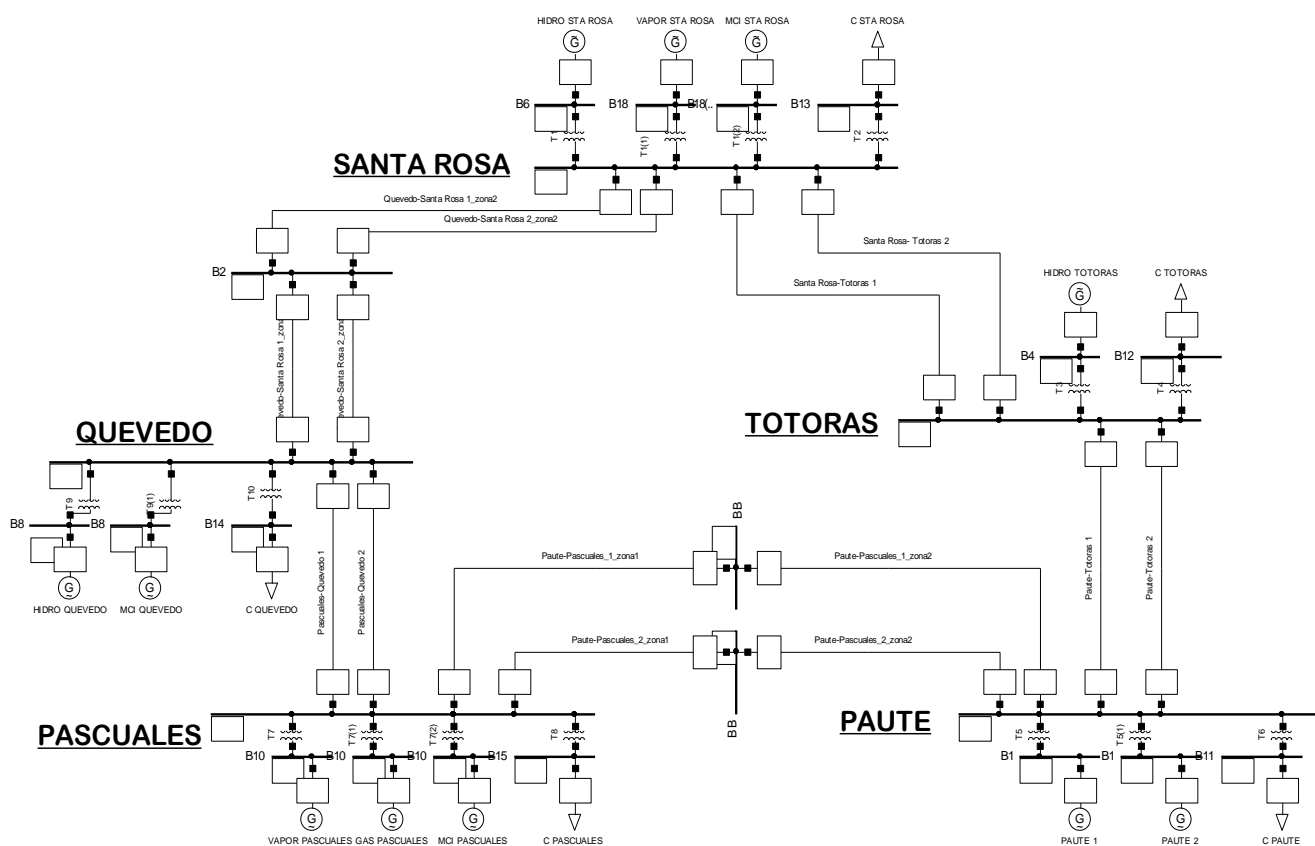


Figura 5.1 Sistema de Laboratorio simulado en *Digsilent Powerfactory*

5.2 ESTUDIOS ELÉCTRICOS A REALIZARSE EN EL SISTEMA DEL LABORATORIO

5.2.1 ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA

Se realiza la simulación de flujos de potencia para demandas máxima y mínima mediante el programa *Digsilent Powerfactory*. Para ambos casos de estudio, se obtienen resultados de voltajes de barra (Tabla 5.8 y Tabla 5.11), potencia en generadores (Tabla 5.9 y Tabla 5.12), y voltajes y cargabilidad en las líneas de transmisión (Tabla 5.10 y Tabla 5.13).

Resultados para Demanda Máxima:

Tabla 5.8 Voltajes de barra del SNI reducido en demanda máxima, obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

BARRA	V [p.u]	θ [deg]
PASCUALES	0,970	-24,29
PAUTE	0,993	-4,115
QUEVEDO	0,981	-35,73

SANTA ROSA	0,968	-44,77
TOTORAS	0,997	-30,03

Tabla 5.9 Potencia en generadores del SNI reducido en demanda máxima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

CENTRAL	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]	Carga [%]
Paute 1	17,81	2,27	17,95	59,84
Paute 2	11,20	1,89	11,36	37,86
Totoras	4,59	4,10	6,15	41,02
Sta Rosa Hidroeléctrica	0,90	2,63	2,78	27,81
Sta Rosa Vapor	0,72	1,06	1,28	32,01
Sta Rosa MCI	0,54	0,53	0,76	37,98
Quevedo Hidroeléctrica	3,06	1,07	3,24	54,00
Quevedo MCI	0,09	1,29	1,30	16,21
Pascuales Gas	6,03	3,15	6,80	56,68
Pascuales MCI	1,62	2,48	2,96	29,64
Pascuales Vapor	5,58	2,66	6,18	61,81

Tabla 5.10 Voltaje y cargabilidad en las líneas de transmisión del SNI reducido en demanda máxima, datos de la simulación en *Digsilent Powerfactory*

LÍNEA	Vi [p.u]	Vj [p.u]	Carga [%]
Pascuales-Quevedo	0,970	0,981	0,174
Paute-Pascuales_1_zona1	0,975	0,970	0,229
Paute-Pascuales_1_zona2	0,993	0,975	0,229
Paute-Pascuales_2_zona1	0,975	0,970	0,229
Paute-Pascuales_2_zona2	0,993	0,975	0,229
Paute-Totoras	0,997	0,993	0,275
Quevedo-Santa Rosa_zona1	0,981	0,977	0,110
Quevedo-Santa Rosa_zona2	0,977	0,968	0,108
Santa Rosa-Totoras	0,968	0,997	0,284

Resultados para Demanda Mínima:

Tabla 5.11 Voltajes de barra del SNI reducido en demanda mínima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

BARRA	V [p.u]	θ [deg]
PASCUALES	0,985	-19,896
PAUTE	0,999	-2,540
QUEVEDO	0,994	-25,296
SANTA ROSA	0,983	-27,480
TOTORAS	0,999	-17,386

Tabla 5.12 Potencia en generadores del SNI reducido en demanda mínima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

CENTRAL	P [kW]	Q [kVA]	S [kVA]	Carga [%]
Paute 1	11,07	0,47	11,08	36,93
Paute 2	10,40	0,44	10,41	34,70
Totoras	3,33	1,29	3,57	23,80
Sta Rosa Hidroeléctrica	0,72	1,38	1,56	15,60
Sta Rosa Vapor	0,09	0,55	0,56	13,99
Sta Rosa MCI	0,18	0,28	0,33	16,52
Quevedo Hidroeléctrica	0,99	0,29	1,03	17,21
Quevedo MCI	0,09	0,38	0,39	4,86
Pascuales Gas	0,36	1,53	1,57	13,11
Pascuales MCI	0,09	1,28	1,28	12,79
Pascuales Vapor	2,16	1,30	2,52	25,23

Tabla 5.13 Voltaje y cargabilidad en las líneas de transmisión del SNI reducido en demanda mínima, datos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

LÍNEA	V_i [p.u]	V_j [p.u]	Carga [%]
Pascuales-Quevedo	0,985	0,994	0,087
Paute-Pascuales_1_zona1	0,989	0,985	0,199
Paute-Pascuales_1_zona2	0,999	0,989	0,200

Paute-Pascuales_2_zona1	0,989	0,985	0,199
Paute-Pascuales_2_zona2	0,999	0,989	0,200
Paute-Totoras	0,999	0,999	0,161
Quevedo-Santa Rosa_zona1	0,994	0,995	0,031
Quevedo-Santa Rosa_zona2	0,995	0,983	0,036
Santa Rosa-Totoras	0,983	0,999	0,197

5.2.2 ESTUDIO DE FALLAS DE CORTOCIRCUITOS

Se realiza la simulación de fallas de cortocircuitos para demandas máxima y mínima mediante el programa *Digsilent Powerfactory*, Para ambos casos de estudio se obtienen resultados de corrientes y potencias de corto circuito para fallas trifásicas (Tabla 5.14 y Tabla 5.16) y para fallas monofásicas (Tabla 5.15 y Tabla 5.17).

Resultados para Demanda Máxima:

Fallas Trifásicas:

Tabla 5.14 Corrientes y potencias de corto circuito en falla trifásica para el SNI reducido en demanda máxima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

Barra Fallada		S _k "	I _k "		I _p
		[MVA]	[kA]	[deg]	[kA]
Paute	Paute	0,29	0,17	-87.40	0,41
	Paute - Pascuales 1	0,02	0,01	95.06	0,03
	Paute - Pascuales 2	0,02	0,01	95.06	0,03
	Paute - Totoras	0,02	0,01	95.71	0,03
Pascuales	Pascuales	0,19	0,11	-87,76	0,27
	Pascuales - Quevedo	0,02	0,01	95,17	0,03
	Paute - Pascuales 1	0,02	0,01	95,66	0,03
	Paute - Pascuales 2	0,02	0,01	95,66	0,03
Quevedo	Quevedo	0,1	0,06	-86.77	0,14
	Quevedo - Santa Rosa	0,02	0,01	95.54	0,03
	Pascuales - Quevedo	0,03	0,02	95.68	0,04
Santa Rosa	Santa Rosa	0,11	0,06	-86.73	0,15
	Quevedo - Santa Rosa	0,02	0,01	95.44	0,03
	Santa Rosa - Totoras	0,03	0,02	95,48	0,04
Totoras	Totoras	0,14	0,08	-86.19	0,19
	Paute - Totoras	0,02	0,01	95.91	0,03
	Santa Rosa - Totoras	0,03	0,02	94.92	0,04

Fallas Monofásicas:

Tabla 5.15 Corrientes y potencias de corto circuito en falla monofásica para el SNI reducido en demanda máxima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent*

Powerfactory

Barra Fallada		Fase	Sk"	Ik"		Ip
			[MVA]	[kA]	[deg]	[kA]
Paute	Paute	A	0,12	0,2	-88,49	0,5
		B	0	0	0	0
		C	0	0	0	0
	Paute - Pascuales 1	A	0,01	0,02	95,21	0,02
		B	0	0	-86,59	0,01
		C	0	0	-86,67	0,01
	Paute - Pascuales 2	A	0,01	0,02	95,21	0,02
		B	0	0	-86,59	0,01
		C	0	0	-86,67	0,01
	Paute - Totoras	A	0,01	0,01	95,74	0,02
		B	0	0	-86,1	0,01
		C	0	0	-86,11	0,01
Pascuales	Pascuales	A	0,07	0,13	-88,3	0,32
		B	0	0	0	0
		C	0	0	0	0
	Pascuales - Quevedo	A	0,01	0,01	95,23	0,03
		B	0	0	-86,67	0,01
		C	0	0	-86,64	0,01
	Paute - Pascuales 1	A	0,01	0,01	95,71	0,02
		B	0	0	-86,11	0,01
		C	0	0	-86,07	0,01
	Paute - Pascuales 2	A	0,01	0,01	95,71	0,02
		B	0	0	-86,11	0,01
		C	0	0	-86,07	0,01
Quevedo	Quevedo	A	0,04	0,07	-87,59	0,16
		B	0	0	0	0
		C	0	0	0	0
	Quevedo - Santa Rosa	A	0,01	0,01	95,59	0,02
		B	0	0	-86,97	0,01
		C	0	0	-86,97	0,01
	Pascuales - Quevedo	A	0,01	0,01	95,7	0,03
		B	0	0	-86,34	0,01
		C	0	0	-86,35	0,01
Santa Rosa	Santa Rosa	A	0,04	0,07	-87,64	0,18
		B	0	0	0	0
		C	0	0	0	0

	Quevedo - Santa Rosa	A	0,01	0,01	95,55	0,02
		B	0	0	-86,74	0,01
		C	0	0	-86,79	0,01
	Santa Rosa - Totoras	A	0,01	0,01	95,48	0,04
		B	0	0	-87,47	0,01
		C	0	0	-87,42	0,01
Totoras	Totoras	A	0,05	0,09	-87,64	0,22
		B	0	0	0	0
		C	0	0	0	0
	Paute - Totoras	A	0,01	0,01	95,98	0,02
		B	0	0	-86,05	0,01
		C	0	0	-86,17	0,01
	Santa Rosa - Totoras	A	0,01	0,01	95,05	0,03
		B	0	0	-87,9	0,01
		C	0	0	-88,03	0,01

Resultados para Demanda Mínima:

Fallas Trifásicas:

Tabla 5.16 Corrientes y potencias de corto circuito en falla trifásica para el SNI reducido en demanda mínima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent Powerfactory*

Barra Fallada		Sk"	Ik"		Ip
		[MVA]	[kA]	[deg]	[kA]
Paute	Paute	0,29	0,17	-87,4	0,41
	Paute - Pascuales 1	0,02	0,01	95,06	0,03
	Paute - Pascuales 2	0,2	0,01	95,06	0,03
	Paute - Totoras	0,2	0,01	95,71	0,03
Pascuales	Pascuales	0,19	0,11	-87,76	0,27
	Pascuales - Quevedo	0,02	0,01	95,17	0,03
	Paute - Pascuales 1	0,02	0,01	95,66	0,03
	Paute - Pascuales 2	0,02	0,01	95,66	0,03
Quevedo	Quevedo	0,1	0,06	-86,77	0,14
	Quevedo - Santa Rosa	0,02	0,01	95,54	0,03
	Pascuales - Quevedo	0,03	0,02	95,68	0,04
Santa Rosa	Santa Rosa	0,11	0,06	-86,73	0,16
	Quevedo - Santa Rosa	0,02	0,01	95,44	0,03
	Santa Rosa - Totoras	0,03	0,02	95,48	0,04
Totoras	Totoras	0,14	0,08	-86,19	0,19
	Paute - Totoras	0,02	0,01	95,91	0,03
	Santa Rosa - Totoras	0,03	0,02	94,92	0,04

Fallas Monofásicas:

Tabla 5.17 Corrientes y potencias de corto circuito en falla monofásica para el SNI reducido en demanda mínima, datos obtenidos de simulación en *Digsilent*

Powerfactory

Barra Fallada		Fase	Sk"	Ik"		Ip
			[MVA]	[kA]	[deg]	[kA]
Paute	Paute	A	0,12	0,20	-88,49	0,50
		B	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	0,00	0,00	0,00	0,00
	Paute - Pascuales 1	A	0,01	0,01	95,21	0,02
		B	0,00	0,00	-86,59	0,01
		C	0,00	0,00	-86,67	0,01
	Paute - Pascuales 2	A	0,01	0,01	95,21	0,02
		B	0,00	0,00	-86,59	0,01
		C	0,00	0,00	-86,67	0,01
	Paute - Totoras	A	0,01	0,01	95,74	0,02
		B	0,00	0,00	-86,10	0,01
		C	0,00	0,00	-86,11	0,01
Pascuales	Pascuales	A	0,07	0,13	-88,30	0,32
		B	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pascuales - Quevedo	A	0,01	0,01	95,23	0,03
		B	0,00	0,00	-86,67	0,01
		C	0,00	0,00	-86,64	0,01
	Paute - Pascuales 1	A	0,01	0,01	95,71	0,02
		B	0,00	0,00	-86,11	0,01
		C	0,00	0,00	-86,07	0,01
	Paute - Pascuales 2	A	0,01	0,01	95,71	0,02
		B	0,00	0,00	-86,11	0,01
		C	0,00	0,00	-86,07	0,01
Quevedo	Quevedo	A	0,04	0,07	-87,59	0,16
		B	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	0,00	0,00	0,00	0,00
	Quevedo - Santa Rosa	A	0,01	0,01	95,59	0,02
		B	0,00	0,00	-86,97	0,01
		C	0,00	0,00	-86,94	0,01
	Pascuales - Quevedo	A	0,01	0,01	95,70	0,03
		B	0,00	0,00	-86,34	0,01
		C	0,00	0,00	-86,35	0,01
Santa Rosa	Santa Rosa	A	0,04	0,07	-87,64	0,18
		B	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	0,00	0,00	0,00	0,00

	Quevedo - Santa Rosa	A	0,01	0,01	95,55	0,02
		B	0,00	0,00	-86,74	0,01
		C	0,00	0,00	-86,79	0,01
	Santa Rosa - Totoras	A	0,01	0,01	95,48	0,04
		B	0,00	0,00	-87,47	0,01
		C	0,00	0,00	-87,42	0,01
Totoras	Totoras	A	0,05	0,09	-87,64	0,22
		B	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	0,00	0,00	0,00	0,00
	Paute - Totoras	A	0,01	0,01	95,98	0,02
		B	0,00	0,00	-86,05	0,01
		C	0,00	0,00	-86,17	0,01
	Santa Rosa - Totoras	A	0,01	0,01	95,05	0,03
		B	0,00	0,00	-87,90	0,01
		C	0,00	0,00	-88,03	0,01

5.2.3 ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

Se efectúan los estudios de caso en demanda máxima mediante el programa *Digsilent Powerfactory*, para cada una de las siguientes contingencias:

- Salida de Generación:
 - Generador Hidroeléctrico Paute 1-1
- Salida de Carga:
 - Carga Barra Pascuales
- Fallas en Líneas:
 - Santa Rosa – Totoras: 1 circuito

En las siguientes Figuras (5.2 – 5.28), se muestra el comportamiento del sistema cuando ocurren las 3 contingencias mencionadas anteriormente. Se puede observar casos de inestabilidad del sistema, como el de la Figura 5.13, el cual representa un caso de análisis para el investigador dentro del Laboratorio. Para el mismo se deberán tomar medidas que conduzcan a lograr estabilidad en el sistema, puede ser mediante la calibración del regulador de velocidad o coordinación de protecciones.

