

TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA



Planta Hidroeléctrica De Río Macho

Informe de Practica de Especialidad para optar por el titulo de
Ingenieria en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura.

Proyecto

***“Desarrollo de metodología para la estimación de la eficiencia de
un generador”***

Jorge Luis Morales Arce

-Cartago-

8 de junio de 2016

Hoja de información

Información del Estudiante:

Nombre: Jorge Luis Morales Arce.

Cedula: 3-459-155.; Carné: 201106124

Dirección de la Residencia: San Rafael de Oreamuno, Cartago.

Teléfono: 85609941

e-mail: morales.1091@gmail.com / arcemorales91@gmail.com

Información del Proyecto:

Nombre del Proyecto:

“Desarrollo de metodología para la estimación de la eficiencia de un generador”

Asesor académico: Ing. Edward Astúa Fernández.

Correo: EAstua@ice.go.cr

Horario de Trabajo del estudiante: Lunes a Jueves de 7:00a.m a 5:00p.m y
Viernes, de 7:00a.m a 3:00p.m

Información de la Empresa

Nombre: Instituto Costarricense Electricidad

Dirección: Seis kilómetros al este del pueblo de Orosi, distrito tercero del cantón de Paraíso, provincia de Cartago

Teléfono: 2520-8799

Actividad Principal: Planta Hidroeléctrica Río Macho.

Dedicatoria

*A mis padres, por darme la oportunidad de estudiar,
por todos sus sacrificios y apoyo en todo momento.*

A mis hermanos por el ejemplo y guía en las situaciones difíciles.

A mis sobrinos por ser una luz en mi vida.

Agradecimiento

Les agradezco a todas las personas que me apoyaron día a día

Especialmente a:

Mi Familia por ser un Pilar en mi vida,

Edward Astúa Fernández mi asesor en el ICE y guía en la realización del proyecto,

Los técnicos y operadores del PH Río Macho por el apoyo y consejo en los meses de práctica.

Mis compañeros y amigos que estuvieron todo el tiempo para ayudarme, especialmente a "Los de Siempre", Fabiola Araya, Felipe Córdoba, Jorge Ángulo y Roberto Córdoba.

Al profesor Oscar Monge y a los demás educadores del ITCR que me ayudaron en la elaboración del proyecto.

Índice

Hoja de información.....	I
Información del Estudiante:.....	I
Información del Proyecto:.....	I
Información de la Empresa	I
Resumen.....	1
Abstract	2
Glosario	3
1. <i>Capítulo 1. Generalidades de la empresa</i>	4
1.1. Historia	5
1.2. Organización.....	7
1.2.1. Electricidad.....	7
1.2.2. Telecomunicaciones.....	7
1.3. Misión.....	10
1.4. Visión.....	10
1.5. Valores Grupo ICE.....	10
1.6. Ubicación de la Empresa	12
1.7. Actividad que desarrolla.....	12
2. <i>Capítulo 2. Descripción del Proyecto.</i>	14
2.1. Introducción	15
2.2. Objetivos	16
2.2.1. Objetivo General:	16
2.2.2. Objetivos Específicos:.....	16
2.3. Definición del problema	17
2.4. Situación actual	17
2.5. Metodología de trabajo	19
2.5.1. Análisis de Curvas Actuales.	19
2.5.2. Investigación y Obtención de información	19
2.5.3. Proceso de Simulación	20
2.5.4. Estudio de eficiencia.....	20
2.5.5. Recomendaciones	20
2.5.6. Cronograma.....	21

3.	<i>Capítulo 3. Marco teórico</i>	22
3.1.	Eficiencia de Generador	23
3.2.	Normas de Eficiencia.....	25
3.2.1.	IEEE.....	26
3.2.2.	IEC.....	32
3.3.	Curva de Eficiencia	34
3.4.	Curva de Capabilidad.....	35
3.5.	Andritz Hydro	37
	Andritz Hydro cuenta con talleres de trabajo en Europa, Asia y América del Norte, los cuales brindan:.....	37
4.	<i>Capítulo 4. Estudio Comparativo de las Normas</i>	38
4.1.	Características comparativas	39
4.1.1.	Eficiencia IEC 34-2.	41
4.1.2.	Eficiencia IEEE 112.....	42
4.1.3.	Gráfica Comparativa.....	44
5.	<i>Capítulo 5. Análisis de la Eficiencia de Generador</i>	51
5.1.	Cálculo de las Curvas de Eficiencia.....	52
5.1.1.	Toma de Datos	52
5.1.2.	Pérdidas en el Estator I^2R	55
5.1.3.	Pérdidas en el Rotor I^2R	55
5.1.4.	Pérdidas Mecánicas.....	56
5.1.5.	Dispersión de carga	57
5.1.6.	Hoja de Cálculo Norma IEEE	57
5.1.7.	Elaboración de las Gráficas de Eficiencia	59
5.2.	Monitoreo de fallas en los Generadores de PH Río Macho.....	62
5.2.1.	Monitoreo de fallas en PH Río Macho.	62
5.2.2.	Indicaciones NEMA de Fallas.....	64
5.3.	Descargas Parciales en los Generadores.....	67
5.3.1.	Efecto sobre el aislamiento	68
5.3.2.	Estudio de descargas parciales y tangentes delta.....	70
5.4.	Curva Analítica.....	72
5.5.	Comparación Mensual	75

5.6.	Estudio de Generador-Trasformador	81
5.6.1.	Eficiencia Trasformador	81
5.6.2.	Eficiencia Grupo Generador-Trasformador.....	82
5.7.	Curvas de Capabilidad	83
5.7.1.	Límite Corriente de Armadura	85
5.7.2.	Límite de potencia mecánica de la máquina prima	85
5.7.3.	Límite de máxima corriente de excitación	85
5.7.4.	Límite de estabilidad permanente teórico y práctica (Angulo de torque máximo)..	85
5.7.5.	Límite de mínima corriente de excitación.....	86
5.7.6.	Factores importantes de las Curvas de Capabilidad	86
5.8.	Generador en Condensador.....	87
5.8.1.	Fallas por Sobre excitación.....	88
6.	<i>Capítulo 6. Estudio Económico</i>	90
6.1.	Estimaciones Económicas de la Eficiencia del Generador	91
7.	<i>Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones</i>	95
7.1.	Conclusiones.....	96
7.2.	Recomendaciones	98
	Bibliografía	99
	<i>APÉNDICE</i>	101
	Apéndice 1. Modelas Diarios de Eficiencia por un mes.	102
	<i>ANEXOS</i>	134
	Anexo 1. Tabla de Eficiencias Mínimas según NEMA MG1-2009.....	135
	Anexo 2. Datos de Placa Generador U3.	136
	Anexo 3. Pruebas de Aislamiento	138
	Anexo 4. Datos del Generadores.	140

Índice de Figuras

Figura 1. Organigrama del ICE	8
Figura 2. Cronograma de Desarrollo del Proyecto	21
Figura 3. Tabla de Perdidas de IEC	32
Figura 4. Orden de Calculo IEC	33
Figura 5. Curva de Eficiencia	35
Figura 6. Curva de Capabilidad	36
Figura 7. Programación de Curvas	45
Figura 8. Eficiencias IEC vs IEEE	46
Figura 9. Datos de pérdidas.....	47
Figura 10. Grafica de Eficiencia.	60
Figura 11. Curva de Baja Eficiencia.....	61
Figura 12. Curva de Eficiencia 22 de Marzo	64
Figura 13. Zona de Operación según NEMA.....	66
Figura 14. Eficiencia 21 de marzo de la U#5	67
Figura 15. Gráfica de Eficiencia	69
Figura 16. Estudio Analítico.....	72
Figura 17. Gráfica Comparativa de Técnicas	74
Figura 18. Gráfica de Potencia del 21 de Diciembre	75
Figura 19. Gráfico Pastel de Producción Eléctrica 21 Diciembre	76
Figura 20. Gráfica de Potencia de 21 de Marzo	76
Figura 21. Gráfico Pastel de Producción Eléctrica del 21 de Marzo.....	77
Figura 22. Eficiencia día de Verano	79
Figura 23. Grafica de Eficiencias del 21 de Diciembre del 2015.....	80
Figura 24. Curva de Capabilidad Río Macho.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de Fabrica Unidad 1.....	40
Tabla 2. Datos de Impedancias.....	40
Tabla 3. Pérdidas en Unidades dadas por el Fabricante	41
Tabla 4. Eficiencia IEC Unidad 1	41
Tabla 5. Hoja de cálculo de eficiencia U1.....	43
Tabla 6. Eficiencia Unidad 1 IEEE.....	44
Tabla 7. Datos para el Cálculo de Eficiencia	53
Tabla 8. Datos de temperatura del devanado de estator.	54
Tabla 9. Datos de temperaturas del rotor.....	54
Tabla 10. Pérdidas Mecánicas	57
Tabla 11. Hoja de Cálculo de Eficiencia Unidades 3, 4 y 5.	58
Tabla 12. Datos de Eficiencia.....	59
Tabla 13. Datos de Eficiencia 31 de Marzo U5	61
Tabla 14. Señales de Alarma	63
Tabla 15. Valor de las Pérdidas	65
Tabla 16. Valores Mínimos Según NEMA MG 1	65
Tabla 17. Datos de Ciclaje Diario de Carga.....	68
Tabla 18. Índice de Absorción	70
Tabla 19. Índice de Polarización	71
Tabla 20. Comparación de Estudios	73
Tabla 21. Comparación de Potencia Diaria	78
Tabla 22. Datos del 21 de Marzo Unidad #5	79
Tabla 23. Datos de Potencias del 21 de Diciembre del 2015	80
Tabla 24. Datos de Transformadores de Río Macho	81
Tabla 25. Eficiencias de Grupo Generador-Trasformador	82
Tabla 26. Datos de Placa para Curva de Capabilidad	83
Tabla 27. Datos de Generador en Condensador	88
Tabla 28. Pérdidas Condensador.....	89
Tabla 29. Costos de Generación Diaria	92
Tabla 30. Costo de Pérdidas	92
Tabla 31. Costo de Generación	93
Tabla 32. Volumen en función de la potencia.....	94
Tabla 33. Datos de uso Económico	94