Salida de Generación - Generador Hidroeléctrico Paute 1-1

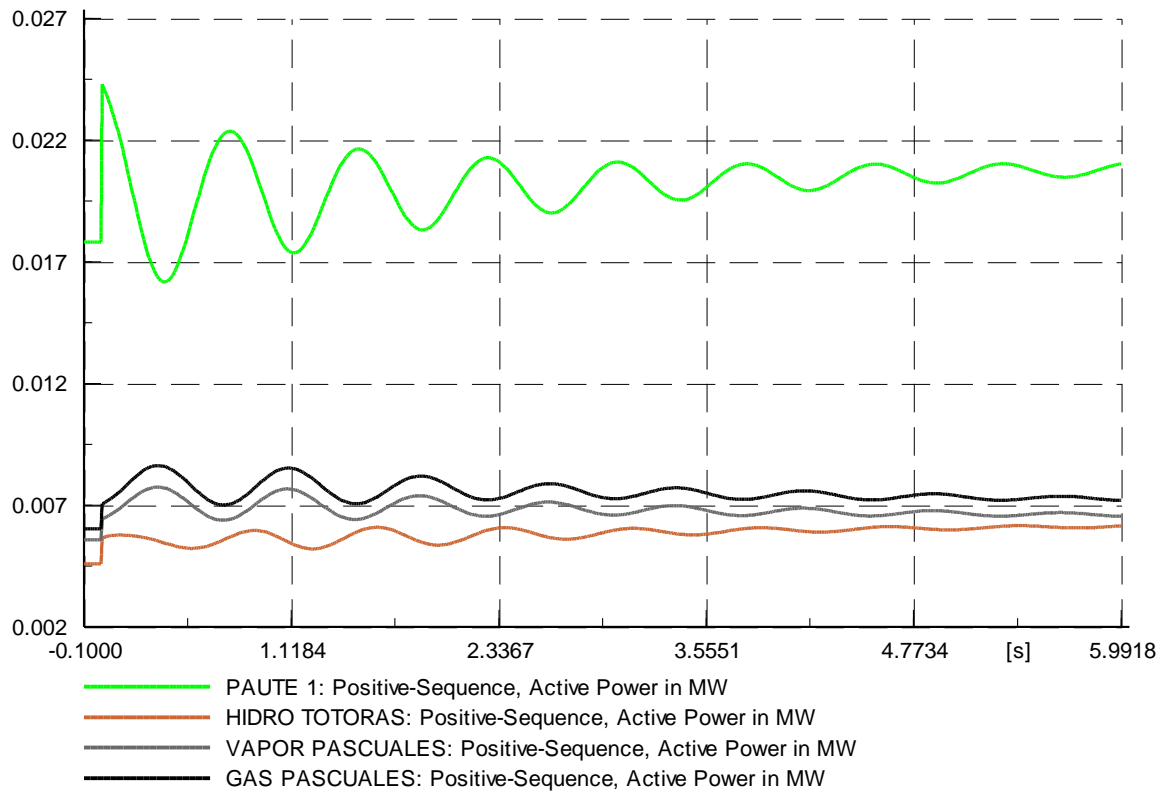


Figura 5.2 Potencia activa de generadores – caso salida de generación

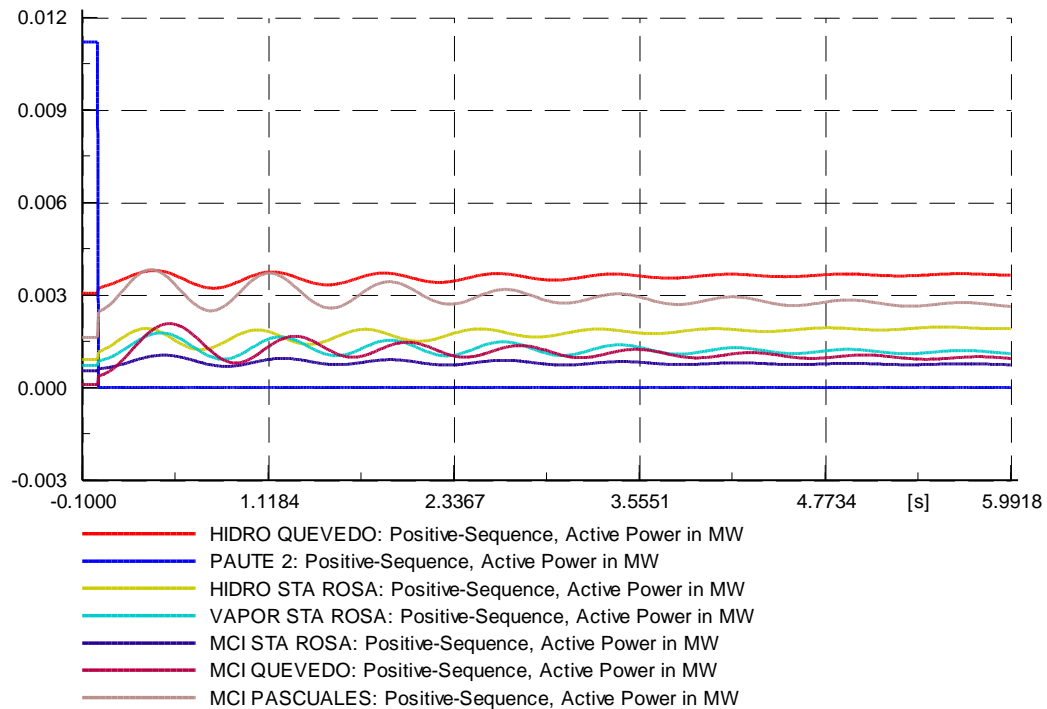


Figura 5.3 Potencia activa de generadores – caso salida de generación

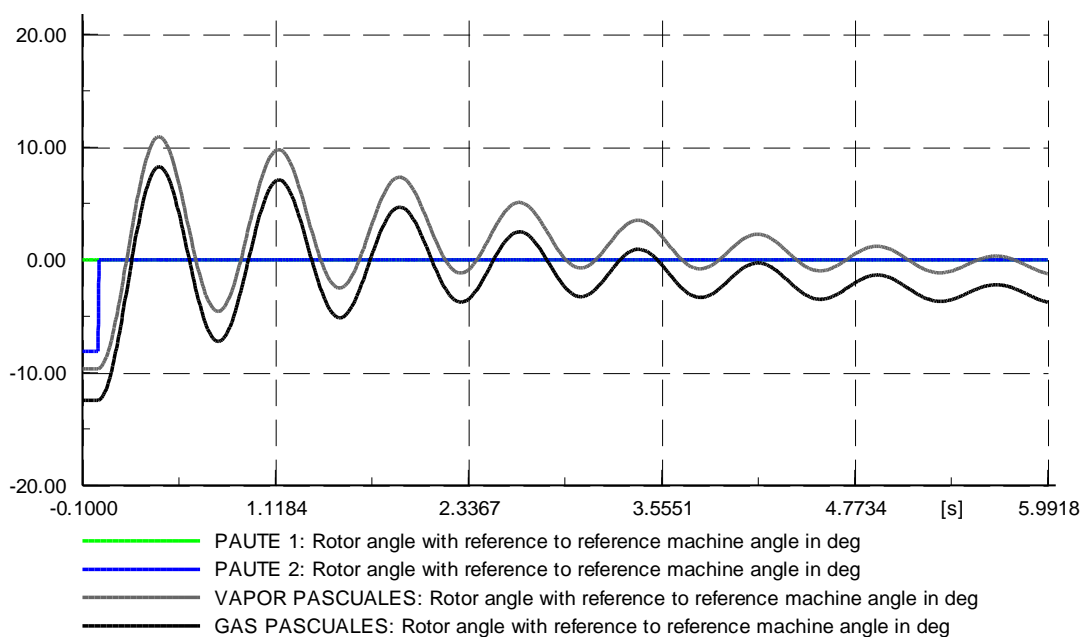


Figura 5.4 Ángulo de rotor en generadores – caso salida de generación

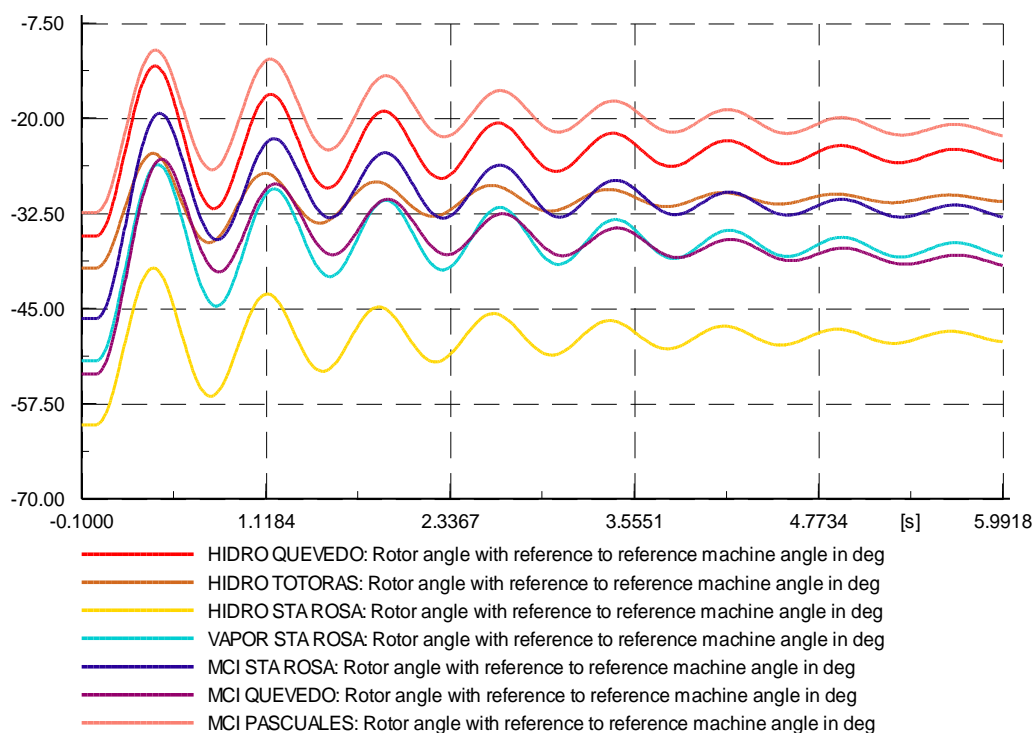


Figura 5.5 Ángulo de rotor en generadores – caso salida de generación

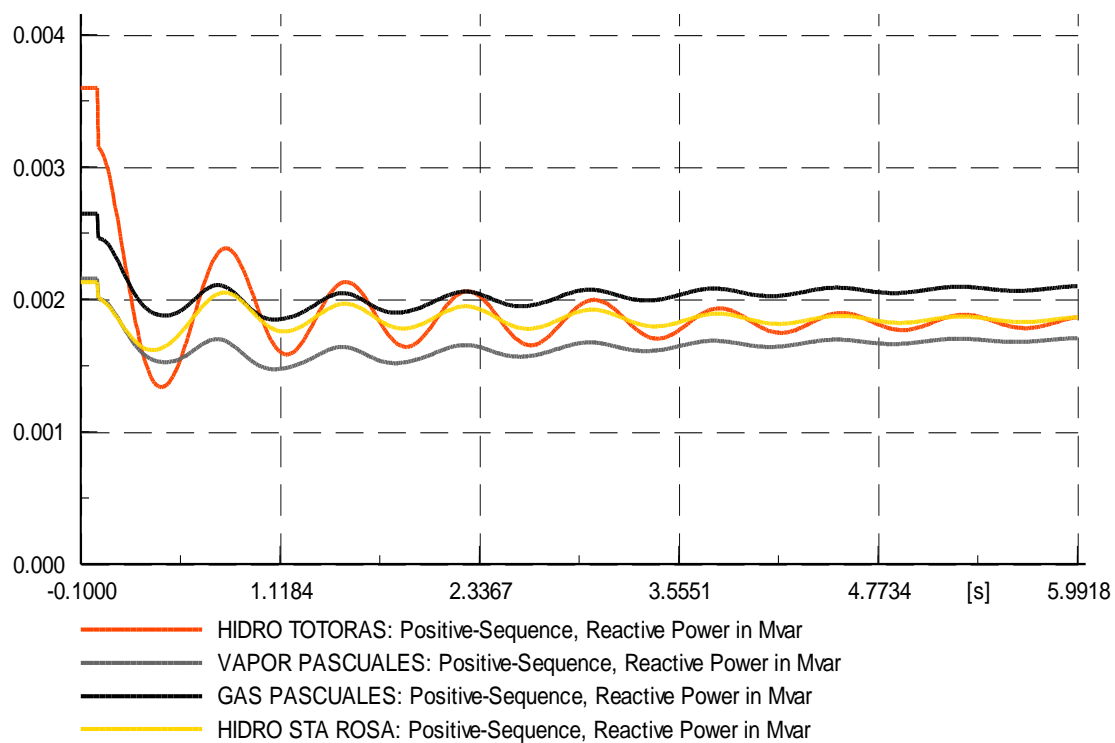


Figura 5.6 Potencia reactiva de generadores – caso salida de generación

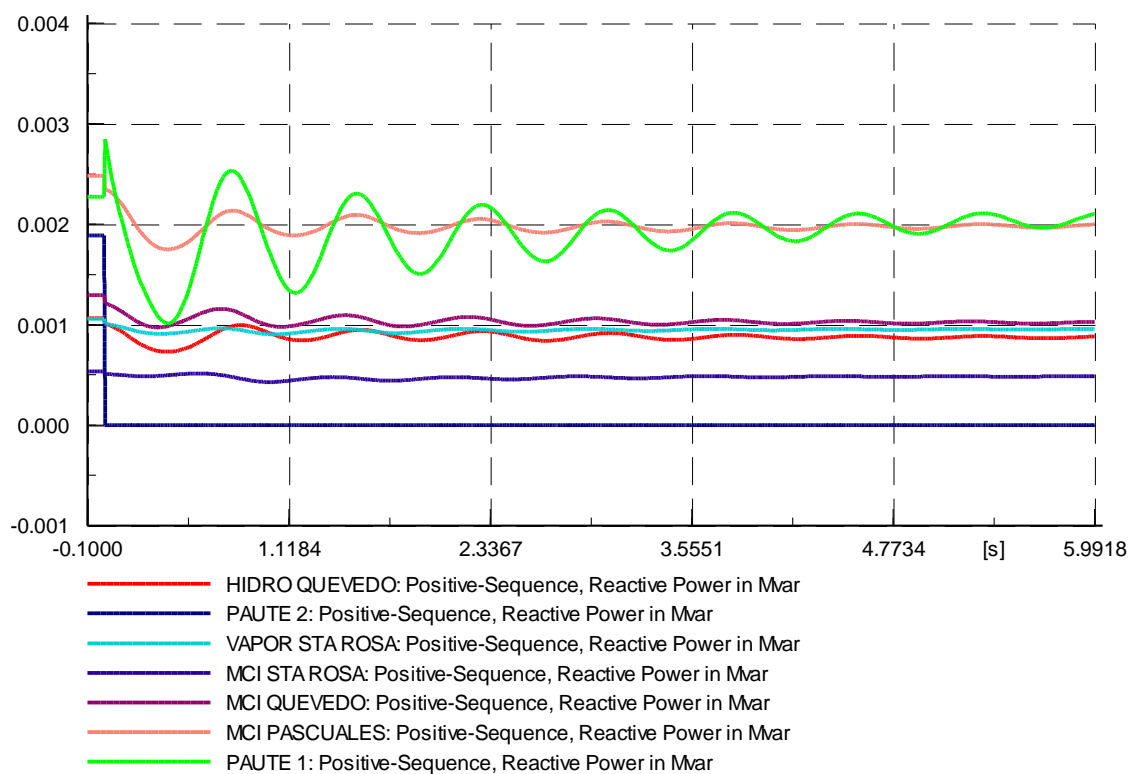


Figura 5.7 Potencia reactiva de generadores – caso salida de generación

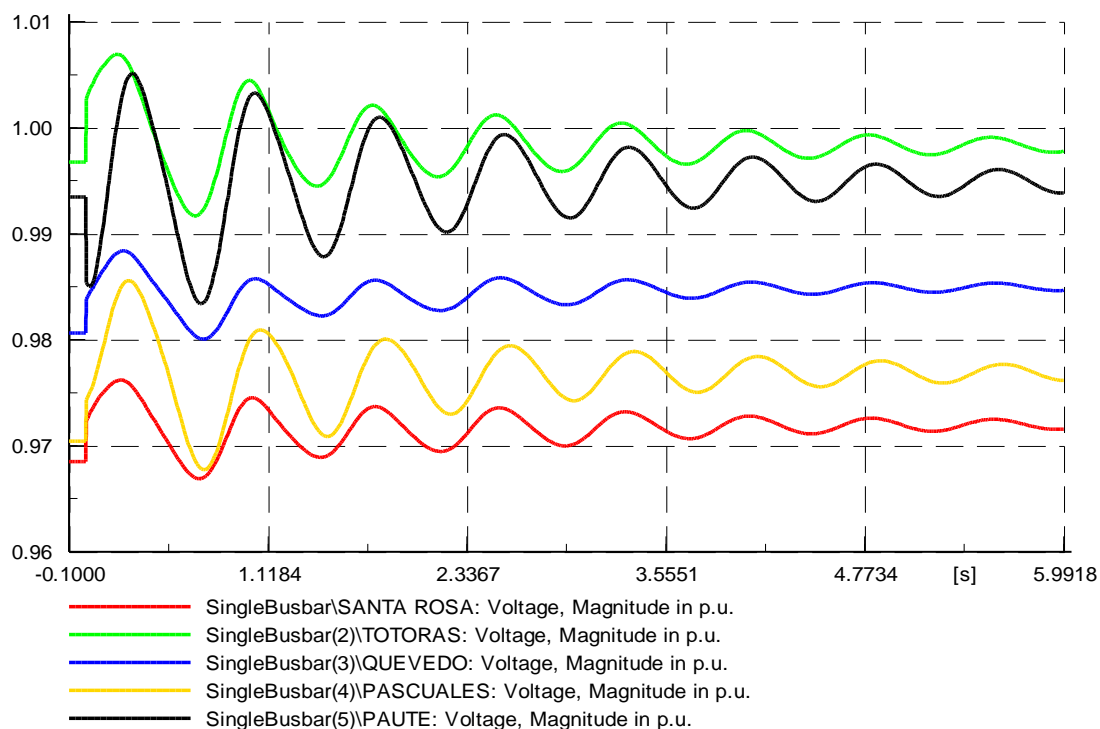


Figura 5.8 Voltaje en barras – caso salida de generación

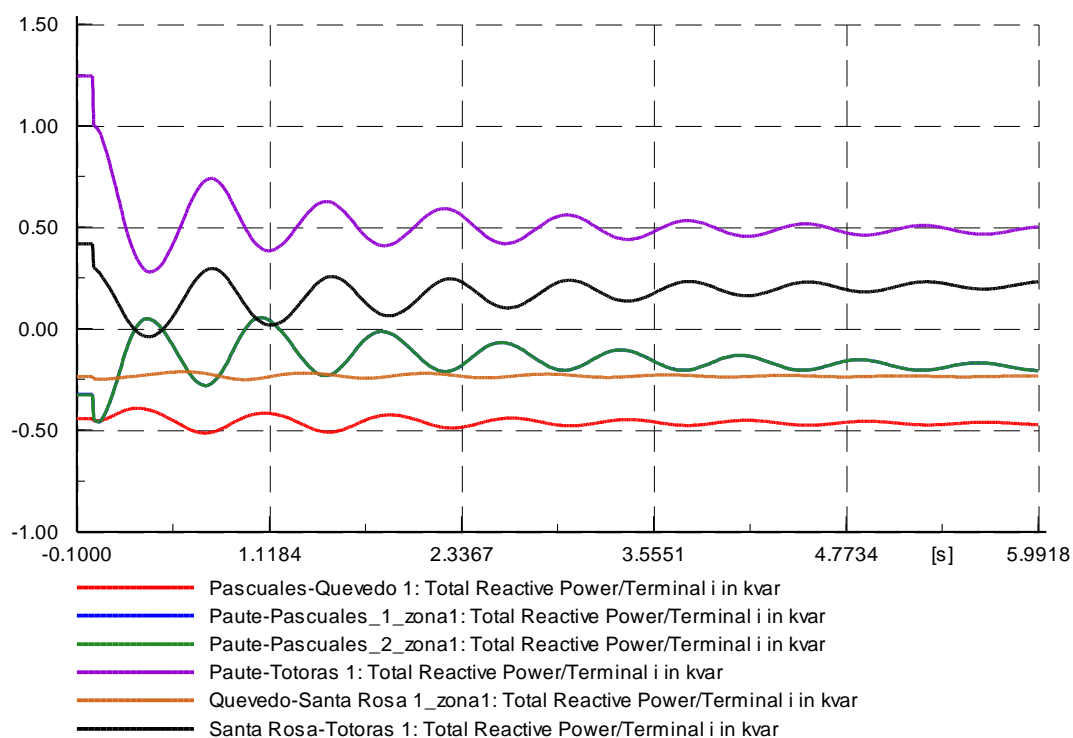


Figura 5.9 Potencia reactiva en líneas de transmisión – caso salida de generación