Resumen

La modernización de la PH Río Macho permitió que las unidades ganaran mayor eficiencia y confiabilidad en las operaciones. Para prolongar la vida útil del activo se busca que los generadores entreguen la mayor eficiencia posible, de este modo, por medio de la norma IEEE 112-E se estimó la eficiencia y puntos de operación más adecuados, la cual estima la eficacia de forma similar a la IEC 60032-2, para su comprobación se contrapusieron ambas normas con datos tomados de la PH Río Macho.

Se generaron un conjunto de gráficas con el fin de evaluar y monitorear el comportamiento cronológico de la unidad. La función de éstas es crear una base para el monitoreo, que permita tener un punto de referencia en la evaluación del estado del activo.

Ciertas variaciones en la eficiencia demuestran posibles fallas que el generador tiene en su operación, como por ejemplo, las descargas parciales debilitan la capacidad de aislamiento de la mica, por esta razón se desarrolló una curva analítica que le permitiera a la teoría ganar solidez en sus resultados, debido a que se comparan ambos métodos con el fin de corroborar el valor obtenido en el campo. Se evaluaron las variaciones de la época del año según el caudal del río, demostrando que para épocas lluviosas las eficiencias de los generadores son mayores por tiempos más prolongados, afectando menos a los generadores, debido a que los cambios en las potencias son pocas.

Otros estudios que se realizaron fueron los de las curvas de capacidad, para delimitar los valores de operación de Río Macho; como también la eficiencia global que presenta tanto el transformador como el generador a potencia nominal, y los efectos que le puede ocasionar a los generadores la operación en el modo condensador.

Palabras Clave: Eficiencia, Monitoreo, IEEE, Capacidad, Analítico, Condensador.

Abstract

The modernization of PH Rio Macho allowed greater efficiency and reliability in operation to the units. To prolong the life of the asset is intended that the generators deliver the highest possible efficiency.

Through the IEEE 112-E efficiency and points most suitable operation is estimated, which estimates efficiency similar to IEC 60032-2, for checking superimpose Both graphs from data in the PH Rio Macho a set of graphs were generated in order to assess and monitor the chronological behavior of the unit.

The function of the graphic is to create a basis for monitoring, which allows you to have a starting point in assessing the state of the asset. Certain variations present in efficiency possible failures demonstrate that the generator presents in its operation, as the partial discharge capacity weaken mica insulation.

An analytical curve that allowed the theoretical calculation gain strength in their results, because the comparison contrasts both methods in order to corroborate the value obtained in the field was developed. variations that season introduces the flow of the river were evaluated, showing that to the rainy season efficiencies generators are greater for longer times, affecting less than generators because the changes in the powers are few.

Other studies conducted were curves Capability to define the operating values Rio Macho, as well as the overall efficiency that presents both the transformer and generator at rated power, and the effects that can lead to lead to generators operating in condenser mode.

Keywords: Efficiency, Monitoring, IEEE, Capability, Analytical, Condenser.

Glosario

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad

SCADA: Supervisory Control and Data Adquisición

Tgt(δ): Tangente Delta

IP: Índice de polarización

DP: Descarga Parcial

PH: Proyecto Hidroeléctrico

UEN: Unidad de Estrategias de Negocio

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

Loss: Pérdidas de la potencia

LL: Load Losses (Perdidas por Carga)