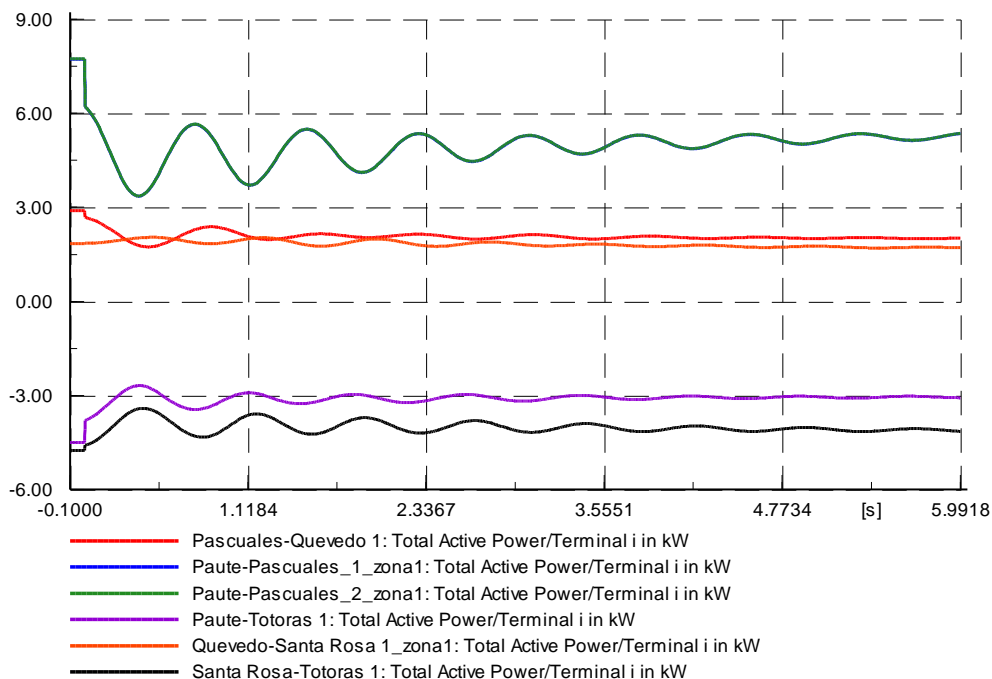


Figura 5.10 Potencia activa en líneas de transmisión – caso salida de generación

Salida de Carga - Carga de la barra Pascuales

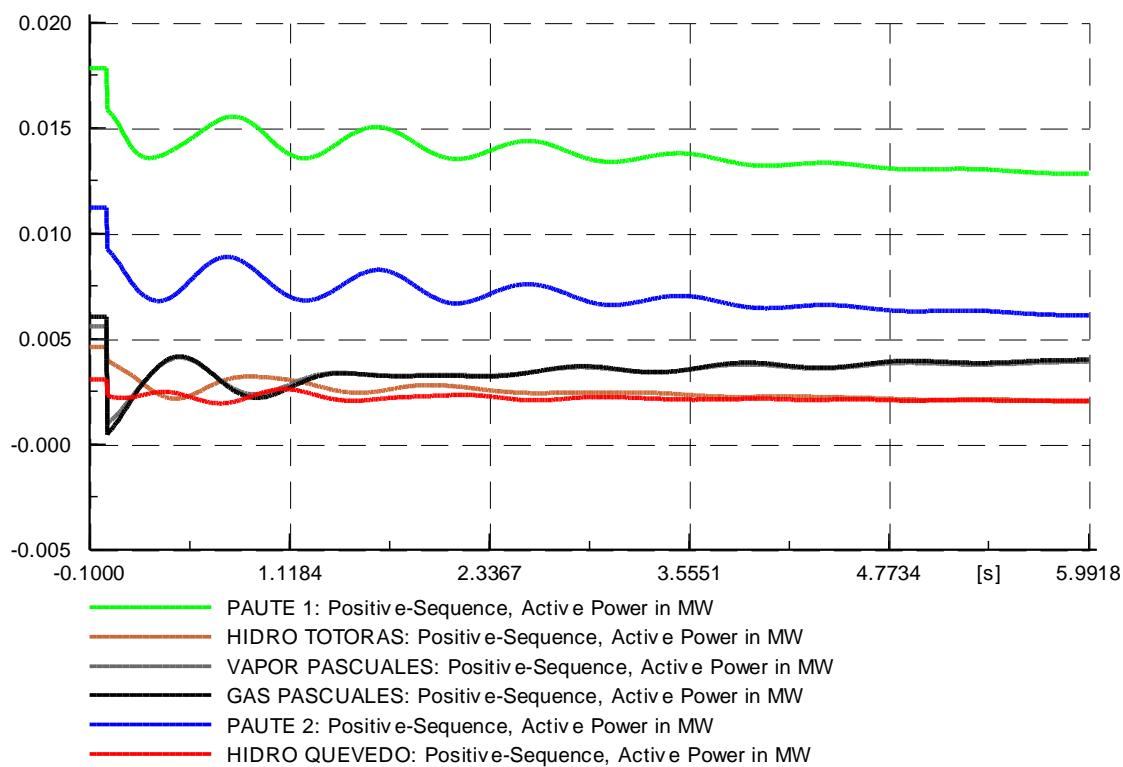


Figura 5.11 Potencia activa de generadores – caso salida de carga

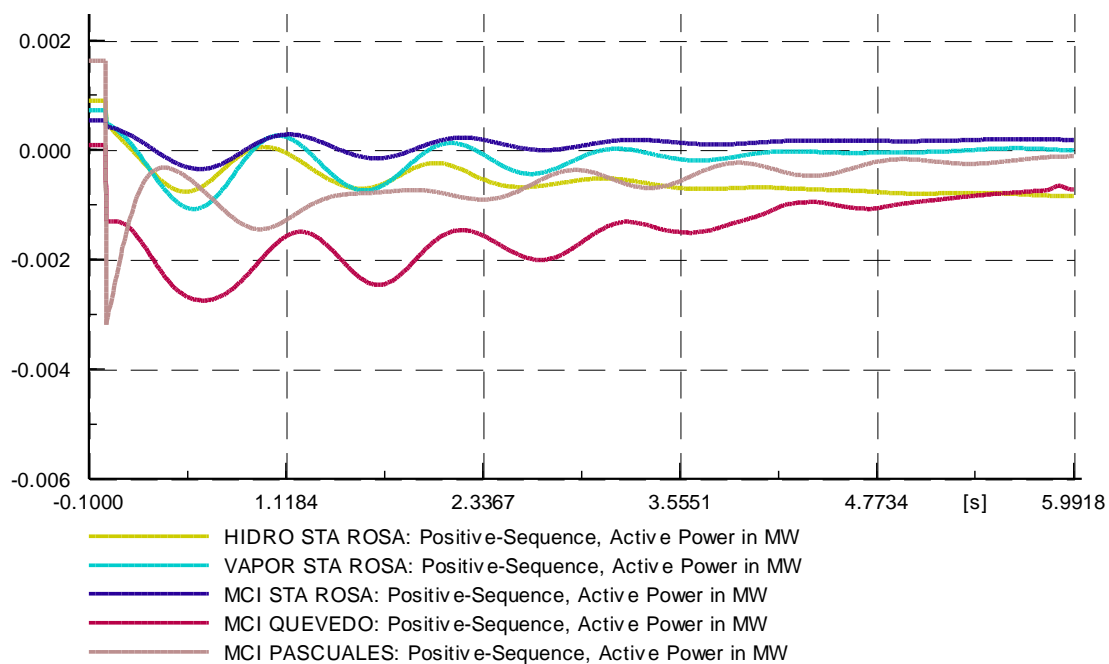


Figura 5.12 Potencia activa de generadores – caso salida de carga

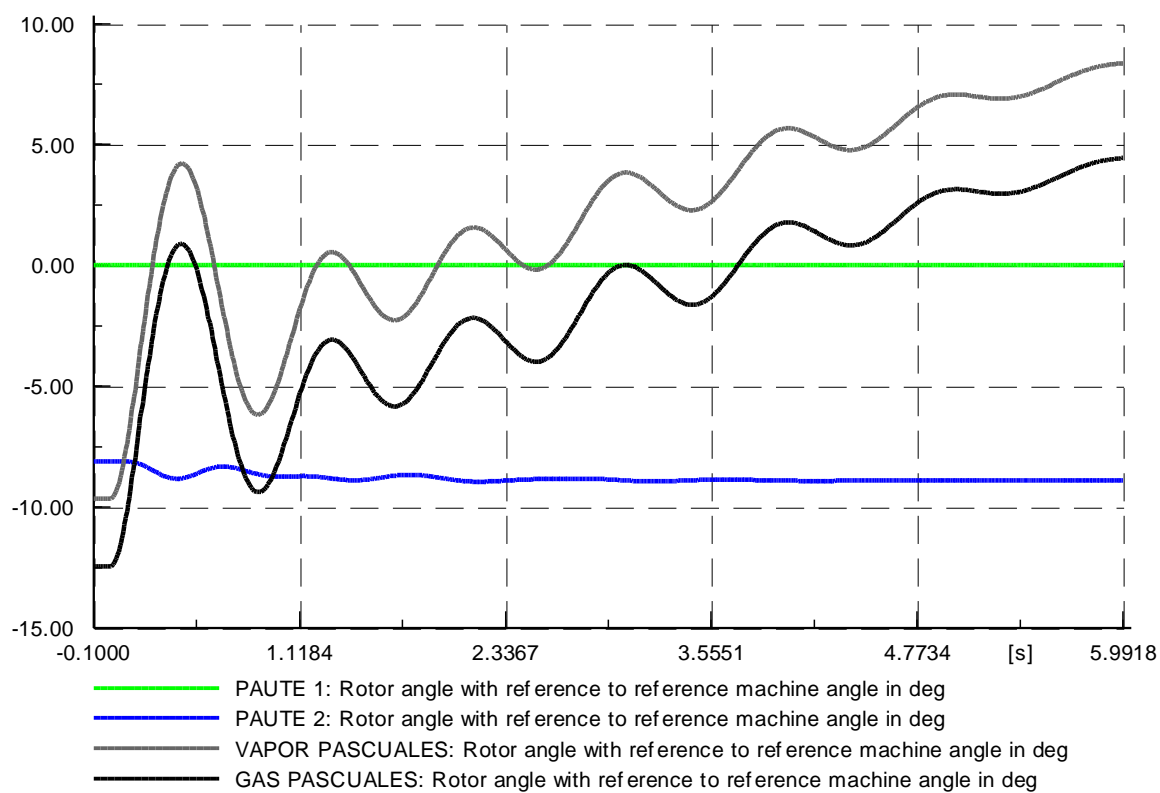


Figura 5.13 Ángulo de rotor en generadores – caso salida de carga

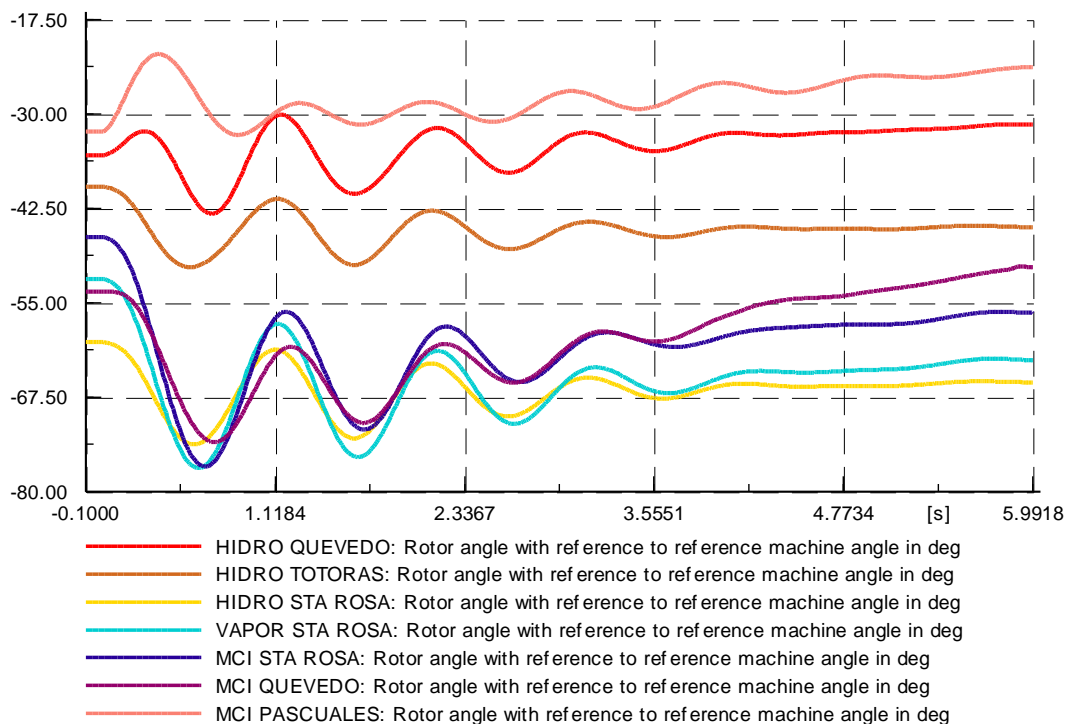


Figura 5.14 Ángulo de rotor en generadores – caso salida de carga

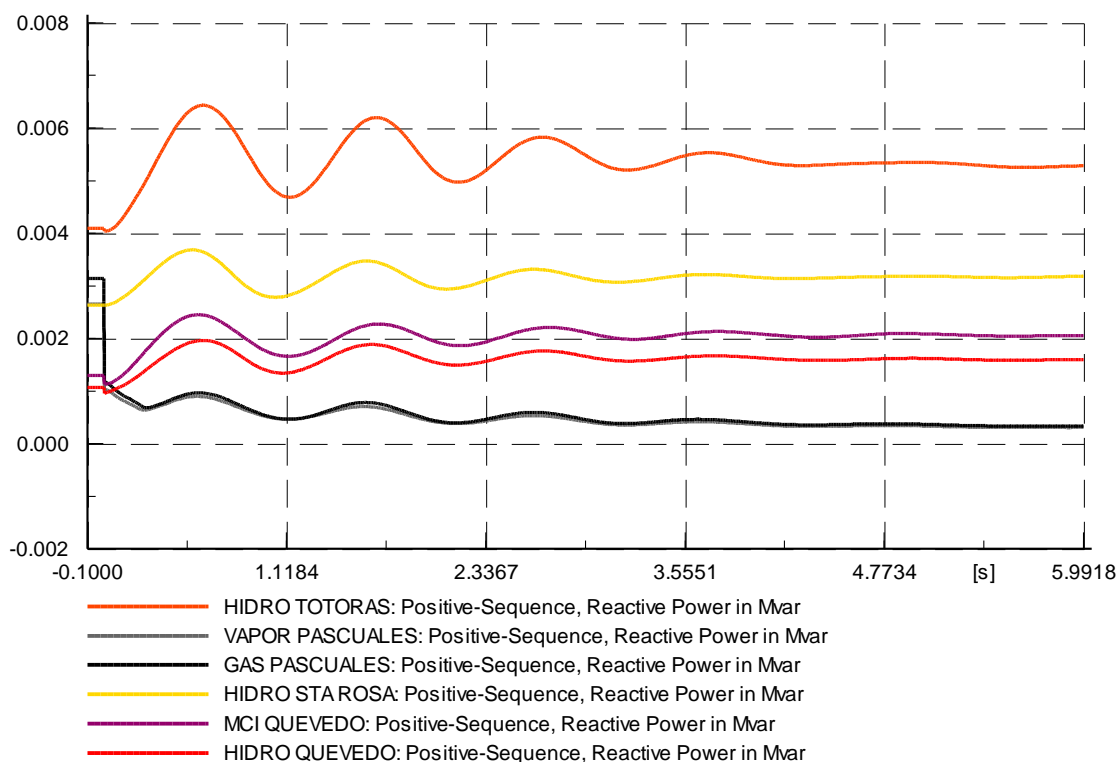


Figura 5.15 Potencia reactiva de generadores – caso salida de carga

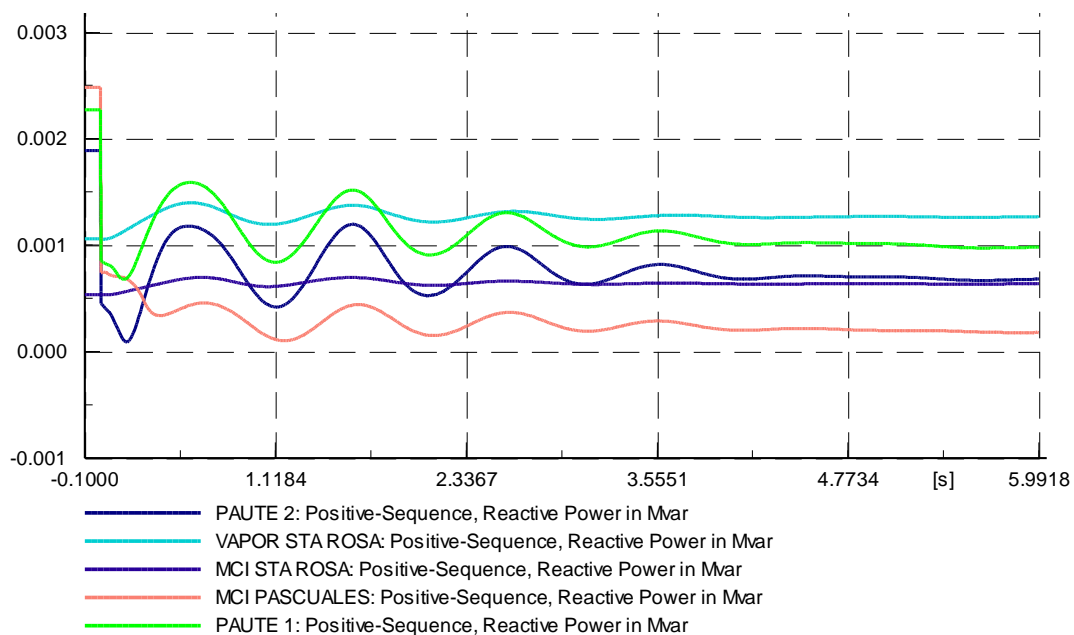


Figura 5.16 Potencia reactiva de generadores – caso salida de carga

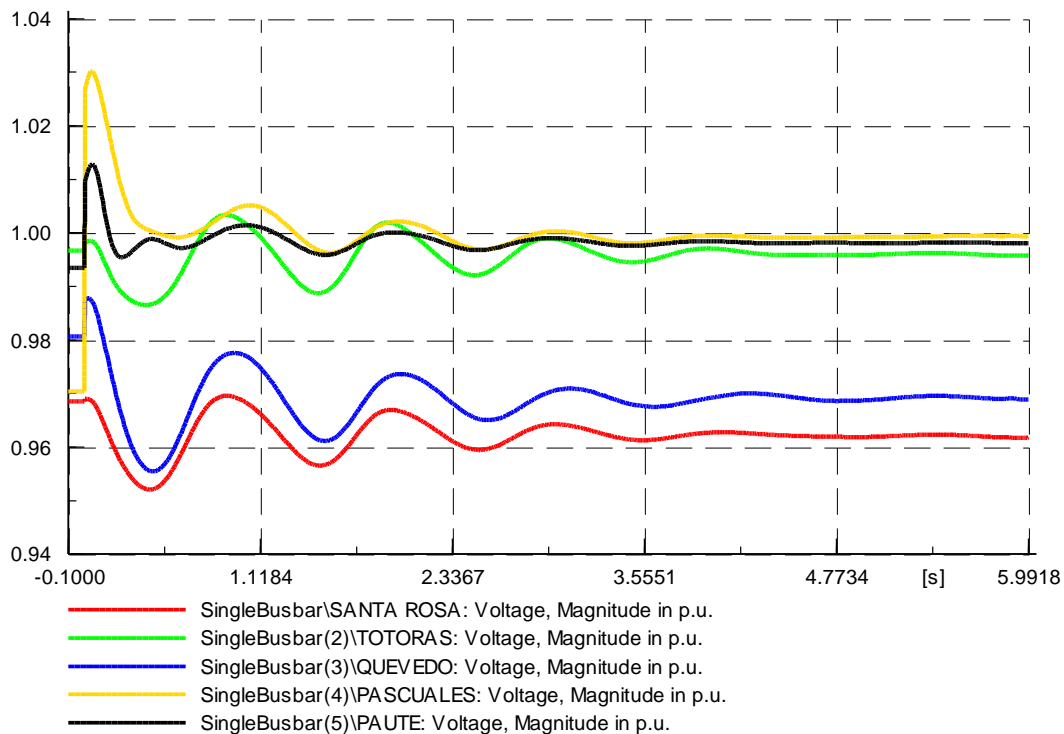


Figura 5.17 Voltaje en barras – caso salida de carga

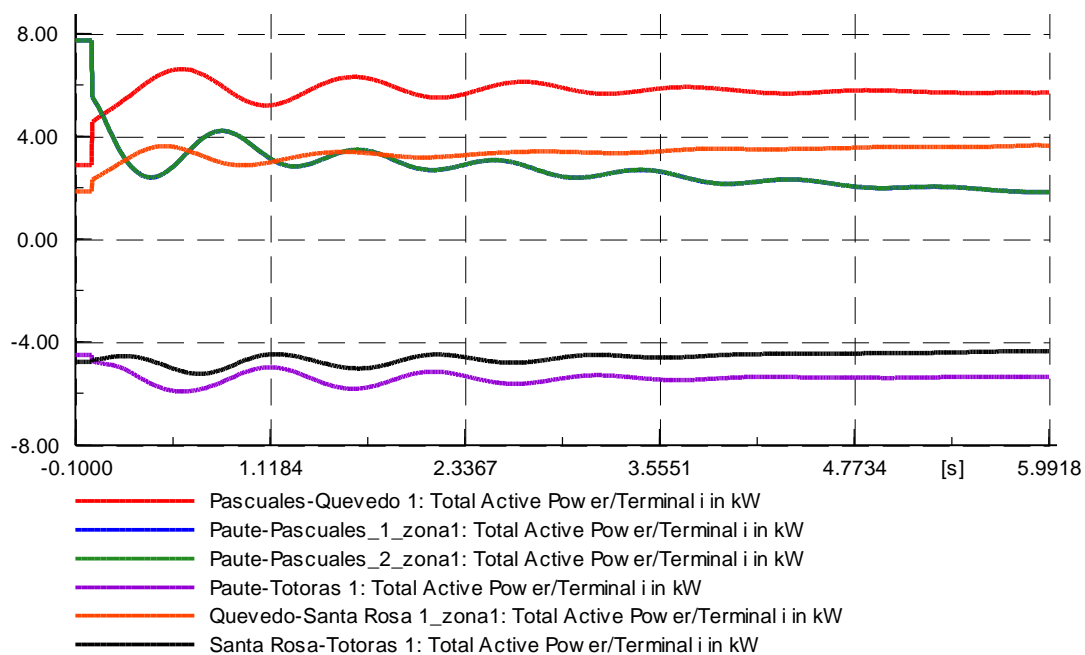


Figura 5.18 Potencia activa en L/T – caso salida de carga

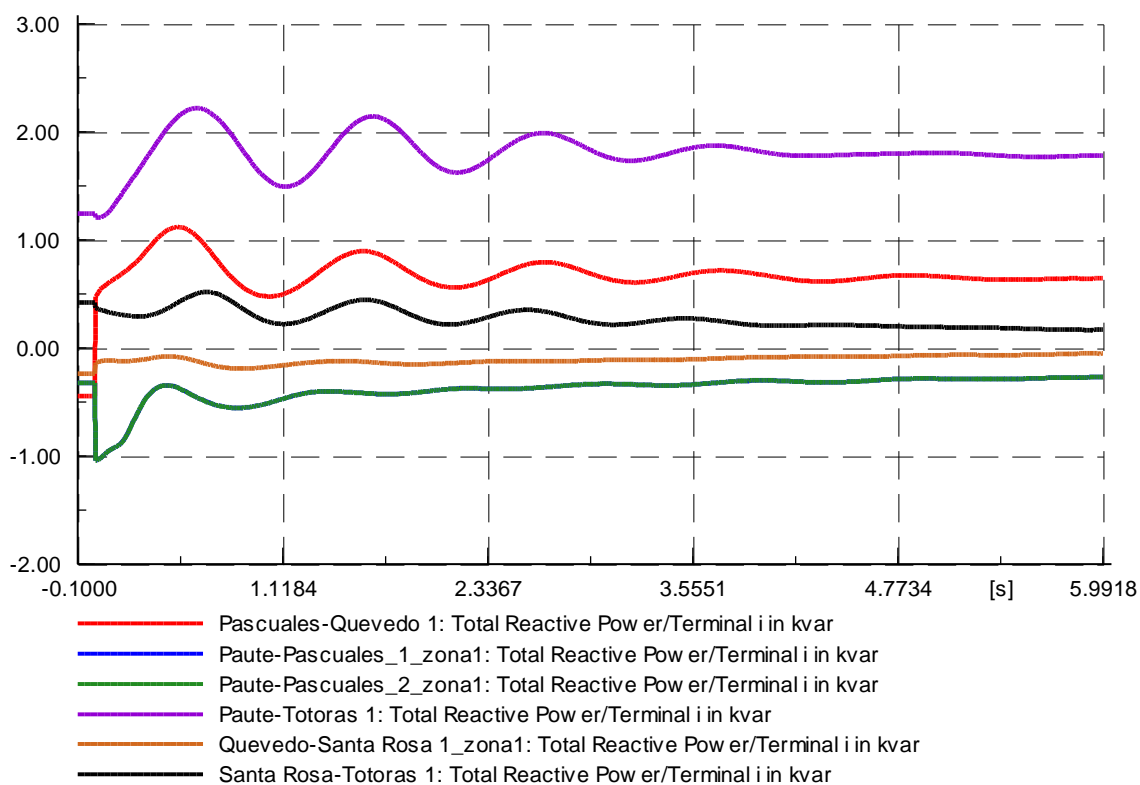


Figura 5.19 Potencia reactiva en L/T – caso salida de carga

Fallas en líneas – Línea de transmisión Totoras – Santa Rosa: 1 circuito

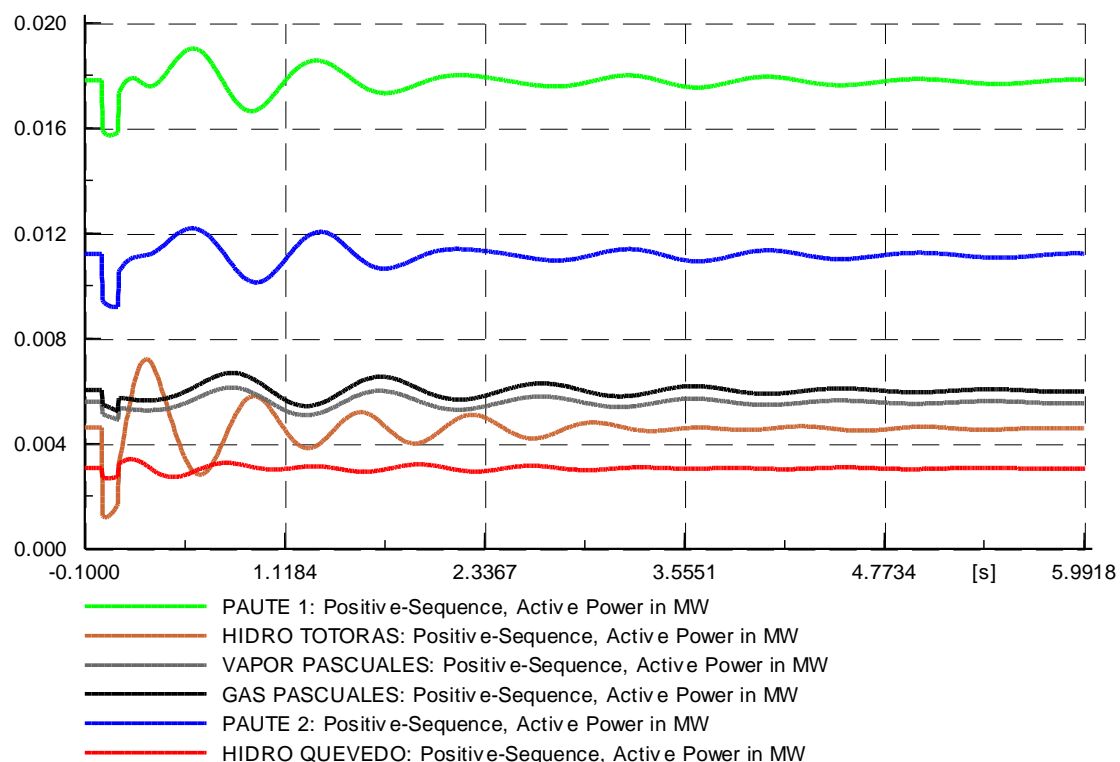


Figura 5.20 Potencia activa de generadores – caso falla en L/T

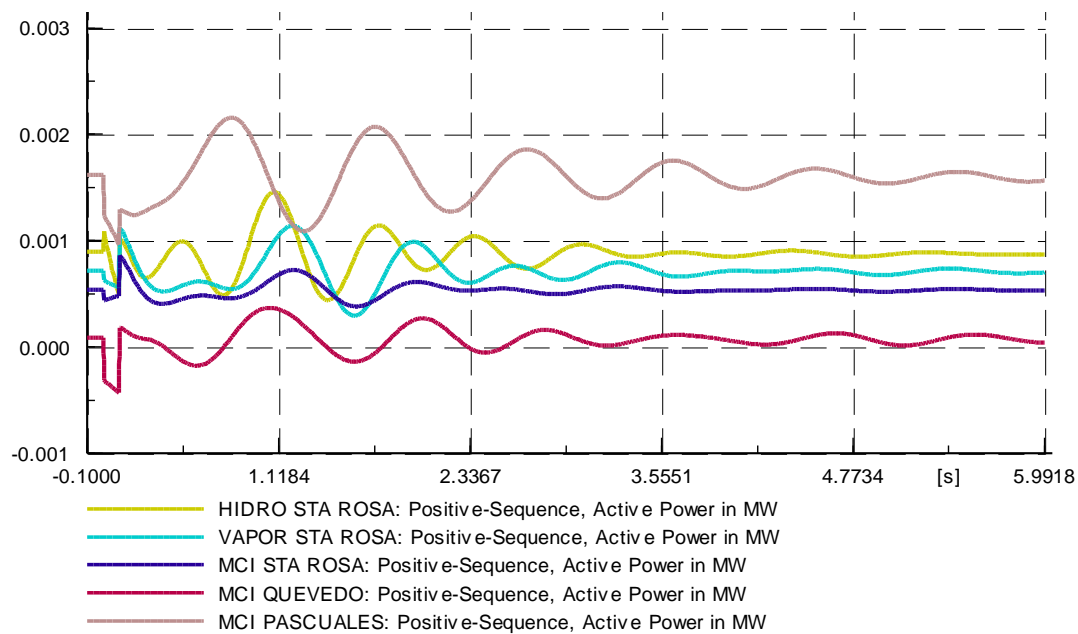


Figura 5.21 Potencia activa de generadores – caso falla en L/T

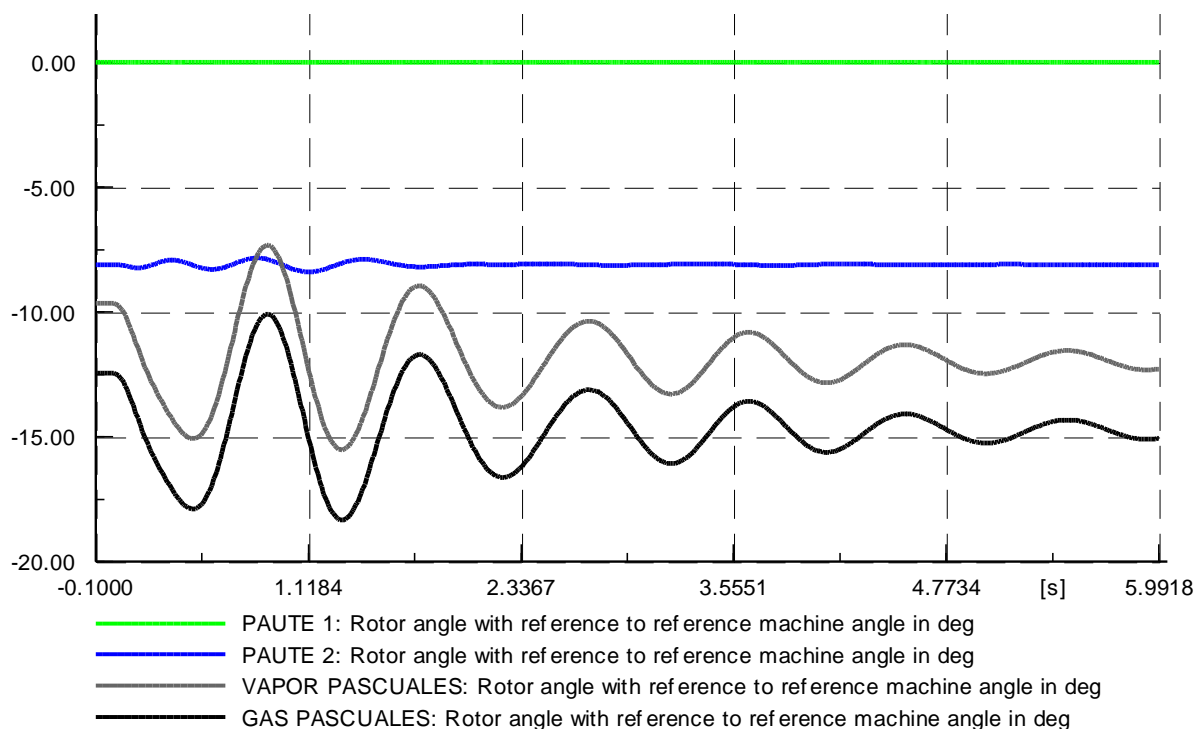


Figura 5.22 Ángulo de rotor en generadores – caso falla en L/T

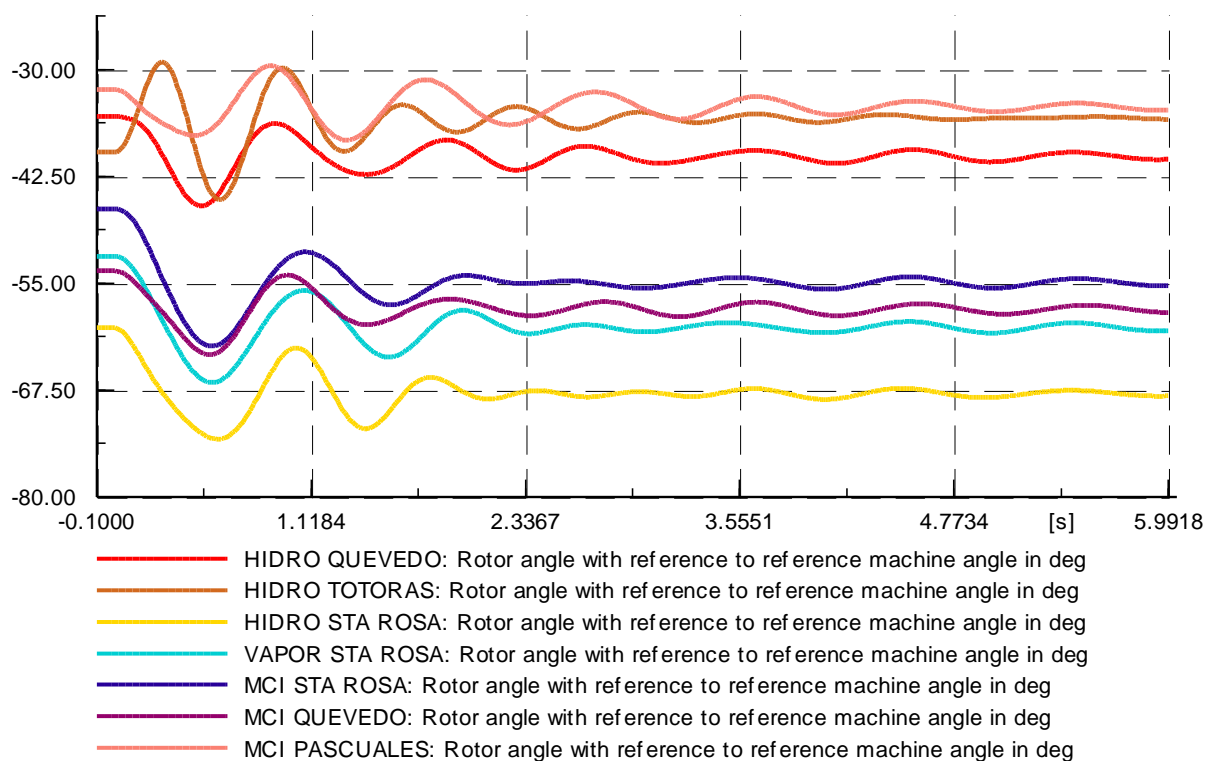


Figura 5.23 Ángulo de rotor en generadores – caso falla en L/T

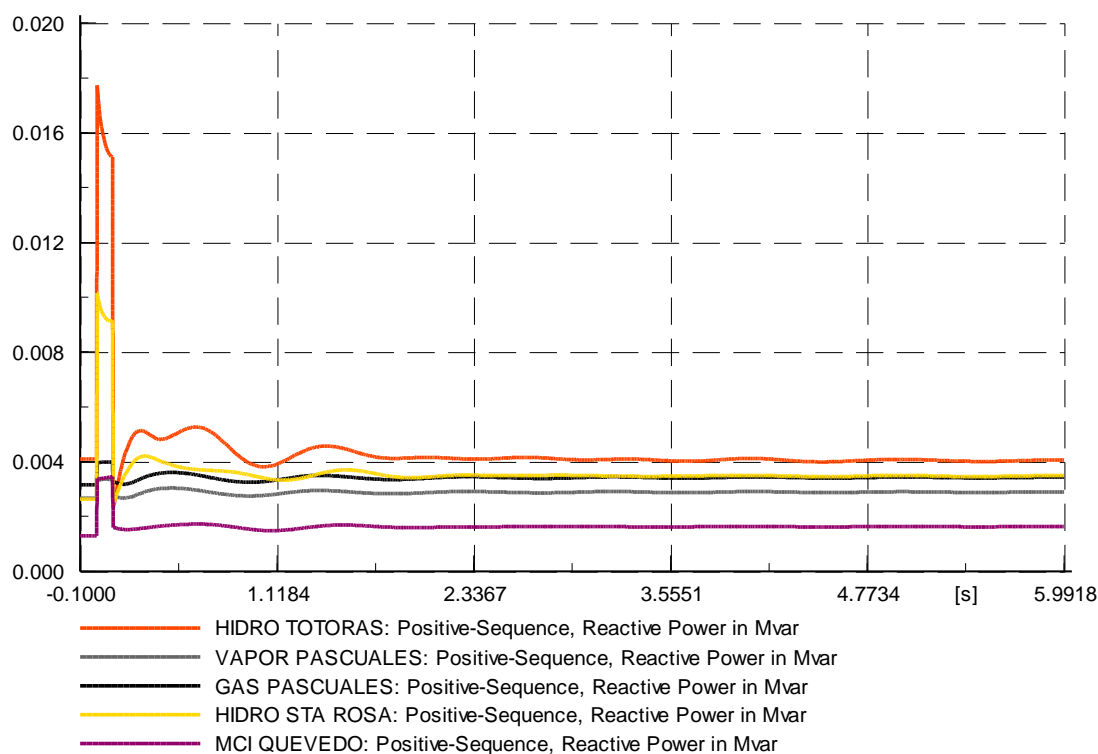


Figura 5.24 Potencia reactiva de generadores – caso falla en L/T

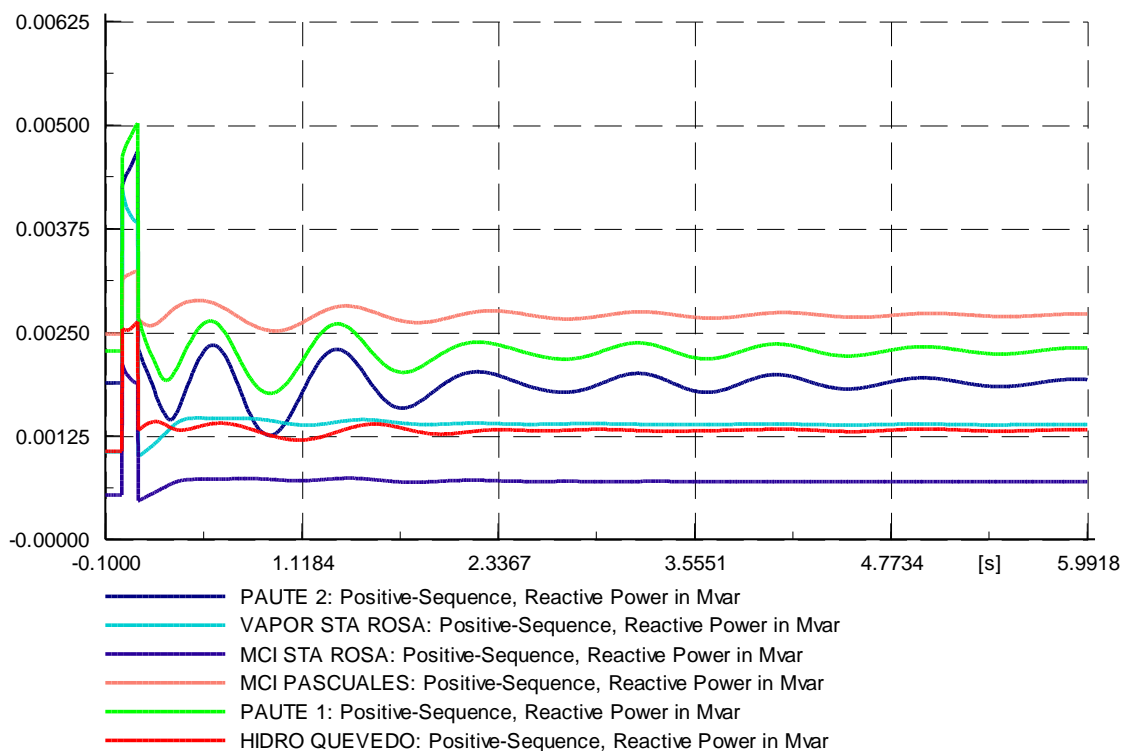


Figura 5.25 Potencia reactiva de generadores – caso falla en L/T

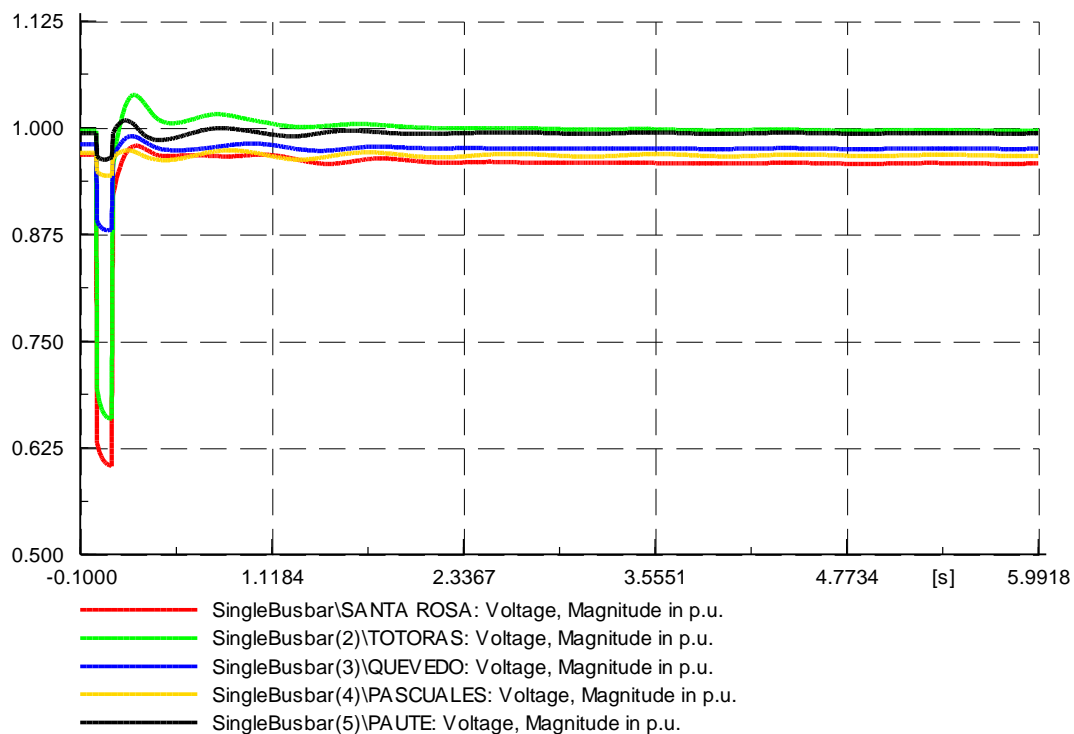


Figura 5.26 Voltaje en barras – caso falla en L/T

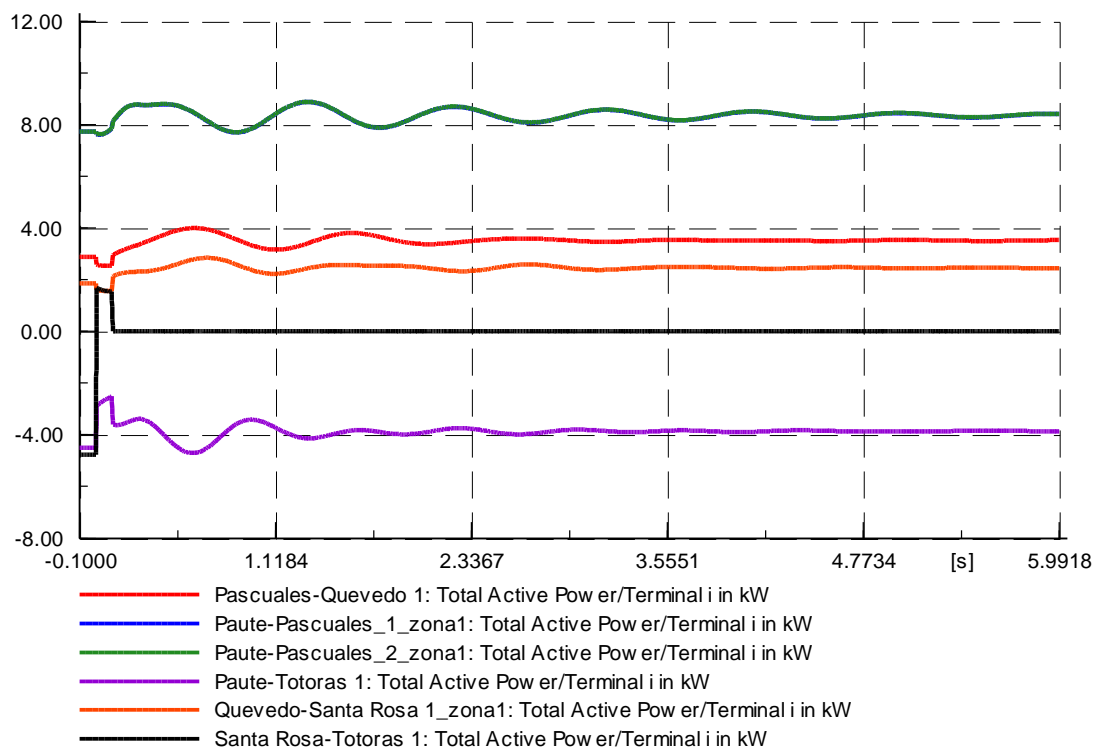


Figura 5.27 Potencia activa en L/T – caso falla en L/T

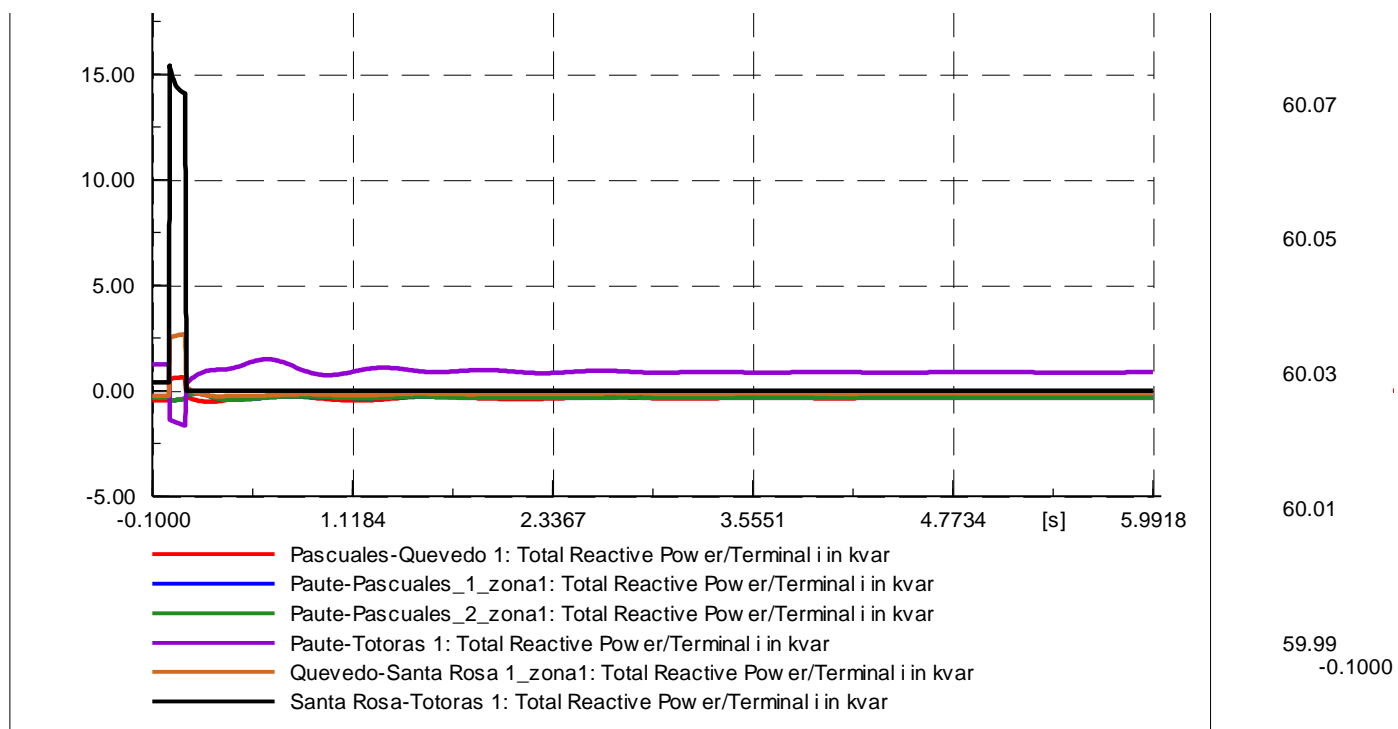


Figura 5.28 Potencia reactiva en L/T – caso falla en L/T

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Debido al nivel de reducción que posee el sistema, resulta muy difícil e infructuoso el realizar una reducción exacta del SNI, por lo que en el presente proyecto se optó por trabajar con valores típicos para los distintos parámetros en generadores, motores y transformadores, por otra parte el cambio de base en los resultados es de naturaleza obligatoria para poder trasladarlos del sistema reducido del laboratorio al sistema real.
- Se ha previsto la incorporación de 11 grupos motor DC – generador sincrónico, cuyo funcionamiento será controlado mediante un software que simule el movimiento de los distintos tipos de turbinas, así mismo se contará con un regulador de velocidad que controle el movimiento del motor y un regulador de voltaje a la salida del generador, logrando así simular parcialmente el sistema de control de un generador real.
- Los parámetros que se han dimensionado en los equipos (generadores y transformadores) deben ser tomados como valores únicamente de referencia al momento del armado físico del sistema, esto debido a la dificultad y alto costo que representaría el diseñar y construir dichos equipos con los parámetros propios obtenidos en el presente proyecto. Alternativamente resultaría posible adaptar los valores de reactancias y constantes de tiempo de una máquina grande a un modelo reducido mediante el uso de reactancias externas, resistencias negativas, etc.
- La inclusión de volantes de inercia en los grupos motor – generador del sistema a escala reducida del SNI, permite emular los valores de inercia de las máquinas en el sistema real, de modo que se puedan realizar

estudios de estabilidad transitoria con un alto grado de semejanza a los posibles escenarios de contingencias en el SNI.

- La simulación de la operación del sistema a escala reducida del SNI, indica la posibilidad de realizar estudios variados y en distintos escenarios para el sistema, incluyendo flujos de potencia, fallas y estabilidad transitoria, aptos para la investigación en pregrado y postgrado en el marco de los sistemas eléctricos de potencia.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para la implementación física del sistema una vez que se posean los generadores y motores se recomienda la realización de pruebas para determinar su inercia, ya que en el presente proyecto de titulación se trabajó con valores típicos de un catálogo de productos. El uso de los datos producto de dicha experimentación permitirá lograr mayor exactitud para el diseño de los volantes de inercia.
- Se recomienda hacer un análisis técnico económico previo a la implementación física del modelo tal que se tienda a optimizar recursos y a no malgastarlos en aspectos que no resultan representativos para la exactitud y validez del modelo.
- Es recomendable el diseño de un sistema de arranque para los motores del sistema debido a la gran inercia que deben vencer para arrancar, dicha inercia se ve incrementada en gran medida debido a la inclusión de volantes de inercia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Plan Maestro de Electrificación 2012-2021”, Consejo Nacional de Electricidad, 2012.
- [2] <http://www.celec.com.ec>
- [3] DOMIJAN, A; “*Overall Conceptual Development, Planning, and Design Aspects of an Electric Power System Laboratory with an Energy Management System Control Center*”, University of Texas at Arlington, 1986.
- [4] KUNDUR, P; “Power System Stability and Control”, Mc Graw Hill, California, 1994.
- [5] EXPÓSITO, A; “Sistemas Eléctricos de Potencia”, Pretince Hall, Madrid, 2003.
- [6] ALLER, J; “La Máquina Síncronica”, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2006.