FyW: Friccion and Wintage (Fricción y Rozamiento)

s: Deslizamiento

CENCE: Centro Nacional de Control de la Energía

NEMA: National Electrical Manufacturers Association

MG: Motores y Generadores

AC: Corriente Alterna

DC: Corriente Directa

MW: Mega Watts

MWh: Mega Watts por Hora

LIMAT: Laboratorio de Investigación y Mantenimiento de Alta Tensión

p.u: Medida estándar por unidad

Capítulo 1. Generalidades de la empresa

1.1. Historia

En 1948 un grupo de ingenieros eléctricos y civiles, encabezados por Jorge Manuel Dengo Obregón, presentaron a la Junta Directiva del Banco Nacional un documento titulado “Plan General de Electrificación de Costa Rica”. La trascendencia de esta iniciativa fue tal, que el Banco Nacional lo remitió al Gobierno de la República para que lo analizara y el resultado fue la creación del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el 8 de abril de 1949, como una Institución Estatal Autónoma bajo el Decreto de Ley N°.449, con personalidad jurídica y patrimonio propio. El ICE está dotado de plena autonomía e independencia administrativa, técnica y financiera, la función de sus empresas es desarrollar, ejecutar, producir y comercializar todo tipo de servicios públicos de electricidad y telecomunicaciones, así como actividades o servicios complementarios a estos.

Su creación fue el resultado de una larga lucha de varias generaciones de costarricenses que procuraron solucionar, definitivamente, los problemas de la escasez de energía eléctrica presentes en los años 40 y en apego a la soberanía nacional, en el campo de la explotación de los recursos hidroeléctricos del país.

A esta institución se le encomendaron diferentes funciones para el desarrollo de la producción eléctrica nacional, como las que se mencionan a continuación:

- Solucionar el problema de la escasez de energía eléctrica del país, mediante la construcción y puesta en servicio de más plantas de energía hidroeléctrica, con sus correspondientes redes de distribución.
- Promover el desarrollo del país mediante el uso de la energía eléctrica como fuente de fuerza motriz.
- Procurar la utilización racional de los recursos naturales y terminar con la explotación destructiva e indiscriminada de estos.

- Conservar y defender los recursos hidráulicos del país, mediante la protección de las cuencas, fuentes, cauces de los ríos y corrientes de agua.

En 1963 y por medio de la Ley N°. 3226, se le confiere al ICE el establecimiento, mejoramiento, extensión y operación de los servicios de comunicaciones telefónicas, radiotelegráficas y radiotelefónicas en el territorio nacional, por lo que tres años más tarde van a instalarse las primeras centrales telefónicas automáticas.

Al pasar el tiempo esta organización se ha establecido como la agrupación de varias instituciones como lo son el ICE (Sectores Electricidad y Telecomunicaciones) y sus empresas: Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA), la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. (CNFL) y Cable Visión.

1.2. Organización

Respecto a la organización del ICE, este se encuentra estructurado de la siguiente manera: posee un Nivel Gerencial como primer eslabón, que consta de la parte política y la gerencia, el ámbito político lo componen el consejo directivo y la presidencia ejecutiva, mientras que la gerencia está constituida por los dos conceptos más familiares dentro de la compañía, la Electricidad y las Telecomunicaciones, que se componen por la CNFL, RACSA y Cable Visión; estas empresas se dividen a su vez en un conjunto de servicios para el desarrollo de la industria nacional, como lo son:

1.2.1. Electricidad

Soluciones residenciales: servicios de electricidad.

Soluciones empresariales: servicios de baja tensión o alta tensión.

Soluciones universales: servicio de alumbrado público.

1.2.2. Telecomunicaciones

Telefonía móvil: mediante planes de servicios, en modalidad de prepago y postpago, internet móvil, mensajería y servicios internacionales.

Telefonía fija: servicios residenciales, internet y servicio internacional.

Soluciones empresariales: Líneas comerciales, redes privadas virtuales, servicios de datos e internet (roaming de datos, servicios a nivel nacional e internacional, red digital de servicios integrados, videoconferencia).

Soluciones universales: Telefonía pública, Internet público, tarjetas telefónicas.

Interconexión: servicios de interconexión a operadores.

El organigrama que aparece seguidamente representa la organización de la Gerencia y las áreas involucradas en la administración superior

Instituto Costarricense de Electricidad (I.C.E)