- [7] GURU, B; “Máquinas Eléctricas y Transformadores”, Universidad de Oxford, México D.F, 2003.
- [8] GRAINGER, J; “Análisis de Sistemas de Potencia”, McGraw Hill, Inc USA, 1996.
- [9] GALINDO, J; “Determinación de la Constante de Inercia de Máquinas Síncronicas de Laboratorio”, Instituto Politécnico Nacional, México D.F, 2012.
- [10] UGENA, D; “Desarrollo de un almacenador cinético de energía”, Universidad Carlos III, Madrid, 2008.

- [11] TIELENS, P “Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables”, Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Países Bajos, 2012.
- [12] Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos, “Turbinas Hidráulicas”, Abril 2006. <http://web.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/>
- [13] ANDERSON, P; “Power System Control and Stability”, IEEE, Segunda Edición, EEUU, 2003.
- [14] VAN DE VEN, J; “Fluidic Variable Inertia Flywheel”, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, 2009.
- [15] <http://www.hidroagoyan.com>
- [16] <http://www.hidronacion.org>
- [17] <http://www.hidroabanico.com.ec>
- [18] <http://www.elecaustro.com.ec>
- [19] <http://www.electroguayas.com.ec/>
- [20] <http://www.ccs.gob.ec/>
- [21] <http://www.electroquil.com>
- [22] <http://biblioteca.cenace.org.ec:8180/jspui/simple-search?query=despacho+economico+diario+programado>
- [23] <http://apuntescientificos.org>
- [24] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/icyl.html#icyl2>

- [25] http://www.lenze.com/fileadmin/lenze/documents/en/catalogue/CAT_DC_motors_en.pdf
- [26] http://tohyu-trading.com/img/catalog/upload/pdf_4447087544d5cd18db1b65.pdf
- [27] <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-latinoamericano-50024297-catalogo-espanol.pdf>
- [28] <http://www.weg.net/ec>
- [29] <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-alternadores-sincronicos-linea-g-plus-50031315-catalogo-espanol.pdf>
- [30] ENRÍQUEZ, José; “Conceptualización de la red de transmisión de 230 kV para un modelo a escala del sistema nacional interconectado reducido”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.

ANEXO 1

DESPACHO DE UNIDADES DE GENERACIÓN PARA EL PERÍODO: OCTUBRE 2011 – NOVIEMBRE 2012

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS:

POTENCIA NOMINAL (MW)	1100	170	213	156	212	40	30	20	4.5
CENTRALES	PAUTE	MAZAR	Marcel Laniado	Agoyán	San Francisco	Cumbaya	Nayon	Guangopolo	Pasochoa
OCTUBRE 2011	866.4	170	50	78	110	30	28.2	9	2.8
NOVIEMBRE 2011	893	85	174	78	110	30	28.2	8.5	3.2
DICIEMBRE 2011	1001.8	85	165	78	110	30	28.2	9.5	3
ENERO 2012	1020.7	85	156	78	110	36	29.6	12	3
FEBRERO 2012	907	170	162	78	110	36	29.6	12	3.4
MARZO 2012	907.5	170	189	154	212	36	29.6	12	3.2
ABRIL 2012	892.4	170	189	154	212	36	29.6	12	3.2
MAYO 2012	997.4	170	198	154	212	36	29.6	12	2.2
JUNIO 2012	1041.7	170		154	212	32	29.7	7.7	2.2
JULIO 2012	937.8	85	136	150	212	30	28.2	5.5	3.2
AGOSTO 2012	841.5	170	180	144	208	30	28.2	5.1	2.6
SEPTIEMBRE 2012	927.1	170	65	148	212	24	23.8	4.3	2.7
OCTUBRE 2012	668.1	170	165	148	212	30	28.2	7.7	2.8
NOVIEMBRE 2012	789.3	170	165	148	212	30	28.2	6.2	2.6

26	1.8	24	14.4	10.4	3	8	3	1.3	4.4	5.3	8.3
Ocaña	Chillos	Saucay	Saymirin	Alao	Rio Blanco	Ambi	San Miguel	La Playa	Illuchi 1	Illuchi 2	El Carmen
	1.8	22.5	14.4	9	1	8	2	1	1.5	1.5	4
	1.8	12.5	8.5	7.9	2	2.5	2.8	1	3.4	2	
	1.8	19	12	9.9	2.6	8	2.8	0.9	3	3.5	5
	1.8	18.5	12	10.4	2.5	8	2.8	0.6	2.5	3	5
	1.8	22	14.4	10.1	2.7	8	2.8		2.5	3	
26		24	14.4	10	2.2	8	2.8		2	2.5	4
26		23	14.4	9.7	2.7	8	2.8		2.3	3	4.7
	1.8	21	13.5	10.3	2.9	4	2.8		3	2.7	4
	1.7	16.5	10.5	10	2.7	2	2	1	2.5	2.7	4
	1.7	21	14	10	2.5	4	1.5	0.7	2.5	2.7	4
	1.7	19	10.4	10	2.5	4	1	0.5	1.7	2.2	4
	1.5	16	10.5	10	2.8		1	0.6	2.9	3	4
13	1.7	14.5	11	8.5	1.9	4	1	0.6	2.2	2.6	4
26	1.4	20	14	10	1.9	8	1.5	0.6	2.2	2.6	

14.7	2	6	38.5	15	16.6	3	2.4	0.4
Recuperadora	Loreto	Papallacta	Abanico	Sibimbe	Calope	Peninsula	Carlos Mora	Sillunchi
6	1.7	2.4	38.5	5.9	5.8	1.4	1.8	
6	1.6	1.9	38.5	5.1	5.8	0.5	2	
7	1.6	1.8	38.5	5.2	7.5	1	1.2	
7	2	2.6	38.5	14	15.8	1.5	2.4	
13	2	3.2	38.5	14.2	16	1.5	2.4	0.4
12	2	3.8	38.5	14	16.3	1.5	2.4	0.4
12	2	2.5	38.5	14	16.4	3	2.4	0.4
	2	2.5	38.5	14	16.5	2	2.4	0.4
13	2	3.4	6	14.1	15	2	2.4	0.4
12	2	3.8	38.4	7.8	9.6	1	2.4	0.4
12	2	2.8	38.5	7.8	6.2		2.4	
6	2	2.6	38.5	6.2	6.5	0.5	1.8	
1	1.5	2.2	38.5	4.2	6.3	0.9	1.2	
1	1.1	1.4	38.5	4	5.5	2	2	

CENTRALES TERMOELÉCTRICAS:

POTENCIA NOMINAL (MW)	28	27.5	32.8	132.5	140	100
TIPO	No convencional	No convencional	No convencional	Vapor	MCI	MCI
CENTRALES	San Carlos1	Ecoelectric1	Ecudos1	Esmeraldas	Jaramijó	Quevedo 2
OCTUBRE 2011	8	14	3.5	120		75
NOVIEMBRE 2011	8	14	15	120		84
DICIEMBRE 2011	7	14				70
ENERO 2012				120		83
FEBRERO 2012				120		70
MARZO 2012				120		54
ABRIL 2012				125		60
MAYO 2012				125		57
JUNIO 2012					32	80
JULIO 2012	10	13	1	125	73.8	90
AGOSTO 2012	12	12	14.2	125	96	90
SEPTIEMBRE 2012	12	14	14.5			90
OCTUBRE 2012	11	15	14.5	125	114	75
NOVIEMBRE 2012	12	12	14.5	125	130	60

19.2				34.2					
MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
Descanso 1	Descanso 2	Descanso 3	Descanso 4	Gualberto Hernandez1	Gualberto Hernandez2	Gualberto Hernandez3	Gualberto Hernandez4	Gualberto Hernandez5	Gualberto Hernandez6
4.3	4.3		4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	
4.3	4.3		4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	
4.3	4.3		4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	
	4.3		4.3	5.2		5.2	5.2	5.2	
	4.3		4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	
	4.3		4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	4.3	3.6	4.3		5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
			4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	4.3	3.6	4.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	4.3	3.6	4.3	5.2	5.2	5.2	5.2		5.2
	4	4.3	4.3	5.2	5.2	5.2		5.2	5.2
4.3	4	4.3	4	5.2	5.2	5.2		5.2	5.2
4.3		4.3	4	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
3.8		4	3.8	5.2	5.2		5.2	5.2	5.2