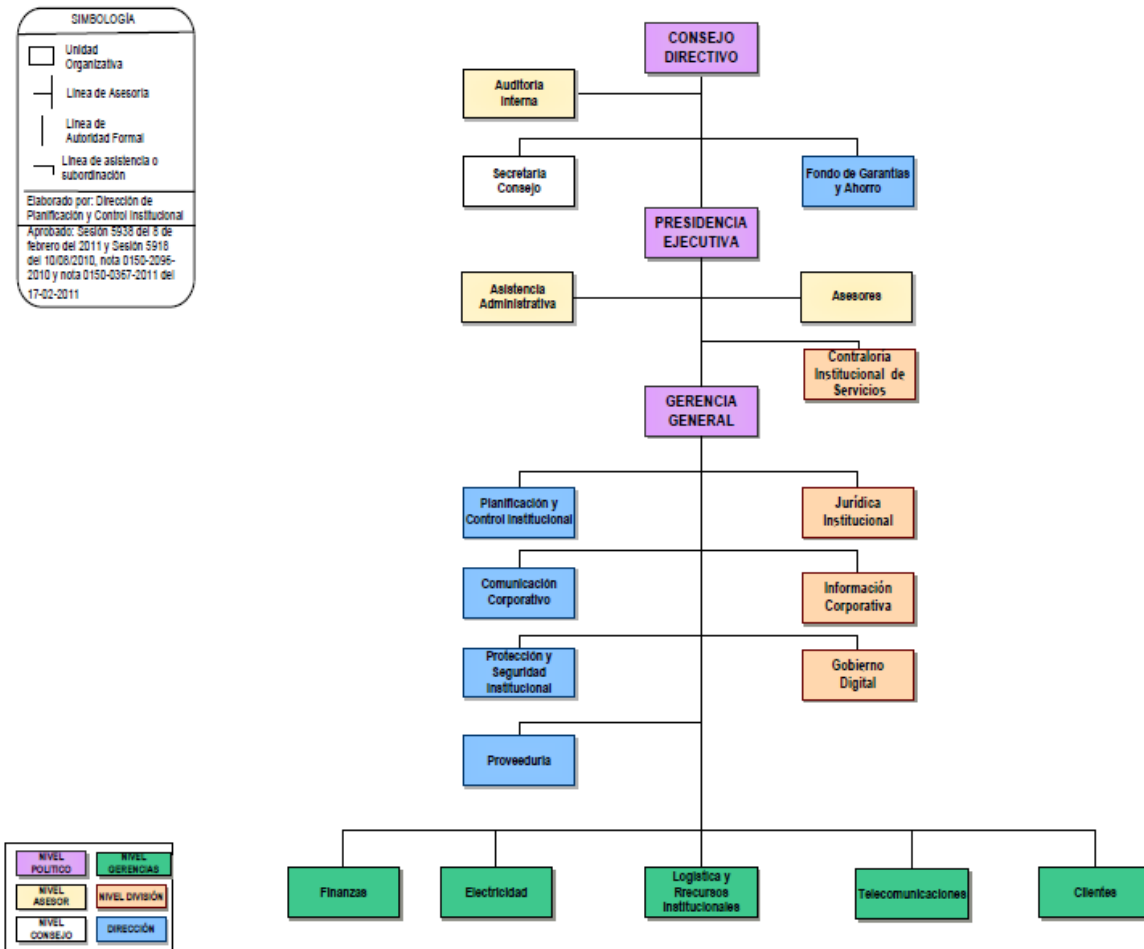


Figura 1. Organigrama del ICE

Fuente: (ICE, Postulación al Premio Nacional a la Calidad en la Gestión Pública, 2011)

Sector Electricidad

El ICE a través de sus Unidades estratégicas de Negocio (UEN) y Transporte de Electricidad es el encargado de la planificación, operación, mantenimiento y ampliación de la red de transmisión (líneas y subestaciones de transmisión) a nivel nacional. Realiza estudios de alternativas de red, asociadas a los proyectos de generación para encontrar la mejor alternativa que permita proveer al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) una infraestructura capaz de dar los servicios de transporte e interconexión, conexiones de alta tensión, transformación y conexiones de media tensión.

El sector electricidad está compuesto por seis UEN las cuales son:

- Centro Nacional de Control de Energía
- Planificación Eléctrica
- Proyectos y Servicios Asociados
- Producción de Electricidad
- Transporte de Electricidad
- Servicio al Cliente (Electricidad)

La red de transporte de electricidad de Costa Rica está compuesta por subestaciones, líneas, transformadores y equipo de compensación de potencia reactiva. La misma opera a dos niveles de tensión principales, siendo el más importante el de 230 kV por su ubicación, este permite el transporte de grandes bloques de energía desde la zona norte y desde el atlántico. El nivel de 138 kV se ubica, principalmente, en la zona central que forma un anillo central.

Para diciembre del 2010 el Sistema de Transmisión contaba con una longitud de 1.187 kilómetros de línea de 230 kV y 726 kilómetros de línea de 138 kV.

1.3. Misión

Ser una corporación propiedad de los costarricenses, que ofrece soluciones de electricidad y telecomunicaciones, contribuyendo con el desarrollo económico, social y ambiental del país.

1.4. Visión

Ser una Corporación líder, innovadora en los negocios de electricidad y telecomunicaciones en convergencia, enfocada en el cliente, rentable, eficiente, promotora del desarrollo y bienestar nacional, con presencia internacional.

1.5. Valores Grupo ICE

El grupo ICE establece bajo su Consejo Directivo en la Sesión 6114 del 12 de noviembre del 2014 conservar los valores que han identificado a la Institución en el desempeño de sus labores, (ICE, Historia del ICE, 2016).

Integridad

- Para desarrollar nuestro trabajo de acuerdo con los principios de transparencia, justicia, confiabilidad, honestidad y respeto.
- Para ser leales a la institución y a nuestros clientes.
- Para rechazar las influencias indebidas y los conflictos de interés.
- Para ser consecuentes entre lo que se dice y lo que se hace.
- Para administrar responsablemente los bienes institucionales.
- Para actuar de conformidad con la normativa nacional e institucional.

Compromiso

- Con la satisfacción de las necesidades y expectativas de nuestros clientes internos y externos.
- Con el desarrollo económico y social de país.
- Con la calidad de vida de los habitantes del país.
- Con el medio ambiente.
- Con el trabajo bien realizado y los objetivos de ICE.

Excelencia

- En el suministro de un servicio oportuno, confiable y de calidad.
- En la búsqueda y aplicación de nuevas tecnologías para beneficio de nuestros clientes.
- En la aplicación de las mejores prácticas técnicas y administrativas.
- En la atención al cliente.
- En el desarrollo integral del factor humano.
- En la gestión de los recursos institucionales.

1.6. Ubicación de la Empresa

El Centro de Producción Río Macho forma parte del Centro de Generación Río Macho, Cachí, Angostura, Reventazón, Toro y Moín, los cuales componen la región Huetaar.

Se encuentra ubicado en el Valle de Orosi, su casa de máquinas está localizada 6 kilómetros al este del pueblo de Orosi, distrito tercero del cantón de Paraíso, provincia de Cartago.

Está compuesto por dos subestaciones de alta tensión y una tubería de conducción, la cual se bifurca en dos tuberías al llegar a la planta, para alimentar una a las unidades 1,2 y 3, y la segunda tubería alimenta a las unidades 4 y 5. Esta tubería de conducción se alimenta de los ríos Tapantí, Badilla, Porras, Villegas, Humo y Macho. Al final, todo se deposita en el embalse El Llano.

1.7. Actividad que desarrolla

Toda planta hidroeléctrica es aquella que aprovecha la energía hidráulica para producir energía eléctrica, donde la cabeza y la potencia requerida determinan el tipo de turbina utilizada en una planta hidroeléctrica. Las turbinas consisten en un arreglo de álabes curvos, diseñados para extraer la mayor cantidad de energía posible del flujo de agua.

A continuación se resume el proceso de generación:

- El proceso inicia con la concentración de grandes cantidades de agua en un embalse, la cual proporciona la energía potencial.
- Por la acción de la gravedad, el agua adquiere energía cinética (pasa de un nivel superior a otro muy bajo, a través de las obras de conducción).
- La energía hidráulica se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura; es decir, se pasa de potencial a cinética.

- Por su masa y velocidad, el agua produce un empuje que se aplica a las turbinas, las cuales transforman la energía hidráulica en energía mecánica.
- Esta energía mecánica se propaga a los generadores acoplados a las turbinas.
- Los generadores producen energía eléctrica.
- Esta energía eléctrica pasa a la subestación de la planta.
- La subestación eleva el voltaje para que la energía llegue a los centros de consumo con la debida calidad.

La energía hidráulica presenta ventajas frente a otras fuentes energéticas convencionales; pues es una fuente de energía no contaminante, aprovecha al máximo todos los recursos hídricos disponibles y produce energía eléctrica cerca del usuario.

Capítulo 2. Descripción del Proyecto.

2.1. Introducción

Después del proceso de modernización al que fue sometido la planta, surgió la necesidad de realizar un estudio más a fondo de la eficiencia de los nuevos generadores, es por esto que se desarrolló una metodología que permitió estimar por medio de simulaciones matemáticas su eficiencia en la planta hidroeléctrica de Río Macho, la finalización del proyecto se prevé para marzo de 2017, con la modernización de la toma de agua del Río Blanco.

El proyecto desarrollará un estudio global, que integra el transformador, desarrollando así un estudio de todo el conjunto, para que se comprenda de mejor manera la eficiencia propia del generador.

La importancia nace bajo la necesidad de conocer y estudiar el comportamiento de los generadores para lograr entender el estado en que se encuentran y cómo se comportan a través de los años.

El impacto del proyecto radica en generar un estudio que garantice el accionar y un mayor entendimiento de los equipos, para beneficiar la vida útil de éstos, así como también los mecanismos de operación de los generadores para no comprometer su eficiencia.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General:

Determinar un modelo matemático que permita la estimación de la eficiencia del generador, para el desarrollo de una metodología que complemente el monitoreo en línea.

2.2.2. Objetivos Específicos:

- a. Analizar las curvas de eficiencia del generador.
- b. Realizar un estudio del estado de la cuestión a fin de revisar toda la bibliografía en la temática.
- c. Construir las curvas de eficiencia del generador.
- d. Analizar la eficiencia de todo el grupo generador-trasformador.
- e. Proponer mejoras al sistema a fin de maximizar la producción de la unidad generadora.