20.4	260								33
MCI	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Vapor
Manta2 -1	Termo- machala 1- 1	Termo- machala 1-2	Termo- machala 2 -1	Termo- machala 2 -2	Termo- machala 2-3	Termo- machala 2-4	Termo- machala 2-5	Termo- machala 2-6	Aníbal Santos
16.5		67.6							32.5
15		67.6							32.5
12	68.8	67.6							32.5
15	68.8	67.6							32.5
15	68.8	67.6				18	18	18	32.5
18	68.8	67.6				18	18	18	32.5
18	68.8	67.6				14	18	18	25
18	68.8	67.6	18	18	18	18	18	18	25
18	68.8	67.6	19	20	20	20	20	19	25
11.8	68.8	67.6	19	20	20	20	20	19	
16.5	68.8			20	20	20	20	19	32.5
16.5	68.8	67.6		20	20	20	20		32.5
16.5	68.8	67.6	20	20	20	20	20		32.5
13.5	68.8	67.6	20	20		20	20		32.5

103					146		26	150			
Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Vapor	Vapor	Gas	MCI	MCI	MCI	MCI
Aníbal Santos 1	Aníbal Santos 2	Aníbal Santos 3	Aníbal Santos 5	Aníbal Santos 6	Gonzalo Zevallos 2	Gonzalo Zevallos 3	Gonzalo Zevallos 4	Termo guayas 1	Termo guayas 2	Termo guayas 3	Termo guayas 4
20	20				72	72		20	40	40	
	20				72	72		20	40	40	
	20				72	72		20	40	40	4
20	20		18	18	72	72		20	40	40	4
	20	16	18	11.6	72	72		20	40	40	7
20	20		18	17.1	72	72		20	40	40	7
	10				72	72		20	40	40	10
		16			72	72		20	40	40	13
					72	72		20	40	40	4.6
						72		20	40	40	7
		16			70	72		20	40	40	10
	20	16	18		72		15	20	40	40	10
					70			20	40	40	12
		16			70			20	40	40	10

32.2				34							96
MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	Gas
Guango polo 1	Guango polo 3	Guango polo 4	Guango polo 7	Gene roca 1	Gene roca 2	Gene roca 3	Gene roca 5	Gene roca 6	Gene roca 7	Gene roca 8	Enrique García 1
5.1	5.1	5.1	1.5	4.2	4.2		4.2	4.2	4.2	4.2	96
5.1	5.1	5.1		4.2	4.2		4.2	3.5	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1	1.6	4.2	4.2		4.2	4.2	4.2	4.2	96
5.1	5.1	5.1	1.6	4.2	4.2	4.7	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1	1.6	4.2	4.2	3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1		4.2	4.2	3.6		4.2	4.2	4.2	
5.1		5.1		4.2	4.2	3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
				4.2	4.2	3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1	1.5	4.2	4.2	3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1		4.2	4.2	3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1	5.1	1.5	4.2		3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1		1.5	4.2		3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	
5.1	5.1		1.5	4.2		3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	96
5.1	5.1	5	1.5	4.2		3.6	4.2	4.2	4.2	4.2	

136.8		40	130	40		15.2						
Gas	Gas	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
Pascuales II 2	Pascuales II 3	Santa Elena 1-1	Santa Elena 2-1	Santa Elena 3-1	Santa Elena 3-3	Cata mayo 4	Cata mayo 5	Cata mayo 6	Cata mayo 7	Cata mayo 8	Cata mayo 9	Cata mayo 10
	18	40	68.2			1.2	1	2.5	2.5			2.2
	18	40	75			1.2			2	2.4		2.2
18	18	40	70			1.2	1.2		2.5	2.5		2.2
18	18	40	68.2			1.2	1.2		2.5		2.2	2.2
18	18	40	63.2			1.2	1.2		2.5		2.2	2.2
18	18	40	70				1.2		2.5			2.2
			63.2			1.2	1.2	2.5	2.5			2.2
			70			1.2			2.5			2.2
			70.8									
			73.7									
			69.4	13.3	13.3	1.2		2.5	2.5	2		2.2
			69.4	13.3	13.3	1.2	1.2	2.5	2.5			2.2
			65		13.3	1.2	1.2	2.5	2.5			
			67.9		13.3	1.2		2.5				

78		192				102	3.3	9.1		
Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	MCI	MCI	MCI	MCI
Alvaro Tinajero 1	Alvaro Tinajero 2	Electroquil 2-1	Electroquil 2-2	Electroquil 3-3	Electroquil 3-4	Victoria 2-1	Lliga 1	La Propicia 1	La Propicia 2	La Propicia 3
	35	47.5	46	47.5	47	102	1.2			2
		46	46	47.6	36.3					
		47.5	48.8	47.6	35.9		1.2	3	3.8	
	35	47.5	48.8	47.6	48.5		1.6			
43	35	47.5	48.8	47.6	48.3					
43	35	47.5	48.8	47.6	43.4			3.3		
		45	48.8	47.6						
				28						
30				23					3.8	2
30										
43					48.5			3.3	3.8	
43		47.5	48.8	44.7	48.5		1.5	3	3.8	2
			48.8	47.6	48.5	102	1.2	3.3	3.8	
40			48.8	47.6				3.3	3.6	

47.5	32									
Gas	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
Miraflor es 1	Miraflor es 8	Miraflor es 10	Miraflor es 11	Miraflor es 12	Miraflor es 13	Miraflor es 14	Miraflor es 15	Miraflor es 16	Miraflor es 18	Miraflor es 22
20	2	2		4.5		2	2	2	2	2
46	2	2	4.5	4		2			2	2
47.5	2	2	5			2	2	2	2	2
20	2	2	5			2	2	2	2	2
	2	2	5	4		2	2	2	2	2
	2	2	5			2	2	2	2	2
	2		5	5		2		2	2	2
			5	5		2		1.5	1.5	
20	2	2	5	5	2	2	2		2	2
			5	5		1.8		1.8	1.8	
20			5	5						
20	2	2		5	2	2	2	2	2	2
20										
20										

49			133	60					
Gas	Gas	Gas	Vapor	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
Santa Rosa 1	Santa Rosa 2	Santa Rosa 3	Trinitaria 1	Jivino II 1	Jivino II 2	Jivino III 1	Jivino III 2	Jivino III 3	Jivino III 4
16.5	15								
15			110						
15.2									
15	15								
15	15	17							
			133						
			133			10	10		10
			133			10	10	10	8
			133			10		10	10
						10	10	10	10
17	15		133			10.5	10.5	10.5	10.5
			133	5	5	10.5	10.5	10.5	10.5
		17	133	5	5	10.5	10.5	10.5	10.5

12		
MCI	MCI	MCI
Celso Castellanos 1	Celso Castellanos 2	Celso Castellanos 3
1.6	1.8	1.8
1.8	1.8	1.8
1.8	1.8	

ANEXO 2

PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LOS TRANSFORMADORES DEL SNI

NOMBRE	ZONA	Sn [kV] [MVA]	V HV [kV]	V LV [kV]	GRUPO VECTORIAL			P LV-HV [kW]	%Vcc (+) LV-HV	%Vcc (0) LV-HV
T_ABANICO_1	MOLINO-MILAGRO	18	69	4,16	YN	D	11	17	10,50000%	10,50000%
T_ABANICO_2	MOLINO-MILAGRO	27	69	4,16	YN	D	11	18	11,00000%	10,00000%
T_AGOYAN_138_1	STA ROSA	85	138	13,8	YN	D	1	80	12,49000%	11,24000%
T_AGOYAN_138_2	STA ROSA	85	138	13,8	YN	D	11	211,61	12,01000%	10,29000%
T_CALDERON1	STA ROSA	33	138	23				158,99	16,64190%	3,00000%
T_CALDERON2	STA ROSA	33	138	23				158,99	16,64190%	3,00000%
T_CALOPE	STO. DOMINGO-QUEVEDO	20,8	69	6,9	YN	D	1	0,000	6,78000%	3,00000%
T_CH.GUANGO	QUITO	15	46	6,3	YN	D	1	40	9,95000%	7,36640%
T_CONOCOTO	QUITO	33	138	23	YN	D	1	158,994	16,64190%	3,00000%
T_CUMBAYA_U1-U4	QUITO	12,5	46	4,16	YN	D	1	30	10,12500%	10,12500%
T_D.PERIPA_U1-U3	STO. DOMINGO-QUEVEDO	85	138	13,8	YN	D	1	264,05	12,25000%	12,25000%
T_ECOLUZ	QUITO	33	46	4,16	YN	D	1	204,99	15,56610%	6,36640%
T_ENERGY_INTER_A	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	69	13,8	YN	D	11	211,606	6,00000%	6,00000%
T_ENERGY_INTER_A1	STO. DOMINGO-QUEVEDO	60	13,8	0,48	YN	D	1	176,053	9,30000%	9,30000%
T_ENERGY_INTER_A2	STO. DOMINGO-QUEVEDO	10	13,8	0,48	YN	D	1	50,700	6,55000%	14,60000%
T_ENERGY_INTER_B	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	69	13,8	YN	D	11	211,606	6,00000%	6,00000%
T_ENERGY_INTER_B1	STO. DOMINGO-QUEVEDO	60	13,8	0,48	YN	D	1	176,053	9,30000%	9,30000%
T_ENERGY_INTER_B2	STO. DOMINGO-QUEVEDO	10	13,8	0,48	YN	D	1	50,700	6,55000%	14,60000%
T_EQUIL_ACOPL	PASCUALES	112	138	69	YN	YN	0	158,07	13,52700%	11,67000%
T_EQUIL_G1	PASCUALES	64	69	13,8	YN	D	11	448	14,52000%	14,52000%
T_EQUIL_G2	PASCUALES	84	69	13,8				448	8,06400%	8,06400%
T_EQUIL_G3	PASCUALES	56	138	13,8	YN	D	1	163,27	18,10660%	18,10660%
T_EQUIL_G4	PASCUALES	56	138	13,8	YN	D	1	163,27	18,10660%	18,10660%
T_EUGENIO ESPEJO	QUITO	33	138	23	D	YN	1	33,243	10,08700%	3,00000%
T_G1_CT ESMERALDAS	STO. DOMINGO-QUEVEDO	160	147,5	13,8	YN	D	11	352,186	11,23000%	9,50000%
T_GAS PASCUALES	PASCUALES	114	69	13,8	YN	ZN	0	265,79	11,66000%	11,66000%
T_GEN ROCAFUERTE	PASCUALES	33,33	69	13,8	YN	D	0	162,63	11,06000%	11,06000%
T_GUANG_GUALBERTO	QUITO	27,5	138	13,8	YN	D	1	244,000	12,02100%	6,04000%
T_GUANGO_U1-U6	QUITO	20	138	6,6	YN	D	1	276,71	10,48950%	8,75000%
T_HGUANGOPOLO	QUITO	15	46	6,3	YN	D	1	40	9,95000%	7,36640%
T_KEPL_1	TRINITARIA	37,5	230	13,8	YN	D	1	100	14,70000%	14,70000%
T_KEPL_2	TRINITARIA	37,5	230	13,8	YN	D	1	100	14,70000%	14,70000%
T_KEPL_3	TRINITARIA	37,5	230	13,8	YN	D	1	100	14,70000%	14,70000%
T_KEPL_4	TRINITARIA	63,5	230	13,8	YN	D	1	30	12,00000%	12,00000%
T_KEPL_5	TRINITARIA	63,5	230	13,8	YN	D	1	30	12,00000%	12,00000%
T_LA ESPERANZA	STO. DOMINGO-QUEVEDO	10	69	4,16	YN	D	1	0,000	3,00000%	3,00000%
T_LULUNCOTO	QUITO	11,25	46	6,3	YN	D	1	62,27	12,40000%	736,64000%
T_ECOELECTRIC	MOLINO-MILAGRO	25	69	4,16	YN	D	1	88,994	11,80000%	11,41000%
T_NAYON_U1-U3	QUITO	16,5	46	6,9	YN	D	1	50,34	5,83000%	5,83000%
T_PBARGE II_1	TRINITARIA	27	69	13,8	YN	D	1	18	11,00000%	3,00000%
T_PBARGE II_2	TRINITARIA	27	69	13,8	YN	D	1	18	11,00000%	3,00000%
T_PEDERNALES	STO. DOMINGO-QUEVEDO	10	69	4,16	YN	D	1	0,000	3,00000%	3,00000%
T_POMASQUI	QUITO	33	138	23	YN	D	1	158,994	16,64190%	3,00000%
T_POZA ONDA	STO. DOMINGO-QUEVEDO	5	69	4,16	YN	D	1	0	3,00000%	3,00000%

T_RECUPERADORA U1	QUITO	18	138	6,9	YN	D	11	64,499	54,83170%	54,83170%
T_S/E18_1	QUITO	33	138	23	D	YN	1	158,99	16,64190%	3,00000%
T_S/E18_2	QUITO	33	138	23	D	YN	1	158,99	16,64190%	3,00000%
T_SFRAN_1	SAN FRANCISCO	134	230	13,8	YN	D	1	80	12,49000%	11,24000%
T_SFRAN_2	SAN FRANCISCO	134	230	13,8	YN	D	1	80	12,49000%	11,24000%
T_ECUDOS	MOLINO-MILAGRO	31,6	69	4,16	YN	D	0	88,994	11,41000%	11,41000%
T_STA ROSA_G1	QUITO	28	138	13,8	YN	D	11	67,187	13,11000%	13,11000%
T_STA ROSA_G2	QUITO	28	138	13,8	YN	D	11	67,187	13,11000%	13,11000%
T_STA ROSA_G3	QUITO	28	138	13,8	YN	D	11	67,187	13,11000%	13,11000%
T_TG4_GZEV	SALITRAL	35	69	13,8	YN	D	5	84	9,10000%	9,10000%
T_TV2_GZEV	SALITRAL	86	69	13,8	YN	D	5	448	12,00000%	12,00000%
T_TV3_GZEV	SALITRAL	86	69	13,8	YN	D	5	448	11,79000%	11,79000%
T_MACH-POW1	MOLINO-MILAGRO	93	138	13,8	YN	D	0	88,994	11,41000%	14,60000%
T_U1 PUCARA	STA ROSA	40	138	13,8	YN	D	11	81,344	10,17000%	10,17000%
T_U1 DAULE PERIPA	STO. DOMINGO-QUEVEDO	85	138	13,8	YN	D	1	264,047	12,25000%	12,25000%
T_U1_EL CARMEN	QUITO	12,5	138	6,6	YN	D	11	27,719	88,32000%	88,32000%
T_U1_RECUPERADORA	QUITO	18	138	6,6	YN	D	11	64,499	54,83170%	54,83170%
T_U1-6_GHERN	QUITO	46,5	46	13,8	YN	D	1	176,05	9,30000%	9,30000%
T_U1-U2 LOS CHILLOS	QUITO	12,5	46	2,3	D	D	0	118,000	3,00000%	7,36640%
T_U1-U2 PASOCHOA	QUITO	12,5	46	4,16	YN	D	1	43,000	8,12500%	7,36640%
T_U1-U6 GUALBERTO	QUITO	46,5	46	13,8	YN	D	1	176,053	9,30000%	9,30000%
T_U1-U6 GUANGOPOLO	QUITO	20	138	6,6	YN	D	1	276,714	10,48950%	8,75000%
T_MACH-POW2	MOLINO-MILAGRO	93	138	13,8	YN	D	0	88,994	11,41000%	14,60000%
T_U2 PUCARA	STA ROSA	40	138	13,8	YN	D	11	81,344	10,17000%	10,17000%
T_U2 DAULE PERIPA	STO. DOMINGO-QUEVEDO	85	138	13,8	YN	D	1	264,047	12,25000%	12,25000%
T_SAN CARLOS	MOLINO-MILAGRO	31,25	69	13,8	YN	D	1	88,994	16,00000%	14,60000%
T_U3 DAULE PERIPA	STO. DOMINGO-QUEVEDO	85	138	13,8	YN	D	1	264,047	12,25000%	12,25000%
T_SIBIMBE U1-U2	MOLINO-MILAGRO	18	69	6,9	YN	D	11	147	13,00000%	13,00000%
T_U1 PAUTE_G1	MOLINO-MILAGRO	114	138	13,8	YN	D	1	278,79	11,40000%	11,40000%
T_MIRA FLORES A	STO. DOMINGO-QUEVEDO	12,5	69	13,8	YN	D	1	50,700	8,36000%	8,36000%
T_MIRA FLORES B	STO. DOMINGO-QUEVEDO	12,5	69	13,8	YN	D	1	50,700	8,36000%	8,36000%
T_GEQ MIRAFLORES	STO. DOMINGO-QUEVEDO	30	69	13,8	YN	D	1	50,700	9,00000%	9,00000%
T_U2 PAUTE_G2	MOLINO-MILAGRO	114	138	13,8	YN	D	1	278,79	11,40000%	11,40000%
T_U3 PAUTE_G3	MOLINO-MILAGRO	114	138	13,8	YN	D	1	278,79	11,40000%	11,40000%
T_U4 PAUTE_G4	MOLINO-MILAGRO	114	138	13,8	YN	D	1	278,79	11,40000%	11,40000%
T_U5 PAUTE_G5	MOLINO-MILAGRO	114	138	13,8	YN	D	1	278,79	11,40000%	11,40000%

NOMBRE	ZONA	POTENCIA NOMINAL [MVA]			Vn [Kv]			PERDIDAS [kW]			Z positiva			Z cero		
		HV	MV	LV	HV	MV	LV	HV-MV	MV-LV	LV-HV	%Vcc HV-MV	%Vcc MV-LV	%Vcc LV-HV	%Vcc0 HV-MV	%Vcc0 MV-LV	%Vcc0 LV-HV
T_AA1 ESMERAL	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	75	25	138	69	13,8	64,65	54,509	33,252	9,37500%	23,66667%	12,63667%	9,37500%	23,66667%	12,63667%
T_AA1 ESMERALDAS	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	75	25	138	69	13,8	64,650	54,509	33,252	9,37500%	23,66667%	12,63667%	9,37500%	23,66667%	12,63667%
T_AA1_PORTOVIEJO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	75	25	138	69	13,8	64,500	54,509	33,252	9,37430%	23,66610%	12,63630%	9,37430%	23,66610%	12,63630%
T_AA2_PORTOVIEJO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	75	75	25	138	69	13,8	64,500	54,509	33,252	9,37430%	23,66610%	12,63630%	9,37430%	23,66610%	12,63630%
T_AT1_AMBATO	STA ROSA	43	43	14	138	69	13,8	97,91	6,36291	7,102	7,00900%	5,16727%	7,21273%	7,00900%	5,16727%	7,21273%
T_AT1_MOLINO	MOLINO-MILAGRO	375	375	100	230	138	13,8	57,2	2,11911	2,133	7,27500%	10,10933%	12,90933%	7,27500%	10,10933%	12,90933%
T_AT2_MOLINO	MOLINO-MILAGRO	375	375	100	230	138	13,8	57,2	2,11911	2,133	7,27500%	10,10933%	12,90933%	7,27500%	10,10933%	12,90933%
T_ATK_DOS CERRITOS	MOLINO-MILAGRO	167	167	45	230	69	13,8	176,130	29,140	19,880	9,76000%	2,18000%	6,03000%	9,76000%	2,18000%	6,03000%
T_ATK_MILAGRO	MOLINO-MILAGRO	167	167	45	230	69	13,8	127,6	2,17828	2,258	7,46500%	1,84042%	4,38413%	7,46500%	1,84042%	4,38413%
T_ATT TOTORA	STA ROSA	100	100	33	230	138	13,8	25,93	1,04544	1,056	8,43000%	7,70550%	8,43000%	7,70550%	8,43000%	7,70550%
T_ATQ TRINITARIA 150MVA	TRINITARIA	150	150	50	138	69	13,8	105,57	54,62	39,520	7,81500%	17,85000%	9,89000%	7,81500%	17,85000%	9,89000%
T_ATQ BABAHOYO	MOLINO-MILAGRO	66	66	22	138	69	13,8	64,125	23,325	23,010	6,20400%	7,46333%	9,81000%	6,20400%	7,46333%	9,81000%
T_ATQ_IBARRA	STA ROSA	33	33	10	138	69	13,8	44,451	1,35354	1,27	6,74000%	8,20000%	10,50000%	6,74000%	8,20000%	10,50000%
T_ATQ_CUENCA	MOLINO-MILAGRO	100	100	27	138	69	13,8	76,8	24,2	15,200	6,90000%	6,82000%	9,27000%	6,90000%	6,82000%	9,27000%
T_ATQ_LOJA	MOLINO-MILAGRO	66	66	20	138	69	13,8	169,03	61,33	53,790	7,34000%	4,87000%	7,65000%	7,34000%	4,87000%	7,65000%
T_ATQ_MULALO	STA ROSA	66	66	20	138	69	13,8	63,187	23,64	23,400	6,13800%	7,46000%	9,73500%	6,13800%	7,46000%	9,73500%
T_ATQ_POSORJA	PASCUALES	33	33	11	138	69	13,8	94,63	37,9	29,270	7,49100%	5,25800%	8,63500%	7,49100%	5,25800%	8,63500%
T_ATQ_SALITRAL	SALITRAL	150	150	30	138	69	13,8	99,29	39,84	41,740	8,46000%	4,74990%	7,00590%	8,46000%	4,74990%	7,00590%
T_ATQ_STAELENA	PASCUALES	66	66	20	138	69	13,8	153,52	4,68687	4,642	7,22700%	4,86970%	7,67879%	7,22700%	4,86970%	7,67879%
T_ATQ_TULCAN	STA ROSA	33	33	10	138	69	13,8	94,46	33,64	29,160	7,44000%	4,81000%	7,86000%	7,44000%	4,81000%	7,86000%
T_ATQFORELLANA	SAN FRANCISCO	33	33	20	138	69	13,8	116,9	44,8485	57,446	12,70000%	22,90000%	31,41600%	12,70000%	22,90000%	31,41600%
T_ATQ_MACHALA	MOLINO-MILAGRO	100	100	33	138	69	13,8	77,58	26,39	25,930	7,21000%	5,23600%	8,49200%	7,21000%	5,23600%	8,49200%
T_ATR_IBARRA	STA ROSA	66,66	66,66	12	138	69	13,8	91,195	20,487	18,589	11,78800%	4,85000%	7,77000%	11,78800%	4,85000%	7,77000%
T_ATR_PASCUAL	PASCUALES	224	224	44,8	138	69	13,8	62,96	0,85096	0,765	7,84000%	4,16640%	6,27200%	7,84000%	4,16640%	6,27200%
T_ATR_QUEVEDO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	168	168	56	138	69	13,8	197,037	94,730	91,816	8,57000%	6,47667%	10,09667%	8,57000%	6,47667%	10,09667%
T_ATR_QUEVEDO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	168	168	56	138	69	13,8	197,037	94,73	91,816	8,57000%	6,47667%	10,09667%	8,57000%	6,47667%	10,09667%
T_ATR_SALITRAL	SALITRAL	150	150	30	138	69	13,8	99,29	39,84	41,740	8,15000%	4,02000%	6,51000%	8,15000%	4,02000%	6,51000%
T_ATR_SDOMINGO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	100	100	27	138	69	13,8	75,6	1,11081	1,925	6,92000%	6,80130%	9,28530%	6,92000%	6,80130%	9,28530%
T_ATR_STO DOMINGO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	100	100	27	138	69	13,8	75,600	1,108	1,925	6,92000%	6,80130%	9,28530%	6,92000%	6,80130%	9,28530%
T_ATT PASCUALES	PASCUALES	375	375	100	230	138	13,8	123,766	62,574	62,090	7,16000%	8,92000%	11,37000%	7,16000%	8,92000%	11,37000%
T_ATT QUEVEDO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	167	167	45	230	138	13,8	110	61,2	75,300	7,36000%	4,67000%	7,20000%	7,36000%	4,67000%	7,20000%
T_ATT_QUEVEDO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	167	167	45	230	138	13,8	110,000	61,200	75,300	7,36000%	4,67000%	7,20000%	7,36000%	4,67000%	7,20000%
T_ATT_SANTA ROSA	QUITO	375	375	125,1	230	138	13,8	154,520	299,270	296,010	7,15000%	12,85000%	16,30000%	7,15000%	12,85000%	16,30000%
T_ATT_STA ROSA	STA ROSA	375	375	100	230	138	13,8	201,2	118,3	116,600	7,35000%	10,13000%	12,93000%	7,35000%	10,13000%	12,93000%
T_ATT_TRINITARIA	TRINITARIA	225	225	75	230	138	13,8	211,95	178,931	163,430	11,83000%	10,35000%	15,52000%	11,83000%	10,35000%	15,52000%
T_ATU PASCUALES	PASCUALES	375	375	100	230	138	13,8	201,2	122,6	120,100	7,16000%	8,92000%	11,37000%	7,16000%	8,92000%	11,37000%
T_ATU POMASQUI	STA ROSA	300	300	30	230	138	13,8	161,5	0,829	0,804	11,82000%	6,06000%	7,75000%	11,82000%	6,06000%	7,75000%
T_ATR MACHALA	MOLINO-MILAGRO	100	100	33	138	69	13,8	77,58	26,39	25,930	7,23000%	4,81000%	7,78000%	7,23000%	4,81000%	7,78000%
T_ATU POMASQUI	QUITO	300	300	30	230	138	13,8	161,500	0,829	0,804	11,82000%	6,06000%	7,75000%	11,82000%	6,06000%	7,75000%
T_ATU_SANTA ROSA	QUITO	375	375	100	230	138	13,8	201,200	118,300	116,600	7,35000%	10,13000%	12,93000%	7,35000%	10,13000%	12,93000%
T_ATU_STA ROSA	STA ROSA	375	375	100	230	138	13,8	145,52	299,27	296,010	7,15000%	12,85000%	16,30000%	7,15000%	12,85000%	16,30000%
T_ATU_STO DOMINGO	STO. DOMINGO-QUEVEDO	167	167	45	230	138	13,8	109,500	60,700	56,800	7,26000%	4,64000%	6,96000%	7,26000%	4,64000%	6,96000%
T_ATU_STODOMINGO	STO. DOMINGO-	167	167	45	230	138	13,8	75,6	1,10808	1,925	6,92000%	6,80130%	9,28530%	6,92000%	6,80130%	9,28530%

QUEVEDO																
T_ATQ CHONE	STO. DOMINGO-QUEVEDO	60	60	20	138	69	13,8	148,7	64,93	64,110	8,11000%	6,11000%	9,97000%	8,11000%	6,11000%	9,97000%
T_ATU MILAGRO	MOLINO-MILAGRO	225	225	75	230	138	13,8	44,97	199,36	211,580	11,23000%	10,67000%	15,30000%	11,23000%	10,67000%	15,30000%
T_S/E19	QUITO	100	100	33	138	46	23	0,000	0,000	0,000	15,18000%	9,96930%	3,98970%	15,18000%	9,96930%	3,98970%
T_SELVA ALEGRE 1	QUITO	100	100	13	138	46	13,8	0,000	0,000	0,000	14,20000%	6,40120%	4,10020%	14,20000%	6,40120%	4,10020%
T_SELVA ALEGRE 2	QUITO	100	100	13	138	46	13,8	245,191	23,470	24,040	13,87000%	4,20300%	6,42200%	13,87000%	4,20300%	6,42200%
T_T1 VINCENTINA	QUITO	43	43	14	138	46	13,8	0	0	0,000	9,46000%	1,22500%	4,35167%	9,46000%	1,22500%	4,35167%
T_T1 IBARRA	STA ROSA	50	50	10	138	34,5	13,8	170,686	15,018	19,584	15,42000%	2,19800%	6,06600%	15,42000%	2,19800%	6,06600%
T_T2 VINCENTINA	QUITO	100	100	13	138	46	13,8	0	0	0,000	13,99000%	6,32970%	4,16910%	13,99000%	6,32970%	4,16910%
T_ATQ TOTORAS	STA ROSA	100	100	33	138	69	13,8	25,93	1,04554	1,056	8,43000%	7,70550%	11,71500%	8,43000%	7,70550%	11,71500%
T_TRK RIOBAMBA	STA ROSA	100	100	33	230	69	13,8	121,46	11,12	14,350	16,73000%	2,57000%	8,51000%	16,73000%	2,57000%	8,51000%
T_TRN SANTA ROSA	QUITO	75	75	25	138	46	13,8	244,270	27,460	55,950	15,44000%	3,73667%	10,03667%	15,44000%	3,73667%	10,03667%
T_TRN STA ROSA	QUITO	75	75	25	138	46	13,8	244,27	27,46	55,950	15,43640%	3,73380%	10,03611%	15,43640%	3,73380%	10,03611%
T_TRP SANTA ROSA	QUITO	75	75	25	138	46	13,8	244,270	27,460	55,950	15,44000%	3,73667%	10,03667%	15,44000%	3,73667%	10,03667%
T_TRP STA ROSA	QUITO	75	75	25	138	46	13,8	244,27	27,46	55,950	15,44000%	3,73667%	10,03667%	15,44000%	3,73667%	10,03667%
T_TRK MACHALA	MOLINO-MILAGRO	165	165	16,5	230	69	13,8	176,130	1,443	2,116	12,09450%	2,55750%	3,86100%	12,09450%	2,55750%	3,86100%

ANEXO 3

PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LOS GENERADORES DEL SNI

NOMBRE	Sk	Vr	fp	xd sat	xd' sat	xd'' sat	x2	x0	RG	Qmin	Qmáx	Pmin	Pmáx	xd	xd'	xd''	xq	xq'	xq''	xc	xl
	MVA			%	%	%	%	%	ohm	MVAr	MVAr	MW	MW	%	%	%	%	%	%	%	%
G_MACH-POW_1	88.11	13.8	0.9	163.7	20.2	15	20	10	0	-40	50	0	74.8935	163.7	20.2	15	148	28	19	0	10
G_MACH-POW_2	88.11	13.8	0.9	163.7	20.2	15	20	10	0	-40	50	0	74.8935	163.7	20.2	15	148	28	19	0	10
G_GUARANDA	1.5	69	0.8	110	25	18	20	10	0.57189189	0	0.75	0	0	115	30	20	60	30	20	0	10
G_S.ELENA	15.35	69	0.8	165	30	15	20	10	0.046571	-1.4	4	4	12	180	40	20	170	70	20	0	10
ECOLUZ	10	4.16	0.9	120	25	20	20	10	0.00034646	-0.6666667	2.066667	0	9	150	30	20	100	100	20	0	10
G_ESMERA_G2 (Propicia)	4.9	69	0.8	196	23.1	20	20	10	0.14589079	-1	3.2	0	0	196	23.1	14.6	196	23.1	18.56	0	10
G_ESMERALDAS_G1 (Termoesmer)	156	13.8	0.85	196	23.1	14.6	14.5	6.9	0	-16.98	29.61758	0	132.6	196	23.1	14.6	196	23.1	18.56	0	10
G_STA.ROSA_3	30	13.8	0.6	225	18.3	13	20	10	0.00127087	-11	24	0	18	225	18.3	13	210	56	13	0	11
G_STA.ROSA_1	30	13.8	0.6	225	210	13	20	10	0.00127087	-11	24	0	18	225	18.3	13	210	56	13	0	11
G_GUANGO_H6	12.8	6.3	0.9	100	0	20	20	18	0.00062078	-2.72	2.72	0	11.5	104	30	20	75	30	20	0	10
G_GHERNAN_1	6.75	13.8	0.8	95.3	27.6	11	11	36	0.00013034	0	3.11	0	5.5	95.3	37.6	23	95.3	37.6	23	0	10
G_STA.ROSA_2	30	13.8	0.6	225	18.3	13	20	10	0.00127087	-11	24	0	18	225	18.3	13	210	56	13	0	11
G_Calope_1	10.4	6.9	0.92	100	30	10	20	10	0.00032045	-1	2	0	10	137	33	13.23	76	76	13.23	0	10
G_Calope_2	10.4	6.9	0.92	100	30	10	20	10	0.00032045	-1	2	0	10	137	33	13.23	76	76	13.23	0	10
La Esperanza	3.4	4.16	0.95	100	40	20	29.28	8.9	0.00071258	-1.5	2	0	3.3	154.75	44.32	28.27	147.87	147.87	31.7	0	10
La Esperanza_2	3.4	4.16	0.95	100	40	20	29.28	8.9	0.00071258	-1.5	2	0	3.3	154.75	44.32	28.27	147.87	147.87	31.7	0	10
G_PosaHonda_2	1.65	4.16	0.95	130	30	20	27.38	0.76	0.00146836	-0.66	1.155	0	1.6	143.49	34.88	25.48	139.35	139.35	29.28	0	10
G_PozaHonda	1.65	4.16	0.95	130	30	20	27.38	0.76	0.00146836	-0.66	1.155	0	1.6	143.49	34.88	25.48	139.35	139.35	29.28	0	10
G_AGOYAN_1	85	13.8	0.94	105	30	22	20	10	0	-10	30	0	79.9	105	30	22	68	68	29	0	0
G_AGOYAN_2	85	13.8	0.94	105	30	22	20	10	0	-10	30	0	79.9	105	30	22	68	68	29	0	0
Guangopolo_H	2.5	6.3	0.8	100	25	15	0.2	0.18	0.00238378	-0.53	0.53	0	2	104	26	17.5	75	26	17.5	0	10
G_Chillos_H	2	6.3	0.8	100	30	30	0.2	0.1	0.00595946	-0.21	0.5	0	1.6	110	34	10	80	80	10	0	10
G_ELCARMEN	10	6.6	0.8	160	25	14	20	10	0.008712	0	41	0	8	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_Pasochoa_H	2.8	6.3	0.8	100	30	30	20	18	0.00185603	-0.18	0.45	0	2.25	110	34	30	80	80	30	0	10
G_Guangopolo_T7	1.88	6.6	0.8	93	34	20	23	10	0.00463868	0	0.85	0	1.5	95.3	37.6	23	95.3	37.6	23	0	10
G_COCA_U1	6.75	13.8	0.8	95.3	27.6	11	11	36	0.00013034	0	3.11	0	5.5	95.3	37.6	23	95.3	37.6	23	0	10
G_JIVINO_U1	6.75	13.8	0.8	95.3	27.6	11	11	36	0.00013034	0	3.11	0	5.5	95.3	37.6	23	95.3	37.6	23	0	10
G_VICTORIA_TRI	142	13.8	0.9	165	18	15	20	10	0.00020137	-25	50	0	127.8	171.7	20.3	17.6	166.3	33.7	17.6	0	11.3
G_TV2_GZ	85.883	13.8	0.85	140	20	12	14.64	8.6	0.00026636	-10	42	0	73	156	24.62	14.74	156	24.62	14.74	0	8

G_TG5_GASAN	28.5	13.8	0.85	170	15	10	20	10	0.00066888	-3	7	15	24	180	18	11	180	18	11	0	9
G_TG1_GASAN	25	13.8	0.85	180	25	11	20	10	0.00083877	-2.5	6	0	20	197	28	15	197	28	15	0	10
G_TG3_GASAN	25	13.8	0.85	185	20	11	20	10	0.00083877	-2.5	6	5	20	197	28	15	197	28	15	0	9
G_TG2_GASAN	25	13.8	0.85	180	25	11	20	10	0.00083877	-2.5	6	5	22	197	28	15	197	28	15	0	10
G_A.TINAJERO_2	48	13.8	0.85	200	16	11	20	10	0.00043686	0	25	10	40	209	18.1	12.4	209	18.1	12.4	0	10
G_TV3_GZ	85.833	13.8	0.85	150	20	12	14.64	8.6	0.00026651	-10	42	0	72	156	24.62	14.74	156	24.62	14.74	0	10
G_TG4_GZ	36.4	13.8	0.85	230	20	14	20	10	0.00073319	-10	20	5	30	238	23.5	16.5	224	30.6	16.5	0	12
G_TG6_GASAN	29.6	13.8	0.85	175	22	15	16.4	9.4	0.00096603	-3	7	5	25	186.7	25.6	17.4	176	45.3	17.4	0	10
G_TV1_VASAN	36.67	13.8	0.9	125	22	11	20	10	0.00057184	-10	10	10	33	135	24	13	135	24	13	0	7
G_A.TINAJERO_1	60	13.8	0.9	234.6	21.8	13.5	20	9.7	0	0	25	0	54	234.6	21.8	13.5	234.6	21.8	13.5	0	10
SFRAN_U2	125.7	13.8	0.9	105	0	22	23	9	0.00023332	-20.11	40	0	113	110	28	17	71	71	21	0	10
SFRAN_U1	125.7	13.8	0.9	105	0	22	23	9	0.00023332	-20.11	40	0	113	110	28	17	71	71	21	0	10
G_EQUIL_4	57.41	13.8	0.9	220	21	16	20	10	0.00053128	-5	10	0	50	239.5	23.4	17.1	219	33	17.1	0	10
G_EQUIL_3	57.41	13.8	0.85	230	30	15	20	10	0.00049808	-5	10	0	50	239.5	23.4	17.1	219	33	17.1	0	10
G_CUENCA_69	70	69	0.9	105	25	22	20	10	0.01497812	-9	21	0	63	115	30	29	60	60	29	0	10
G_GNR_U1	5.1	13.8	0.85	120	18	10	0.1	0.033	0.00373786	-2.44	3.25	1	4.3	135	22	12	135	22	12	0	10
G_NAYON_1	16.5	6.9	0.9	160	25	15	20	7.3	0.00043325	-1	12	0	0	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_CUMBAYA_H1	11.2	4.16	0.9	101.2	0	20	20	10	0	-1	3.02	0	10	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_AMBATO	8.66	69	0.9	95	30	18	20	10	0.09905749	0	1.2	0	7.794	100	35	20	75	75	20	0	10
G_BABAHOYO	8.8	69	0.8	165	35	18	20	10	0.09748157	-1	1	0	7	180	40	20	170	70	20	0	10
G_PAPALLACTA	15.5	6.9	0.95	165	25	15	20	10	0.0004612	-2.22	6.68	0	14.7	179.3	30	20	155.3	155.3	20	0	10
G_RECUPERADORA	16.484	13.8	0.91	95.3	27	20	11	10	0	-7	2	-	100000	95.3	27	20	57	57	20	10	10
G_PASCUA	110	13.8	0.95	178.8	23.5	19.7	20	10	0	-10	20	0	104.5	178.8	23.5	19.7	157.5	30.6	19.7	0	10
G_LOJA	20	69	0.85	105	28	12	20	10	0.02859459	0	9.2	0	17	115	30	14	60	60	14	0	10
PBI_3	15.313	13.8	0.8	135	0	12	20	10	0	-1.53	6.12	3	12	202	52	24	202	52	24	0	10
PBI_1	15.313	13.8	0.8	135	0	12	20	10	0	-1.53	6.12	3	12	202	52	24	202	52	24	0	10
G_LULUNCOTO_T	3.375	6.3	0.8	180	25	15	23	2.6	0.00176577	0	1.55	0	2.7	190	28.5	18	110	28.5	18	0	10
G_MACHALA	15	69	0.9	90	25	18	20	10	0.05718919	-1	4	0	0	95.3	27.6	20	57	47	20	0	10
G_EQUIL_2	57.412	13.8	0.85	220	15	10	17.7	9.06	0.00033204	-5.7	7.5	0	48	238.5	18	12.4	238.5	18	12.4	0	10
G_EQUIL_1	57.412	13.8	0.85	220	15	10	17.7	9.06	0.00033204	-5.7	10.3	0	48	238.5	18	12.4	238.5	18	12.4	0	10
G_RIOBAMBA	20	69	0.9	100	25	18	20	10	0.04289189	-4.25	4.25	0	0	100	30	20	75	75	20	0	10
G_MULALO	12	69	0.8	95	30	18	20	10	0.07148649	0	4.444445	0	8.4	100	35	20	75	75	20	0	10
G_GUANGO_T6	6.5	6.6	0.8	90	34	20	23	10	0.00134165	0	3	0	5.2	95.3	37.6	23	95.3	37.6	23	0	10

G_NAYON_2	16.5	6.9	0.9	160	25	15	20	7.3	0.00043325	-1	12	0	0	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_NAYON_3	16.5	6.9	0.9	160	25	15	20	7.3	0.00043325	-1	12	0	13	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_CUMBAYA_H4	11.2	4.16	0.9	101.2	0	20	20	10	0	-1	3.02	0	10	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_CUMBAYA_H3	11.2	4.16	0.9	101.2	0	20	20	10	0	-1	3.02	0	10	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_CUMBAYA_H2	11.2	4.16	0.9	101.2	0	20	20	10	0	-1	3.02	0	10	179.3	26.7	15.7	175.7	175.7	15.7	0	10
G_PAUTE_5	116.67	13.8	0.9	100	30	8.5	20	10	0.00197809	-42	63	0	105	109	35	9.75	74	74	9.75	0	10
G_PAUTE_4	116.67	13.8	0.9	100	30	8.5	20	10	0.00197809	-42	63	0	105	109	35	9.75	74	74	9.75	0	10
G_PAUTE_3	116.67	13.8	0.9	100	30	8.5	20	10	0.00197809	-42	63	0	105	109	35	9.75	74	74	9.75	0	10
G_PAUTE_2	116.67	13.8	0.9	100	30	8.5	20	10	0.00197809	-42	63	0	105	109	35	9.75	74	74	9.75	0	10
G_PAUTE_1	116.67	13.8	0.9	100	30	8.5	20	10	0.00197809	-42	63	0	105	109	35	9.75	74	74	9.75	0	10
G_D.PERIPA_3	79	13.8	0.9	75	25	20	21	10	0.00036104	-30	40	0	71.1	85.32	37.77	23.94	56.97	56.97	30.86	0	10
G_D.PERIPA_2	79	13.8	0.9	75	25	20	21	10	0.00036104	-30	40	0	71.1	85.32	37.77	23.94	56.97	56.97	30.86	0	10
G_D.PERIPA_1	79	13.8	0.9	75	25	20	21	10	0.00036104	-30	40	0	71.1	85.32	37.77	23.94	56.97	56.97	30.86	0	10
G_PUCARA_1	42.2	13.8	0.9	95	25	18	20	10	0.00081312	-15.825	15.825	0	37.98	97.8	27.5	20.4	59	59	20.4	0	10
PBII_2	15.313	13.8	0.8	135	0	12	20	10	0	-1.53	6.12	3	12	202	52	24	202	52	24	0	10
PBII_4	15.313	13.8	0.8	135	0	12	20	10	0	-1.53	6.12	3	12	202	52	24	202	52	24	0	10
G_ABANICO_U3	8.56	4.16	0.9	115	20	12	0.16	0.05	2.43E-05	-1	1.5	0	7.7	130	23	15	65	65	17	0	10
G_IBARRA_13.8	8.6	13.8	0.93	100	35	19.67	39.16	32.32	0	0	3	4	8	100	35	20	75	75	20	10	10
G_PAUTE_7	127.7	13.8	0.9	102.25	28.05	19.95	21.1	15	0.00309474	-60	60	0	114.93	102.25	28.05	19.92	63.34	63.34	24.04	0	10
G_PAUTE_8	127.7	13.8	0.9	102.25	28.05	19.95	21.1	15	0.00309474	-60	60	0	114.93	102.25	28.05	19.92	63.34	63.34	24.04	0	10
G_PAUTE_6	127.7	13.8	0.9	102.25	28.05	19.95	21.1	15	0.00309474	-60	60	0	114.93	102.25	28.05	19.92	63.34	63.34	24.04	0	10
G_TULCAN_13.8	4.8	13.8	0.9	100	35	13.5	18.48	65.71	0	0	2	0	4.3	100	35	20	75	75	20	10	10
G_PAUTE_9	127.7	13.8	0.9	102.25	28.05	19.95	21.1	15	0.00309474	-60	60	0	114.93	102.25	28.05	19.92	63.34	63.34	24.04	0	10
G_PAUTE_10	127.7	13.8	0.9	102.25	28.05	19.95	21.1	15	0.00309474	-60	60	0	0	102.25	28.05	19.92	63.34	63.34	24.04	0	10
G_PUCARA_2	42.2	13.8	0.9	95	25	18	20	10	0.00081312	-15.825	15.825	0	37.98	97.8	27.5	20.4	59	59	20.4	0	10
G_ABANICO_U1	8.56	4.16	0.9	115	20	12	0.16	0.05	2.43E-05	-1	1.5	0	7.7	130	23	15	65	65	17	0	10
G_ECUDOS	21.8	4.16	0.8	100	35	20	20	10	0	-2	4	2	15	100	35	20	75	40	20	0	10
G_S.CARLOS	20	13.8	0.85	100	35	20	20	10	0	-2	4	2	17	100	35	20	75	75	20	0	10
G_ECOELECTRIC	34.37	4.16	0.95	100	35	20	20	10	0	-2	6	2	32	100	35	20	75	40	20	0	10
G_SIBIMBE_U1	8.55	6.9	0.95	160	25	16	20	10	8.91E-05	-1	3.5	2	8	175	28	19	87	87	21	0	10
G_TPBARGEI	38.42	69	0.78	128	11	9	20	10	0.01116395	-6	24	0	0	135	13	12	130	34	12	0	7

ANEXO 4

PARÁMETROS DE MOTORES DC Y DE INDUCCIÓN PARA EL LABORATORIO

MOTORES DE INDUCCIÓN WEG [27]

Potencia		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor trabado I _L /I _n	Par con rotor trabado T _V /T _n	Par máximo T _b /T _n	Momento de Inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB(A)	RPM	220 V						Corriente nominal I _n (A)
								% de la potencia nominal											
								Rendimiento					Factor de potencia						
								50	75				100	50	75	100			
kW	HP																		
II Polos																			
0,12	0,16	63	0,034	5,5	3,1	3,2	0,0001	25	55	5,2	56	3400	49,0	57,5	61,5	0,50	0,61	0,70	0,732
0,18	0,25	63	0,052	5,3	2,7	2,7	0,0001	19	42	5,7	56	3350	58,0	63,0	65,0	0,57	0,70	0,79	0,920
0,25	0,33	63	0,073	5,2	2,9	2,8	0,0001	18	40	6,2	56	3340	62,0	66,0	67,0	0,57	0,71	0,80	1,22
0,37	0,5	63	0,107	6,0	2,7	2,7	0,0002	8	18	7,7	56	3370	64,0	68,0	69,0	0,58	0,71	0,80	1,73
0,55	0,75	71	0,159	5,8	2,6	2,7	0,0003	14	31	6,5	60	3370	69,0	73,0	73,0	0,66	0,79	0,86	2,30
0,75	1	71	0,214	6,6	3,3	3,3	0,0005	14	31	8,5	60	3420	75,0	75,5	75,5	0,64	0,76	0,84	3,10
1,1	1,5	80	0,314	7,4	3,4	3,3	0,0008	17	37	13,5	62	3415	79,0	82,0	82,6	0,66	0,78	0,84	4,16
1,5	2	80	0,432	6,9	3,2	3,1	0,0009	13	29	14,5	62	3385	81,0	83,2	84,0	0,66	0,79	0,85	5,51
2,2	3	90S	0,621	7,4	2,9	3	0,0020	10	22	18,5	68	3450	84,6	85,5	85,5	0,66	0,78	0,84	8,04
3	4	90L	0,847	7,4	3	3,1	0,0025	8	18	23,5	68	3450	85,0	85,5	85,5	0,66	0,78	0,84	11,0
3,7	5	100L	1,03	8,8	3,2	3,6	0,0064	12	26	32,0	71	3500	84,2	86,7	87,6	0,71	0,82	0,87	12,7
4,5	6	112M	1,26	7,2	2,2	3	0,0070	19	42	38,5	69	3480	86,8	88,0	88,5	0,76	0,85	0,89	15,0
5,5	7,5	112M	1,53	8,3	2,9	3,5	0,0081	12	26	40,0	69	3495	86,5	88,2	88,7	0,71	0,82	0,87	18,7
7,5	10	132S	2,08	7,2	2,2	2,9	0,0198	17	37	63,0	72	3515	88,0	89,4	89,6	0,75	0,84	0,88	25,0
9,2	12,5	132M	2,55	7,5	2,3	2,9	0,0234	15	33	70,0	72	3515	89,2	90,2	90,2	0,77	0,85	0,89	30,0
11	15	132M	3,04	8,3	2,6	3	0,0270	12	26	74,0	72	3520	89,6	90,5	90,5	0,75	0,84	0,88	36,2
15	20	160M	4,14	6,6	2	2,8	0,0426	12	26	104	72	3530	90,0	90,8	90,8	0,74	0,83	0,87	49,8
18,5	25	160M	5,10	6,8	2,1	2,9	0,0517	9	20	111	72	3530	91,0	91,5	91,5	0,74	0,83	0,87	61,0
22	30	160L	6,06	7,5	2,4	3	0,0626	8	18	124	72	3535	91,0	91,5	91,5	0,74	0,83	0,87	72,6
30	40	200M	8,23	6,4	2,1	2,4	0,1704	18	40	213	74	3550	91,5	92,4	92,4	0,74	0,83	0,86	99,0
37	50	200L	10,1	7,2	2,4	2,6	0,1788	14	31	232	74	3555	92,0	92,4	92,4	0,75	0,83	0,86	122
45	60	225S/M	12,3	7,8	2,2	2,9	0,2359	12	26	360	79	3560	91,8	93,0	93,5	0,78	0,86	0,89	142
55	75	225S/M	15,0	7,8	2,4	2,9	0,2752	12	26	380	79	3560	92,6	93,5	93,5	0,80	0,87	0,90	172
75	100	250S/M	20,5	7,7	2,6	2,7	0,3905	12	26	452	79	3560	93,1	93,6	93,6	0,79	0,86	0,88	238
90	125	280S/M	24,5	7,7	2	2,9	0,8991	20	44	650	81	3575	92,8	94,3	94,6	0,78	0,85	0,88	284
110	150	280S/M	30,0	7,5	2	2,7	1,03	15	33	682	81	3575	93,5	94,5	94,8	0,80	0,86	0,89	342
132	180	315S/M	35,9	7,6	2	2,8	1,60	20	44	879	81	3580	93,0	94,5	95,0	0,76	0,84	0,87	420
150	200	315S/M	40,8	7,9	2,1	2,9	1,88	15	33	931	81	3580	93,5	94,8	95,2	0,77	0,85	0,88	470
185	250	315S/M	50,3	7,9	2,2	2,8	2,24	16	35	1011	81	3580	94,8	95,3	95,6	0,80	0,87	0,89	570
200	270	355M/L	54,3	8,0	1,6	2,8	3,45	24	53	1376	84	3585	94,5	95,6	95,6	0,80	0,87	0,90	610
220	300	355M/L	59,8	8,2	1,8	2,9	3,56	18	40	1422	84	3585	94,8	95,6	95,6	0,81	0,88	0,90	672
260	350	355M/L	70,6	8,0	2	2,7	4,09	26	57	1534	84	3585	95,2	95,6	95,6	0,85	0,90	0,91	784
300	400	355M/L	81,5	8,0	2,1	2,6	4,83	22	48	1655	84	3585	95,4	95,6	95,6	0,87	0,91	0,92	896
330	450	355M/L	89,7	8,0	2	2,6	5,36	22	48	1753	84	3585	95,5	95,6	95,6	0,87	0,91	0,92	984
370	500	355M/L	101	8,4	2	2,8	6,01	15	33	1853	84	3585	95,6	96,1	96,2	0,87	0,91	0,92	1100
400	550	355M/L	109	8,4	2,3	2,8	6,01	15	33	1869	84	3585	95,7	96,2	96,3	0,84	0,89	0,91	1200
440	600	355A/B	120	7,8	2,5	2,9	6,54	28	62	2000	89	3585	96,0	96,5	96,5	0,84	0,89	0,90	1360
480	650	355A/B	130	8,0	2,3	2,6	7,40	48	106	2102	89	3585	96,1	96,6	96,6	0,86	0,90	0,91	1430
515	700	355A/B*	140	7,6	2,3	2,6	7,72	28	62	2179	89	3585	96,2	96,6	96,6	0,86	0,90	0,91	1540