2.3. Definición del problema

La Planta Hidroeléctrica Río Macho se encuentra en las etapas finales de un proceso de modernización de las unidades generadoras, donde se está implementando un estudio de monitoreo en línea para la eficiencia de turbina. El nuevo monitoreo le permite a la PH Río Macho conocer el comportamiento real de las unidades, es aquí donde nace la necesidad de investigar sobre un tema poco explorado en el ICE, la eficiencia del generador, y, a su vez, comprender cómo esta se puede acoplar de la mejor manera al monitoreo en línea de la eficiencia de turbina, desarrollando una metodología que permita acoplarse de manera complementaria e incrementando el conocimiento sobre el estado de los generadores a partir de sus curvas de eficiencia, para facilitar un monitoreo continuo, que ayude a la toma de las decisiones de mantenimiento, para prolongar la vida útil del equipo.

2.4. Situación actual

Actualmente la planta se encuentra en los procesos finales de la modernización, con una inversión de \$122 millones.

El proceso de modernización se compone de diferentes etapas de ejecución como lo son la sustitución de las 5 unidades generadoras, otorgando una mayor capacidad de generación, pasando de los 120 MW a 140 MW. Se actualizaron, además, los sistemas de control, instrumentación y enfriamiento de los equipos, generando más confiabilidad en el manejo de las unidades nuevas.

La modernización involucró, de igual manera, un proceso de mejoramiento en las tomas de agua, Río Macho, Tapanti, Pejibaye, Humo, Porras, Villegas y Blanco, las cuales involucran una gran cantidad de obras civiles como también el cambio de las compuertas y las ventanas de acceso para cada una de las tomas.

La entrega de dicha modernización se espera para marzo del 2017. Con la búsqueda de:

- a. Lograr un aumento en la eficiencia y potencia de las 5 unidades.
- b. Garantizar la continuidad del servicio de energía.
- c. Restaurar la vida útil de los Equipos Modernizados por un periodo de 30 años adicionales.
- d. Homologar los repuestos de todas las Unidades que conforman el Centro de Producción, reduciendo los inventarios.
- e. Garantizar la seguridad operativa de la Planta.

2.5. Metodología de trabajo

2.5.1. Análisis de Curvas Actuales.

Se procedió a realizar un análisis de las curvas de eficiencia y capacidad que genera el SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), sistema que se encuentra actualmente instalado en las cinco unidades generadoras de la planta de Río Macho, también se estudió su entorno operacional, lo que permitió realizar el modelado más adecuado de la eficiencia del generador, aquí se tomaron en cuenta las características de potencias, corrientes, tensiones, y temperaturas en el devanado del estator y en el núcleo del mismo, para conocer los datos de operación.

2.5.2. Investigación y Obtención de información

Como en todo proceso investigativo se comenzó por realizar una detallada búsqueda bibliográfica para generar el conocimiento que ayudará a entender el proyecto; de este modo, se comenzó por identificar las características de los manuales del equipo, se estudiaron los parámetros de eficiencia óptimos y las curvas de operación, que recomienda el fabricante, como también todo tipo de dato de valor ante lo que son las posibles fallas o pérdidas de aislamiento que se presenten en la constante operación de los equipos.

Se recopiló la mayor cantidad de información externa por medio de libros, documentos en línea y asesorías con profesores de la Escuela de Electromecánica del Instituto Tecnológico, para poder desarrollar una metodología que permita determinar el modelo matemático más adecuado para el desarrollo de las curvas de eficiencia, las cuales se puedan simular por medio de un código en Matlab con base en los datos medidos.

2.5.3. Proceso de Simulación

El proceso de simulación se realizó de la manera en que se pudiera generar una curva de eficiencia para cada uno de los días estudiados, con base en los parámetros de operación y las variaciones que pudiera generar la potencia en la que se encontraban trabajando.

Con la ayuda de la sala de control se realizó la toma de datos cada hora, con un promedio de seis conjuntos de datos por día, todos anotados en la bitácora de trabajo con hora y fecha, respectivamente.

Se programó una hoja de Excel que permitió obtener eficiencias con base en la norma IEEE-112- E, mediante el ingreso de los datos tomados del SCADA.

Se desarrolló un código por medio de Matlab, el cual permitió la simulación de las curvas de eficiencia del generador, para que complementara la eficiencia en línea de la turbina que se está implementando en la planta.

2.5.4. Estudio de eficiencia

Se realizará el estudio del grupo generador-trasformador, el cual involucra ambas partes, para realizar una metodología más global de la eficiencia de todo el grupo con base en las posibles pérdidas que pueda presentar y así beneficiar la generación, esto permitirá generar un conocimiento que pueda aumentar la eficiencia general.