Potencia		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor trabado I/In	Par con rotor trabado Tl/Tn	Par máximo Tl/Tn	Momento de Inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB(A)	220 V							
								Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal						Corriente nominal In (A)
													Rendimiento			Factor de potencia			
kW	HP											50	75	100	50	75	100		
N Polos																			
0,12	0,16	63	0,068	4,6	2,5	3,1	0,0004	37	81	6,2	48	1715	50,0	57,0	61,0	0,44	0,55	0,64	0,807
0,18	0,25	63	0,103	4,7	2,4	2,9	0,0006	30	66	7,2	48	1705	57,0	64,0	67,0	0,47	0,59	0,68	1,04
0,25	0,33	63	0,143	5,0	2,6	3	0,0007	25	55	8,2	48	1705	62,0	68,0	70,0	0,47	0,60	0,69	1,36
0,37	0,5	71	0,215	4,6	2,4	2,5	0,0007	35	77	8,0	47	1680	68,0	71,0	72,0	0,50	0,63	0,72	1,87
0,55	0,75	71	0,319	5,1	2,9	2,9	0,0008	31	68	11,5	47	1680	71,0	74,5	75,0	0,50	0,63	0,72	2,67
0,75	1	80	0,423	7,3	3	3,2	0,0029	16	35	13,5	48	1725	79,0	82,0	82,6	0,61	0,72	0,80	2,98
1,1	1,5	90S	0,612	7,5	2,2	3	0,0049	16	35	18,5	51	1750	81,0	83,5	84,0	0,57	0,70	0,78	4,40
1,5	2	90S	0,835	7,1	2,2	3	0,0049	11	24	18,5	51	1750	81,0	83,5	84,2	0,57	0,70	0,78	6,00
2,2	3	L90L	1,22	7,4	2,8	3,1	0,0077	11	24	25,0	51	1750	86,0	86,5	87,5	0,61	0,74	0,81	8,12
3	4	100L	1,70	6,7	2,8	3	0,0096	16	35	33,0	54	1720	86,4	87,2	87,5	0,61	0,74	0,81	11,1
3,7	5	100L	2,08	8,0	3	3,6	0,0104	11	24	34,0	54	1735	85,0	87,0	88,0	0,59	0,72	0,80	13,8
4,5	6	112M	2,52	6,2	2,1	2,8	0,0155	19	42	42,0	56	1740	88,0	88,5	88,5	0,62	0,74	0,81	16,5
5,5	7,5	112M	3,08	6,3	2,1	2,7	0,0180	15	33	44,0	56	1740	88,4	89,1	90,0	0,59	0,72	0,79	20,4
7,5	10	132S	4,15	7,9	2	3,2	0,0489	12	26	68,0	58	1760	90,0	90,8	91,0	0,66	0,78	0,84	25,8
9,2	12,5	132M	5,09	8,0	2	3,1	0,0601	9	20	75,0	58	1760	90,0	90,8	91,0	0,67	0,79	0,84	31,6
11	15	132M/L	6,09	8,2	2,1	3,2	0,0638	8	18	80,0	58	1760	90,5	91,2	91,7	0,67	0,79	0,85	37,0
15	20	160M	8,23	6,8	2,7	3	0,1188	11	24	120	64	1775	91,0	92,4	92,4	0,64	0,75	0,81	52,6
18,5	25	160L	10,2	6,8	2,7	3	0,1397	10	22	135	64	1765	92,0	92,8	92,8	0,64	0,75	0,81	64,6
22	30	180M	12,1	6,4	2,3	2,7	0,1657	19	42	168	64	1765	92,5	92,8	93,0	0,71	0,81	0,84	74,0
30	40	200M	16,5	6,2	2	2,3	0,2406	18	40	195	66	1770	92,7	93,2	93,4	0,72	0,81	0,85	99,2
37	50	200L	20,4	6,2	2,5	2,6	0,3074	14	31	227	66	1770	93,0	93,2	93,6	0,72	0,80	0,85	122
45	60	225S/M	24,7	7,2	2,4	2,6	0,4931	12	26	367	67	1775	93,5	93,7	94,1	0,76	0,83	0,86	146
55	75	225S/M	30,2	7,2	2,4	2,6	0,5670	12	26	386	67	1775	93,9	94,2	94,4	0,77	0,84	0,87	176
75	100	250S/M	41,0	7,2	2,4	2,8	0,8740	12	26	470	68	1780	94,0	94,5	94,6	0,71	0,81	0,85	244
90	125	280S/M	49,1	7,2	2,1	2,6	1,56	20	44	636	73	1785	94,0	94,8	94,9	0,73	0,82	0,85	292
110	150	280S/M	60,0	7,3	2,1	2,6	1,87	18	40	684	73	1785	94,3	94,8	95,2	0,75	0,83	0,86	352
132	180	315S/M	71,8	7,1	2,1	2,4	2,57	18	40	903	75	1790	94,0	95,0	95,3	0,74	0,82	0,85	428
150	200	315S/M	81,6	7,0	2,2	2,3	2,89	20	44	947	75	1790	94,5	95,5	95,5	0,75	0,83	0,86	480
185	250	315S/M	101	7,0	2,2	2,3	3,44	18	40	1018	75	1790	95,0	95,5	95,7	0,77	0,84	0,87	584
200	270	355M/L	109	7,0	2,2	2,2	4,88	20	44	1291	78	1790	94,8	95,6	95,8	0,77	0,84	0,86	638
220	300	355M/L	120	7,2	2,2	2,3	5,42	23	51	1350	78	1790	95,2	95,8	95,9	0,77	0,84	0,86	700
260	350	355M/L	141	7,3	2	2,2	6,30	15	33	1431	78	1790	95,4	96,0	96,0	0,77	0,84	0,87	816
300	400	355M/L	163	7,0	2,4	2,3	7,20	14	31	1527	78	1790	95,7	96,1	96,1	0,77	0,84	0,87	942
330	450	355M/L	180	7,0	2,1	2,3	8,61	19	42	1662	78	1790	96,0	96,1	96,1	0,77	0,83	0,86	1050
370	500	355M/L	201	7,6	2,6	2,6	10,2	12	26	1833	78	1790	96,0	96,1	96,1	0,75	0,82	0,85	1190
400	550	355M/L	218	7,3	2,5	2,6	11,1	14	31	1916	78	1790	96,1	96,4	96,4	0,74	0,82	0,86	1270
440	600	355M/L	239	7,1	2,2	2,5	11,6	16	35	1966	78	1790	96,2	96,4	96,5	0,74	0,82	0,86	1430
480	650	355A/B	261	7,4	2,5	2,7	12,7	22	48	1993	81	1790	96,0	96,5	96,6	0,71	0,81	0,85	1530
515	700	355A/B	280	7,4	2,6	2,7	13,4	26	57	2079	81	1790	96,2	96,5	96,6	0,71	0,81	0,85	1650
550	750	355A/B	299	7,6	2,7	2,7	14,6	22	48	2246	81	1790	96,3	96,6	96,7	0,70	0,80	0,85	1760

Potencia		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor trabado I/In	Par con rotor trabado TV/Tn	Par máximo Tb/Tn	Momento de inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB(A)	220V							
								Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal			Corriente nominal In (A)			
													Rendimiento		Factor de potencia				
kW	HP											50	75	100	50	75	100		
VI Polos																			
0,12	0,16	63	0,104	3,4	2,0	2,1	0,0006	43	95	7,7	47	1120	41,0	48,0	52,0	0,41	0,50	0,59	1,03
0,18	0,25	71	0,161	3,2	2	2,1	0,0006	58	128	7,5	47	1090	48,0	55,0	58,0	0,40	0,50	0,59	1,38
0,25	0,33	71	0,223	3,3	2	2	0,0008	57	125	8,0	47	1090	53,0	61,0	62,0	0,41	0,52	0,61	1,73
0,37	0,5	80	0,323	4,1	1,8	2,1	0,0024	20	44	11,5	47	1115	58,0	63,0	64,0	0,51	0,64	0,74	2,05
0,55	0,75	80	0,480	4,6	2,3	2,4	0,0032	21	46	14,5	47	1115	63,0	68,0	70,0	0,50	0,63	0,73	2,82
0,75	1	90S	0,641	5,5	2,4	2,6	0,0055	24	53	19,0	49	1140	76,0	79,0	80,5	0,50	0,63	0,72	3,40
1,1	1,5	100L	0,924	6,4	2,4	3	0,0143	49	108	33,0	48	1160	81,5	84,3	85,5	0,47	0,60	0,69	4,90
1,5	2	112M	1,26	6,9	2,5	3	0,0220	40	88	40,0	52	1160	84,0	86,0	86,5	0,50	0,63	0,71	6,40
2,2	3	112M	1,86	6,9	2,7	3	0,0257	30	66	42,0	52	1155	85,2	86,9	87,5	0,51	0,64	0,72	9,16
3	4	132S	2,51	6,2	1,8	2,6	0,0416	44	97	60,0	55	1165	86,0	87,5	87,5	0,52	0,64	0,72	12,5
3,7	5	132S	3,09	6,3	1,8	2,6	0,0492	41	90	62,0	55	1165	87,1	87,7	87,7	0,53	0,66	0,73	15,2
4,5	6	132S	3,78	6,0	2,3	2,4	0,0530	34	75	63,0	55	1160	87,0	88,0	88,0	0,55	0,67	0,74	18,1
5,5	7,5	132M	4,60	6,6	2	2,8	0,0679	35	77	80,0	55	1165	88,4	89,5	89,5	0,52	0,65	0,73	22,0
7,5	10	132M/L	6,30	6,0	2,2	2,4	0,0757	21	46	90,0	55	1160	88,0	89,5	89,5	0,58	0,70	0,77	28,6
9,2	12,5	160M	7,66	6,0	2	2,5	0,1141	15	33	109	59	1170	89,0	89,5	89,5	0,64	0,76	0,82	32,8
11	15	160M	9,12	6,5	2,3	2,8	0,1492	13	29	122	59	1175	89,7	91,0	91,0	0,62	0,74	0,80	39,6
15	20	160L	12,4	6,5	2,4	2,8	0,1839	9	20	137	59	1175	90,0	91,0	91,3	0,62	0,74	0,80	53,8
18,5	25	180L	15,3	8,5	2,5	3	0,2700	7	15	177	59	1175	92,0	92,4	92,4	0,69	0,80	0,86	61,0
22	30	200L	18,2	6,1	2,1	2,5	0,3686	14	31	218	62	1175	92,2	92,4	92,4	0,65	0,76	0,81	77,2
30	40	200L	24,9	6,0	2	2,4	0,4380	13	29	228	62	1175	92,5	93,0	93,4	0,65	0,76	0,81	104
37	50	225S/M	30,5	7,0	2,1	2,5	0,7511	12	26	374	66	1180	92,6	93,5	93,6	0,71	0,80	0,84	123
45	60	250S/M	37,1	7,0	2,3	2,6	1,01	12	26	435	68	1180	93,6	93,8	93,8	0,70	0,80	0,83	152
55	75	250S/M	45,2	7,2	2,4	2,6	1,24	10	22	469	68	1185	93,7	94,0	94,1	0,70	0,80	0,84	183
75	100	280S/M	61,6	6,0	2	2,3	2,36	16	35	641	69	1185	93,9	94,2	94,4	0,70	0,80	0,83	252
90	125	280S/M	74,0	6,0	2	2,3	2,69	14	31	678	69	1185	94,4	94,6	94,7	0,69	0,79	0,83	300
110	150	315S/M	90,0	6,0	2	2,2	4,90	21	46	946	70	1190	94,5	95,1	95,1	0,70	0,79	0,83	366
132	180	315S/M	108	6,3	2,1	2,3	5,45	18	40	990	70	1190	94,6	95,1	95,3	0,70	0,79	0,83	438
150	200	315S/M	123	6,5	2,2	2,3	6,16	16	35	1044	70	1190	94,8	95,3	95,4	0,69	0,79	0,83	498
185	250	355M/L	151	6,2	2	2,1	8,35	30	66	1455	77	1190	95,0	95,4	95,5	0,69	0,78	0,81	628
200	270	355M/L	164	6,4	2	2,1	9,30	24	53	1525	77	1190	95,0	95,5	95,5	0,70	0,79	0,81	678
220	300	355M/L	180	6,3	2	2,1	9,72	30	66	1570	77	1190	95,2	95,5	95,6	0,68	0,78	0,81	746
260	350	355M/L	213	6,4	1,9	2,1	12,2	28	62	1769	77	1190	95,3	95,5	95,7	0,68	0,78	0,81	880
300	400	355M/L	246	6,3	1,8	2,1	14,3	26	57	1927	77	1190	95,4	95,7	95,7	0,67	0,77	0,80	1030
330	450	355M/L	270	6,3	2,2	2,1	15,0	26	57	1989	77	1190	95,5	95,7	95,7	0,67	0,77	0,80	1130
370	500	355M/L	303	6,3	2,2	2,3	15,0	25	55	1989	77	1190	95,5	95,7	95,7	0,63	0,74	0,79	1280
400	550	355A/B	327	6,5	2,2	2,3	16,4	30	66	2147	77	1190	95,2	96,0	96,1	0,63	0,74	0,79	1380
440	600	355A/B	360	6,5	2,2	2,3	18,9	31	68	2346	77	1190	95,4	96,1	96,2	0,63	0,74	0,79	1550

Potencia		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor trabado I/In	Par con rotor trabado TV/Tn	Par máximo Tb/Tn	Momento de Inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB(A)	220V							
								RPM	% de la potencia nominal			Corriente nominal In (A)							
									Rendimiento				Factor de potencia						
KW	HP							Caliente	Frio			50	75	100	50	75	100		
VIII Polos																			
0,12	0,16	71	0,145	2,8	1,8	2,0	0,0008	120	264	9,0	45	805	43,0	51,0	53,0	0,33	0,41	0,49	1,21
0,18	0,25	80	0,209	3,6	2	2,2	0,0024	40	88	11,5	46	840	46,0	53,0	56,0	0,43	0,53	0,62	1,36
0,25	0,33	80	0,290	3,7	2,1	2,3	0,0029	39	86	13,5	46	840	52,0	58,0	59,0	0,42	0,53	0,63	1,77
0,37	0,5	90S	0,429	3,4	1,7	2,3	0,0049	39	86	18,0	47	840	58,0	63,0	65,0	0,40	0,51	0,60	2,48
0,55	0,75	90L	0,642	3,5	1,9	2,3	0,0055	37	81	21,5	47	835	62,0	65,0	66,0	0,40	0,52	0,60	3,64
0,75	1	90L	0,875	3,8	2	2,2	0,0066	27	59	23,0	47	835	64,0	68,0	70,0	0,42	0,54	0,62	4,54
1,1	1,5	100L	1,25	4,6	2	2,5	0,0127	38	84	30,5	54	855	73,0	78,0	78,0	0,40	0,52	0,61	6,06
1,5	2	112M	1,71	5,3	2,4	2,5	0,0220	43	95	40,0	54	855	80,0	83,0	83,5	0,48	0,62	0,70	6,74
2,2	3	132S	2,49	5,9	2	2,3	0,0740	47	103	65,0	52	860	82,5	84,5	84,5	0,53	0,65	0,74	9,24
3	4	132M	3,40	6,4	2,4	2,7	0,0838	32	70	75,0	52	860	83,0	84,5	85,1	0,51	0,64	0,73	12,7
3,7	5	132M/L	4,19	5,9	2,2	2,5	0,1033	28	62	90,0	52	860	83,0	85,0	85,6	0,52	0,65	0,73	15,5
4,5	6	160M	4,98	5,1	1,9	2,4	0,1053	30	66	107	54	880	85,5	87,0	87,0	0,48	0,61	0,69	19,7
5,5	7,5	160M	6,09	5,0	1,8	2,3	0,1317	25	55	117	54	880	86,5	88,0	87,5	0,51	0,53	0,71	23,2
7,5	10	160L	8,35	5,0	1,9	2,3	0,1668	25	55	135	54	875	88,0	89,5	89,5	0,51	0,64	0,71	31,0
9,2	12,5	180M	10,2	6,8	2	2,6	0,2029	11	24	156	54	875	89,5	90,0	90,0	0,60	0,72	0,78	34,4
11	15	180L	12,2	7,0	2,1	2,7	0,2299	9	20	171	54	875	89,5	90,4	90,4	0,60	0,72	0,78	41,0
15	20	180L	16,7	7,0	2,2	2,7	0,2705	8	18	181	54	875	90,0	91,0	90,5	0,60	0,72	0,79	55,0
18,5	25	200L	20,6	4,5	1,7	1,8	0,3686	23	51	212	56	875	90,6	91,0	91,0	0,58	0,70	0,76	70,2
22	30	225S/M	24,2	6,7	1,9	2,5	0,6183	12	26	349	60	885	91,7	91,9	91,7	0,65	0,76	0,81	77,8
30	40	225S/M	33,0	6,8	2	2,6	0,7901	11	24	381	60	885	92,0	92,2	92,2	0,65	0,76	0,81	105
37	50	250S/M	41,0	6,8	2	2,9	1,06	10	22	442	60	880	92,6	92,7	92,6	0,64	0,76	0,81	129
45	60	250S/M	49,8	6,9	2	2,9	1,15	10	22	457	60	880	92,6	92,8	92,6	0,64	0,76	0,81	157
55	75	280S/M	60,5	6,0	1,9	2,1	2,48	17	37	648	63	885	93,2	93,9	93,5	0,63	0,74	0,78	198
75	100	280S/M	82,5	6,0	1,9	2,1	3,05	13	29	706	63	885	93,7	94,0	93,7	0,63	0,74	0,78	270
90	125	315S/M	98,5	5,8	1,8	2	5,11	25	55	967	66	890	93,9	94,2	94,2	0,67	0,77	0,79	318
110	150	315S/M	120	5,8	1,8	2	6,21	26	57	1043	66	890	94,0	94,5	94,5	0,67	0,77	0,79	386
132	180	355M/L	144	6,0	1,4	2,2	11,0	50	110	1424	75	895	94,3	95,0	95,0	0,63	0,74	0,79	462
150	200	355M/L	163	6,0	1,4	2,1	12,3	50	110	1511	75	895	94,5	95,2	95,2	0,63	0,74	0,79	524
185	250	355M/L	201	6,2	1,5	2,2	14,7	48	106	1653	75	895	94,6	95,3	95,3	0,64	0,75	0,80	636
220	300	355M/L	239	6,0	1,5	2,1	17,2	44	97	1793	75	895	94,8	95,5	95,5	0,66	0,76	0,80	756
260	350	355M/L	283	6,3	1,5	2,1	18,4	36	79	1955	75	895	95,0	95,5	95,5	0,66	0,76	0,80	894
300	400	355M/L*	326	6,3	1,8	2,4	19,9	33	73	1955	75	895	95,0	95,5	95,5	0,62	0,73	0,78	1060
330	450	355A/B	359	6,5	1,6	2,3	25,9	46	101	2395	75	895	95,2	95,7	95,8	0,63	0,74	0,80	1130

MOTORES DC Crompton Greaves [26]

RATED OUTPUT IN KW AT 1500 RPM	FRAME	RATED TORQUE IN Nm	RATED ARM. CURRENT	EFFICI- ENCY	FIELD POWER IN watt	MAX. FIELD WEAKENING SPEED	MAX. SAFE MECH. SPEED	MOMENT OF INERTIA IN kg-m ²	WEIGHT IN kg
2.5	ASBG100S	16	7.7	67	330	3350	5000	0.016	50
3.7	ASBG100M	24	11.2	70	330	3250	5000	0.02	61
5.5	ASBG100L	35	16	74	440	3100	5000	0.025	76
7.5	ASBG112M	48	21	78	363	3750	4500	0.042	115
11	ASBG132S	70	31	77	616	2400	4500	0.09	125
15	ASBG132M	95	41	80	616	2400	4500	0.11	145
18.5	ASBG132L	118	48.2	83	968	2200	4500	0.14	170
22.5	ASBG132L	143	59	84	968	2200	4500	0.14	170
30	ASBG160A	191	78	83	1694	3000	4000	0.29	290
40	ASBG160S	255	105	84	1232	2350	4000	0.32	320
56	ASBG160M	356	147	85	1254	1950	4000	0.38	365
60	ASBG160L	382	158	85	1474	3000	4000	0.46	428
70	ASBG180S	446	176	88	2310	3400	3500	0.6	460
80	ASBG180S	509	201	88	2310	3300	3500	0.7	520
100	ASBG180M	637	253	88	2376	3300	3500	0.7	520
115	ASBG200S	732	291	88	2420	2800	3000	1.2	610
125	ASBG200M	796	312	89	2640	3500	3000	1.3	690
135	ASBG200M	859	337	89	2640	3300	3000	1.3	690
150	ASBG200M	955	374	90	2640	3100	3000	1.3	690
158	ASBG200M	1006	394	90	2640	3100	3000	1.3	690
160	ASBG225S	1018	400	89	2860	2460	3000	2.2	880
180	ASBG225S	1146	441	91	2860	2650	3000	2.5	990
210	ASBG225M	1337	513	92	3190	2320	3000	2.5	990
225	ASBG225M	1432	552	91	3190	2320	3000	2.5	990
235	ASBG250S	1496	571	92	3300	2250	2500	3.6	1160
270	ASBG250S	1719	658	92	3300	2025	2500	3.6	1160
280	ASBG250S	1782	682	92	3300	1980	2500	3.6	1160
295	ASBG250S	1878	719	92	3300	1980	2500	3.6	1160
325	ASBG250M	2069	790	93	3520	1990	2500	4.2	1320
400	ASBG280S	2546	965	93	4752	1710	2500	6.4	1560
450	ASBG280M	2864	1080	94	4180	1710	2500	7.5	1780

MGFRK 090-22

Technical data

Data refers to: – Form factor – Enclosure – Cooling (forced ventilation) – Continuous operation – Insulation class	$F_F = 1.05$ IP 54 IC 0541 S1 F
Total weight Inertia	$m = 21 \text{ kg}$ $J = 0.004 \text{ kgm}^2$
Field excitation	$U_F = 210 \text{ V } I_F = 0.60 \text{ A}$ $U_F = 360 \text{ V } I_F = 0.32 \text{ A}$
A-side bearing B-side bearing	6205-2RSR-C3 6205-2RSR-C3
Carbon brushes	a) 6.3 x 12.5 x 20
Permissible shaft load for $L/2$ and n_N – reinforced bearing	$F_r = 780 \text{ N}$ $F_a = 440 \text{ N}$ $F_{rr} = 2100 \text{ N}$
Fan variant	220-240 V, 50-60 Hz, 0.22 A 380-460 V, 50-60 Hz, 0.12 A
Cooling variant	IC 0641/0741
Cooling air volume Pressure drop	75 m ³ /h 36 Pa

Motores DC Lenze [25]

P kW	Speed n at voltage				η_F	η_{Mech}	M Nm	I_{AN} A	I_{Amax} A	L_A mH	R_a125° Ω	Carbon brushes			
	min ⁻¹											min ⁻¹		Quantity	Variant
	170 V	280 V	420 V	460 V											
0.33	–	550	–	–	1650	4500	5.5	2.3	7	156.2	54.38	4	a		
0.65	–	–	1100	–	3300	4500	5.5	2.3	7	156.2	54.38	4	a		
0.7	–	–	–	1250	3750	4500	5.5	2.3	7	156.2	54.38	4	a		
0.2	350	–	–	–	1050	4500	5.6	3.0	9	99.5	34.95	4	a		
0.5	–	800	–	–	2400	4500	5.6	3.0	9	99.5	34.95	4	a		
0.9	–	–	1500	–	4500	4500	5.6	3.0	9	99.5	34.95	4	a		
1.0	–	–	–	1650	4500	4500	5.6	3.0	9	99.5	34.95	4	a		
0.27	480	–	–	–	1450	4500	5.7	3.5	10	70.5	23.35	4	a		
0.6	–	1100	–	–	3300	4500	5.6	3.5	10	70.5	23.35	4	a		
1.1	–	–	1900	–	4500	4500	5.5	3.5	10	70.5	23.35	4	a		
1.2	–	–	–	2100	4500	4500	5.5	3.5	10	70.5	23.35	4	a		
0.4	650	–	–	–	1950	4500	5.7	4.4	13	46.6	16.05	4	a		
0.85	–	1450	–	–	4350	4500	5.7	4.4	13	46.6	16.05	4	a		
1.4	–	–	2400	–	4500	4500	5.6	4.4	13	46.6	16.05	4	a		
1.6	–	–	–	2700	4500	4500	5.6	4.4	13	46.6	16.05	4	a		
0.5	870	–	–	–	2600	4500	5.9	5.3	16	33.2	11.52	4	a		
1.1	–	1800	–	–	4500	4500	5.8	5.3	16	33.2	11.52	4	a		
1.8	–	–	2950	–	4500	4500	5.7	5.3	16	33.2	11.52	4	a		
2.0	–	–	–	3300	4500	4500	5.7	5.3	16	33.2	11.52	4	a		
1.0	1650	–	–	–	4500	4500	5.8	8.3	25	14.1	4.53	4	a		
1.8	–	3050	–	–	4500	4500	5.7	8.3	25	14.1	4.53	4	a		
1.9	3250	–	–	–	4500	4500	5.7	14.5	44	4.6	1.48	4	a		

Motores DC Lenze [25]

MGFRK 100-22

Technical data

Data refers to: – Form factor – Enclosure – Cooling (forced ventilation) – Continuous operation – Insulation class	$F_F = 1.05$ IP 54 IC 0541 S1 F
Total weight Inertia	$m = 28 \text{ kg}$ $J = 0.0061 \text{ kgm}^2$
Field excitation	$U_F = 210 \text{ V}$ $I_F = 0.70 \text{ A}$ $U_F = 360 \text{ V}$ $I_F = 0.37 \text{ A}$
A-side bearing B-side bearing	6306-2RSR-C3 6206-2RSR-C3
Carbon brushes	a) 8 x 12.5 x 20
Permissible shaft load for $L/2$ and n_N – reinforced bearing	$F_r = 1000 \text{ N}$ $F_a = 500 \text{ N}$ $F_{rr} = 2700 \text{ N}$
Fan variant	220-240 V, 50-60 Hz, 0.16 A 380-460 V, 50-60 Hz, 0.06 A
Cooling variant	IC 0641/0741
Cooling air volume Pressure drop	105 m ³ /h 41.4 Pa

Motores DC Lenze [25]

P kW	Speed n at voltage				η_f	η_{Mech}	M Nm	I_{AN} A	I_{Amax} A	L_A mH	$R_{a,125^\circ}$ Ω	Carbon brushes			
	min ⁻¹											min ⁻¹		Quantity	Variant
	170 V	280 V	420 V	460 V											
0.5	–	530	–	–	1600	4500	8.6	2.8	9	143.7	35.09	4	a		
0.85	–	–	940	–	2800	4500	8.6	2.8	9	143.7	35.09	4	a		
0.95	–	–	–	1050	3150	4500	8.6	2.8	9	143.7	35.09	4	a		
0.35	350	–	–	–	1050	4500	8.7	3.7	12	80.8	19.6	4	a		
0.7	–	800	–	–	2400	4500	8.5	3.7	12	80.8	19.6	4	a		
1.2	–	–	1400	–	4050	4500	8.4	3.7	12	80.8	19.6	4	a		
1.35	–	–	–	1550	4500	4500	8.4	3.7	12	80.8	19.6	4	a		
0.55	600	–	–	–	1800	4500	8.5	5.0	15	43.8	10.7	4	a		
1.1	–	1200	–	–	3600	4500	8.4	5.0	15	43.8	10.7	4	a		
1.7	–	–	1900	–	4500	4500	8.2	5.0	15	43.8	10.7	4	a		
1.9	–	–	–	2150	4500	4500	8.2	5.0	15	43.8	10.7	4	a		
0.7	800	–	–	–	2400	4500	8.3	6.0	18	29.3	6.91	4	a		
1.3	–	1500	–	–	4500	4500	8.2	6.0	18	29.3	6.91	4	a		
2.1	–	–	2400	–	4500	4500	8.1	6.0	18	29.3	6.91	4	a		
2.3	–	–	–	2700	4500	4500	8.1	6.0	18	29.3	6.91	4	a		
0.85	900	–	–	–	2700	4500	8.6	7.0	21	22.6	5.7	4	a		
1.5	–	1700	–	–	4500	4500	8.4	7.0	21	22.6	5.7	4	a		
2.4	–	–	2750	–	4500	4500	8.3	7.0	21	22.6	5.7	4	a		
2.7	–	–	–	3100	4500	4500	8.3	7.0	21	22.6	5.7	4	a		
1.0	1100	–	–	–	3300	4500	8.4	7.9	24	17.7	4.25	4	a		
1.85	–	2100	–	–	4500	4500	8.4	7.9	24	17.7	4.25	4	a		
2.9	–	–	3300	–	4500	4500	8.3	7.9	24	17.7	4.25	4	a		
3.1	–	–	–	3600	4500	4500	8.3	7.9	24	17.7	4.25	4	a		
1.6	1800	–	–	–	4500	4500	8.9	12.3	36	7.7	1.84	4	a		
2.85	–	3200	–	–	4500	4500	8.6	12.3	36	7.7	1.84	4	a		
2.7	3000	–	–	–	4500	4500	8.6	18.6	56	3.2	0.755	4	a		

Motores DC Lenze [25]

ANEXO 5

PARÁMETROS DE GENERADORES SINCRÓNICOS PARA EL LABORATORIO WEG [29]

Alternadores Trifásicos con Conexión Monofásica

12 Terminales / 4 Polos

200 / 240 V (60 Hz) | 190 / 220 V (50 Hz) | $\text{Cos}\phi$ 1,0

Modelo	ΔT	60 Hz					50 Hz				
		200 - 240 V*					190 - 200 V*				
		80°C	105°C	125°C	150°C	163°C	80°C	105°C	125°C	150°C	163°C
GTA161AISR	kVA	6.5	7.5	8.5	9.0	9.5	4.5	5.5	6.1	6.5	6.5
GTA161AIHS		8.0	9.0	10.1	11.0	11.0	6.0	7.0	8.1	8.5	9.0
GTA161AIHH		9.0	10.5	11.6	12.5	13.0	7.0	8.0	8.8	9.5	10.0
GTA161AIHI		11.0	13.0	14.3	15.5	16.0	8.0	9.5	10.5	11.0	11.5
GTA161AIHJ		12.0	13.5	15.0	16.0	17.0	10.0	11.5	12.7	13.5	14.0
GTA162AMD		18.0	21.0	23.1	25.0	26.0	13.5	15.5	17.1	18.5	19.0
GTA201AIHS	kVA	23.9	27.4	29.9	32.8	34.1	19.0	21.8	23.8	26.1	27.2
GTA201AIHV		31.0	35.5	38.8	42.5	44.3	23.3	26.7	29.2	31.9	33.3
GTA201AIHB		37.7	43.1	47.1	51.6	53.8	26.4	30.2	33.0	36.1	37.7
GTA201AIHE		38.7	44.4	48.4	53.0	55.3	33.0	37.8	41.3	45.2	47.1
GTA202AIVJ		62.0	71.1	77.5	85.0	88.6	46.6	53.4	58.3	63.9	66.6
GTA251AIHD	kVA	77	88	96	105	110	62	71	77	84	88
GTA251AIHE		99	113	124	135	141	79	91	99	108	113
GTA252AMB		113	130	142	155	162	91	104	113	124	129
GTA252AIII		138	158	172	188	196	99	113	124	136	141
GTA252AIIR		160	184	200	220	229	124	142	155	170	177
GTA311AWS	kVA	177	202	221	242	252	135	155	169	185	193
GTA311AIM		207	238	259	284	296	154	176	193	211	220
GTA311AIIH		243	279	304	333	347	177	203	222	243	253
GTA312AIB		305	350	382	418	436	237	271	296	324	338
GTA312AIG		264	303	330	362	377	206	236	257	282	294
GTA312AIDI		353	405	442	484	505	275	315	344	377	393

12 Terminales / 4 Polos

480 / 240 V (60 Hz) | 440 / 220 V (60 Hz) | 380 / 190 V (60 Hz) | $\text{Cos}\phi$ 0,8

Modelo	ΔT	480V - Y					440V - Y					380V - Y				
		240V - YY					220V - YY					190V - YY				
		80°C	105°C	125°C	150°C	163°C	80°C	105°C	125°C	150°C	163°C	80°C	105°C	125°C	150°C	163°C
GTA161AISR	kVA	12.3	14.1	15.4	15.9	15.9	11.0	12.6	13.7	14.7	15.3	10.1	11.6	12.6	13.5	14.0
	kW	9.8	11.3	12.3	12.7	12.7	8.8	10.1	11.0	11.8	12.2	8.1	9.3	10.1	10.8	11.2
GTA161AIHS	kVA	14.6	16.8	18.3	19.6	20.3	14.0	16.0	17.5	18.7	20.0	12.0	13.7	14.9	16.0	16.6
	kW	11.7	13.4	14.6	15.7	16.2	11.2	12.8	14.0	15.0	16.0	9.6	11.0	11.9	12.8	13.3
GTA161AIHH	kVA	16.9	19.4	21.1	22.6	23.5	15.5	17.7	19.3	20.7	21.5	13.2	15.1	16.5	17.6	18.3
	kW	13.5	15.5	16.9	18.1	18.8	12.4	14.2	15.4	16.6	17.2	10.6	12.1	13.2	14.1	14.6
GTA161AIHI	kVA	20.8	23.8	26.0	28.5	29.7	20.2	23.2	25.3	27.1	28.1	15.9	18.2	19.9	21.3	22.1
	kW	16.6	19.0	20.8	22.8	23.8	16.2	18.6	20.2	21.7	22.5	12.7	14.6	15.9	17.0	17.7
GTA161AIHJ	kVA	21.8	25.0	27.3	30.0	31.1	20.1	23.0	27.0	28.0	29.0	17.7	20.3	23.0	25.0	26.0
	kW	17.4	20.0	21.8	24.0	24.9	16.1	18.4	21.6	22.4	23.2	14.2	16.2	18.4	20.0	20.8
GTA162AIVD	kVA	25.9	29.7	42.0	44.0	46.0	29.4	33.7	42.0	44.0	46.0	25.4	29.1	40.0	40.0	42.0
	kW	20.7	23.8	33.6	35.2	36.8	23.5	27.0	33.6	35.2	36.8	20.3	23.3	32.0	32.0	33.6
GTA201AIHS	kVA	43.4	49.7	54.3	59.5	62.0	40.8	46.7	51.0	55.8	58.2	35.2	40.3	44.0	48.2	50.2
	kW	34.7	39.8	43.4	47.6	49.6	32.6	37.4	40.8	44.6	46.6	28.2	32.2	35.2	38.6	40.2
GTA201AIHV	kVA	56.4	64.6	70.5	77.2	81.0	54.5	62.4	68.1	72.8	75.7	47.3	54.2	59.1	63.2	71.0
	kW	45.1	51.7	56.4	61.8	64.8	43.6	49.9	54.5	58.2	60.6	37.8	43.4	47.3	50.6	56.8
GTA201AIHB	kVA	68.5	78.5	85.6	92.2	92.2	60.4	69.2	75.5	80.7	85.0	56.8	65.1	71.0	75.9	78.9
	kW	54.8	62.8	68.5	73.8	73.8	48.3	55.4	60.4	64.6	68.0	45.4	52.1	56.8	60.7	63.1
GTA201AIHE	kVA	66.1	75.7	88.0	95.0	97.0	66.0	75.6	88.0	95.0	97.0	62.1	71.2	80.0	83.0	86.4
	kW	52.9	60.6	70.4	76.0	77.6	52.8	60.5	70.4	76.0	77.6	49.7	57.0	64.0	66.4	69.1
GTA202AMJ	kVA	107.2	122.8	141.0	144.0	150.0	105.4	120.7	141.0	144.0	150.0	93.8	107.5	123.0	129.0	136.0
	kW	85.8	98.2	112.8	115.2	120.0	84.3	96.6	112.8	115.2	120.0	75.0	86.0	98.4	103.2	108.8
GTA251AIHD	kVA	140	161	175	188	189	137	157	171	183	190	110	127	142	149	156
	kW	112	129	140	150	151	110	126	137	146	152	88	102	114	119	125
GTA251AIHE	kVA	180	206	225	243	252	171	196	214	230	240	154	176	192	205	214
	kW	144	165	180	194	202	137	157	171	184	192	123	141	154	164	171
GTA252AIVB	kVA	206	236	258	275	290	186	213	233	250	260	164	188	205	219	230
	kW	165	189	206	220	232	149	170	186	200	208	131	150	164	175	184
GTA252AIII	kVA	249	285	312	336	349	234	268	292	313	325	205	235	256	274	285
	kW	199	228	250	269	279	187	214	234	250	260	164	188	205	219	228
GTA252AIIR	kVA	292	334	365	390	405	282	324	353	377	393	238	273	297	318	331
	kW	234	267	292	312	324	226	259	282	302	314	190	218	238	254	265

400-200V (50Hz)

380-190V (50Hz)

Cosφ 0.8 / Aislamiento clase H

Baja tensión / 12 cables / 4 polos

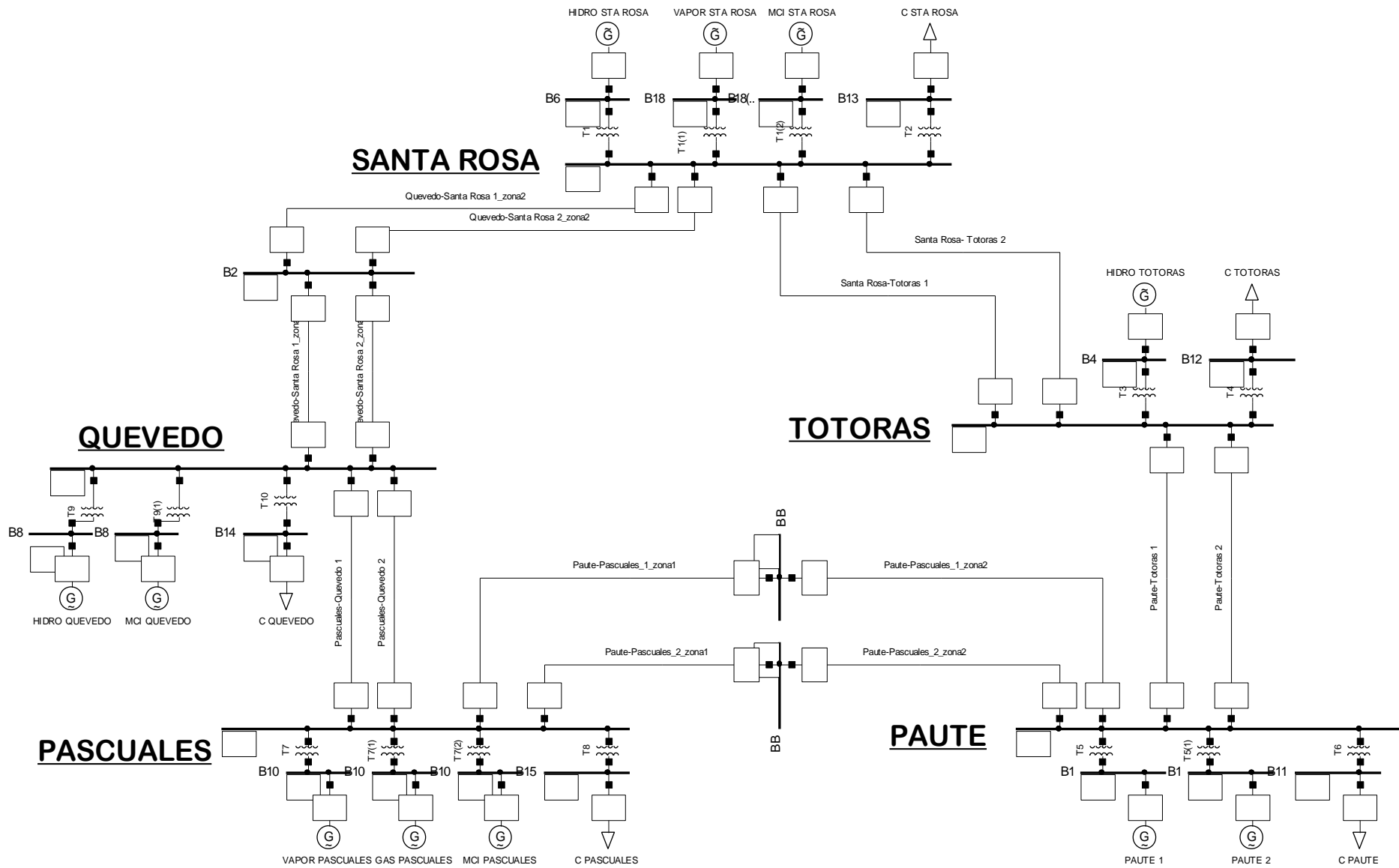
MODELO	ΔT	400V - Y					380V - Y				
		200V - YY					190V - YY				
		80°C	105°C	125°C	150°C	163°C	80°C	105°C	125°C	150°C	163°C
GTA161AISR	kVA	8,9	10,2	11,1	11,1	12,0	9,6	11,0	12,0	12,2	12,2
	kW	7,1	8,2	8,9	8,9	9,6	7,7	8,8	9,6	9,8	9,8
GTA161AIHS	kVA	11,7	13,5	14,7	16,1	16,3	11,1	12,7	14,0	14,8	15,4
	kW	9,4	10,8	11,8	12,9	13,0	8,9	10,2	11,2	11,8	12,3
GTA161AIHH	kVA	12,8	14,7	16,0	17,1	17,8	12,7	14,5	16,0	16,9	17,6
	kW	10,2	11,8	12,8	13,7	14,2	10,2	11,6	12,8	13,5	14,1
GTA161AIHI	kVA	14,8	17,0	19,0	20,3	21,1	14,8	17,0	19,0	19,8	20,6
	kW	11,8	13,6	15,2	16,2	16,9	11,8	13,6	15,2	15,8	16,5
GTA161AIHJ	kVA	15,9	18,3	23,0	24,0	25,0	16,3	18,6	23,0	24,0	25,0
	kW	12,7	14,6	18,4	19,2	20,0	13,0	14,9	18,4	19,2	20,0
GTA162AIVD	kVA	21,3	24,4	31,0	31,0	32,0	23,0	26,3	31,0	31,5	32,8
	kW	17,0	19,5	24,8	24,8	25,6	18,4	21,0	24,8	25,2	26,2
GTA201AIHS	kVA	34,6	39,6	43,3	47,4	49,4	32,9	37,7	41,1	45,1	47,0
	kW	27,7	31,7	34,6	37,9	39,5	26,3	30,2	32,9	36,1	37,6
GTA201AIHV	kVA	42,4	48,6	53,0	57,5	57,5	43,7	50,0	54,6	58,4	60,7
	kW	33,9	38,9	42,4	46,0	46,0	35,0	40,0	43,7	46,7	48,6
GTA201AIHB	kVA	48,0	52,7	60,0	62,0	63,0	51,6	59,1	64,5	68,4	68,4
	kW	38,4	42,2	48,0	49,6	50,4	41,3	47,3	51,6	54,7	54,7
GTA201AIHE	kVA	55,1	63,1	75,0	75,5	80,0	60,0	68,6	75,0	82,0	85,5
	kW	44,1	50,5	60,0	60,4	64,0	48,0	54,9	60,0	65,6	68,4
GTA202AIVJ	kVA	80,3	91,5	106,0	106,0	109,0	80,0	91,5	106,0	106,7	109,0
	kW	64,2	73,2	84,8	84,8	87,2	64,0	73,2	84,8	85,4	87,2
GTA251AIHD	kVA	110	126	140	151	158	112	128	140	150	156
	kW	88	101	112	121	126	90	102	112	120	125
GTA251AIHE	kVA	143	164	180	196	196	128	147	160	165	170
	kW	114	131	144	157	157	102	118	128	132	136
GTA252AIVB	kVA	165	189	206	220	229	173	198	216	231	240
	kW	132	151	165	176	183	138	158	173	185	192

Cosφ 0,8 / aislamiento clase H (180°C) - 60 Hz

Modelo	Xd' (%) Saturada	Xd'' (%) No saturada	Rendimiento (%) para 220/440 V			Inercia*	Masa (kg)
	220/440 V	220/440 V	% DE CARGA			J	
			50	75	100	(kgm2)	
GTA161AISR	15.43	10.26	68.70	73.40	75.10	0.198	114
GTA161AIHS	17.9	13.06	75.60	77.10	76.50	0.208	124
GTA161AIHH	16.08	12.01	80.20	80.70	79.60	0.208	126
GTA161AIHI	19.12	14.39	82.60	82.00	80.30	0.218	132
GTA161AIHJ	14.08	10.79	86.30	85.60	84.10	0.254	142
GTA162AVD	12.75	10.12	84.60	85.40	84.90	0.304	174
GTA201AIHS	24.52	20.08	88.77	87.43	85.38	0.37	234
GTA201AIHV	26.19	23.29	90.00	88.10	86.00	0.41	244
GTA201AIHB	23.81	21.40	89.40	88.50	87.10	0.46	264
GTA201AIHE	25.16	22.72	83.20	84.40	84.10	0.49	276
GTA202AIVJ	23.82	22.11	92.40	91.10	89.60	0.63	350
GTA251AIHD	26.74	18.84	91.20	89.90	88.20	1.76	430
GTA251AIHE	25.02	17.97	89.60	89.00	87.80	1.87	460
GTA252AMB	19.21	14.15	93.90	93.00	91.90	2.22	642
GTA252AIII	16.14	12.18	91.00	91.60	91.30	2.54	660
GTA252AIIR	14.78	11.38	94.70	94.20	93.50	2.73	690
GTA311AMS	27.78	21.71	92.80	92.10	91.00	3.48	985
GTA311AMI	21.92	17.33	94.30	93.40	92.20	3.77	995
GTA311AIIH	22.60	18.54	90.70	91.80	91.80	5.40	1075
GTA312AIIB	19.12	15.41	94.40	93.90	93.00	4.95	1215
GTA312AIIG	24.85	20.80	93.70	94.00	93.80	5.34	1265
GTA312AIDI	17.82	14.73	94.90	94.60	93.90	7.13	1375
GTA352AIDV	16.75	12.24	94.1	94.9	95	11.64	2050
GTA352AIDE	19.26	13.91	93.9	94.7	94.8	12.52	2300
GTA401AIHB	22.44	15.78	92.90	93.90	94.10	17.96	2270
GTA401AIHE	26.84	18.74	93.80	94.30	94.20	20.57	2414
GTA403AVD	18.23	13.92	92.00	93.60	94.20	25.79	2880
GTA403AMB	20.45	15.18	92.70	93.90	94.30	26.39	2941

ANEXO 6

ESQUEMA DEL SISTEMA DEL LABORATORIO EN DIGSILENT POWERFACTORY



ANEXO 7

PRESUPUESTO ESTIMADO PARA EL EQUIPO MODELADO DEL LABORATORIO

VOLANTES DE INERCIA

Grupos de Generación	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Costo por kilogramo [USD]	Costo por acero [USD]
S/E PAUTE				
Hidroeléctrica I	0,30	2331,11	1,4	3263,55
Hidroeléctrica II	0,30	2331,11	1,4	3263,55
S/E TOTORAS				
Hidroeléctrica	0,17	1297,51	1,4	1816,51
S/E SANTA ROSA				
Hidroeléctrica	0,13	1007,13	1,4	1409,98
Térmica Vapor	0,00	22,05	1,4	30,88
Térmica MCI	0,00	17,64	1,4	24,70
S/E QUEVEDO				
Hidroeléctrica	0,07	555,76	1,4	778,06
Térmica MCI	0,01	91,16	1,4	127,62
S/E PASCUALES				
Térmica Vapor	0,02	126,44	1,4	177,02
Térmica Gas	0,01	105,37	1,4	147,52
Térmica MCI	0,02	119,09	1,4	166,73
			Subtotal	11206,12
			Valor de Manufactura	3361,84
			TOTAL	14567,95

GENERADORES

Grupos de Generación	Potencia Generador [kVA]	Costo referencial [USD]
S/E PAUTE		
Hidroeléctrica I	26	2960,16
Hidroeléctrica II	26	2960,16
S/E TOTORAS		
Hidroeléctrica	11,5	1692,32
S/E SANTA ROSA		
Hidroeléctrica	9	1692,32
Térmica a Vapor	3	626,08
Térmica MCI	1,9	424,48
S/E QUEVEDO		
Hidroeléctrica	5,6	976,64
Térmica MCI	7	976,64
S/E PASCUALES		
Térmica a Vapor	9,2	1692,32
Térmica a Gas	11,1	1692,32
Térmica MCI	8,8	976,64
Subtotal		16670,08
Valor de Manufactura		13336,06
TOTAL		30006,14

MOTORES

Tipo de Generación	Potencia [HP]	Precio referencial [USD]
S/E PAUTE		
Hidroeléctrica I	40	2518,88
Hidroeléctrica II	40	2518,88
S/E TOTORAS		
Hidroeléctrica	20	1148
S/E SANTA ROSA		
Hidroeléctrica	15	1020,32
Térmica a Vapor	5	387,52
Térmica MCI	3	312,48
S/E QUEVEDO		
Hidroeléctrica	10	707,84
Térmica MCI	12,5	1020,32
S/E PASCUALES		
Térmica a Vapor	15	1020,32
Térmica a Gas	20	1148
Térmica MCI	15	1020,32
TOTAL		12822,88

TRANSFORMADORES

Tipo de Generación	Capacidad Nominal Transformador [kVA]	Coto referencial [USD]
S/E PAUTE		
Hidroeléctrica I	30	6755,84
Hidroeléctrica II	30	6755,84
S/E TOTORAS		
Hidroeléctrica	15	3377,92
S/E SANTA ROSA		
Hidroeléctrica	10	2251,95
Térmica a Vapor	4	900,78
Térmica MCI	2	450,39
S/E QUEVEDO		
Hidroeléctrica	6	1351,17
Térmica MCI	8	1801,56
S/E PASCUALES		
Térmica a Vapor	10	2251,95
Térmica a Gas	12	2702,34
Térmica MCI	10	2251,95
TOTAL		30851,67

COSTO TOTAL DE EQUIPAMIENTO	88248,65 USD
------------------------------------	---------------------