2.5.5. Recomendaciones

Se proporcionarán las mejoras adecuadas que el estudio refleje, para beneficiar la producción en la unidad generadora, abarcando desde el entorno operacional hasta el conjunto generador-trasformador con el fin de prolongar la vida útil del mismo.

2.5.6. Cronograma

A continuación se expone un cronograma de las etapas que se realizaron.

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1	Proceso de Resolución y Cumplimiento de los objetivos del proyecto de Graduación	17,6 sem.	mar 01/03/16	jue 30/06/16
2	Analizar las curvas de eficiencia del generador.	9 días	mar 01/03/16	vie 11/03/16
3	Reconocer la empresa y su papel como planta de generación	1 día	mar 01/03/16	mar 01/03/16
4	Realizar un análisis de las curvas que genera el sistema SCADA he identificar los datos que se proporcionan.	1 día	mié 02/03/16	mié 02/03/16
5	Identificar las normas IEC e IEEE para el cálculo de la eficiencia	2 días	jue 03/03/16	vie 04/03/16
6	Realizar un estudio comparativo de ambas normas	3 días	lun 07/03/16	mié 09/03/16
7	Justificar la elección de la norma para trabajar el modelo	2 días	jue 10/03/16	vie 11/03/16
8	Realizar un estudio del estado de la cuestión a fin de revisar toda la bibliografía en la temática.	10 días	lun 14/03/16	vie 25/03/16
9	Identificar las características de los manuales de las unidades generadoras para el estudio de la eficiencia	4 días	lun 14/03/16	jue 17/03/16
10	Investigar la mayor cantidad de información existente	0,2 sem.	vie 18/03/16	vie 18/03/16
11	Coordinar visitas del profesor guía para la síntesis de la información	1 día	lun 21/03/16	lun 21/03/16
12	Seleccionar el modelo más adecuado de forma analítica y teórico.	4 días	mar 22/03/16	vie 25/03/16
13	Construir las curvas de eficiencia del generador.	15 días	lun 28/03/16	vie 15/04/16
14	Implementar un código en Matlab que simule las grafica la eficiencia del generador.	15 días	lun 28/03/16	vie 15/04/16
15	Analizar la eficiencia de todo el grupo generador-trasformador.	10 días	lun 18/04/16	vie 29/04/16
16	Estudiar el efecto de la variación en la eficiencia en los generadores.	4 días	lun 18/04/16	jue 21/04/16
17	Comparar la información obtenida con los datos de fábrica	2 días	vie 22/04/16	lun 25/04/16
18	Revisar la bibliografía para corroborar los datos	4 días	mar 26/04/16	vie 29/04/16
19	Proponer mejoras al sistema a fin de maximizar la producción de la unidad generadora.	25 días	lun 02/05/16	vie 03/06/16
20	Brindar las recomendaciones adecuadas para maximizar la funcionalidad operacional de las Unidades	15 días	lun 02/05/16	vie 20/05/16
21	Concluir los datos más relevantes de la ejecución del proyecto en beneficio de los generadores	10 días	lun 23/05/16	vie 03/06/16
22	Exposición del proyecto ante el Tecnológico de Costa Rica	1 día	mié 08/06/16	mié 08/06/16
23	Exposición del proyecto ante el ICE	1 día	jue 09/06/16	jue 09/06/16

Figura 2. Cronograma de Desarrollo del Proyecto

Fuente: Elaboración Microsoft Project, 2016.

Capítulo 3. Marco teórico

3.1. Eficiencia de Generador

Conceptualmente la conservación de la energía establece que esta no se crea ni se destruye, solo se transforma. En el proceso de transformación al que se somete la energía se produce una pérdida de esta, la cual puede ser aprovechada, es decir, la transformación de la energía no es cien por ciento aprovechable, y se presenta una pérdida en la eficiencia de dicha transformación.

Un concepto de eficiencia se puede mencionar como lo cita Francisco Carvajal, "El concepto de eficiencia energética tiene que ver con la cantidad de energía útil que se puede obtener de un sistema o de una máquina. Así también, este concepto se refiere a todas las acciones que tengan como objetivo una reducción económicamente factible de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de una instalación determinada, asegurando un nivel de calidad igual o superior, y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía" (Carvajal, 2014)

El cálculo de la eficiencia de un motor/generador se mide como la relación existente entre su potencia de salida y entrada, para el caso de un generador la potencia de salida equivale a la potencia eléctrica, y esta respecto de la potencia de entrada para dado caso de modo mecánico, existen diferentes formas de medición, las cuales están reguladas por organismos internacionales tales como: la norma europea IEC, Americana IEEE y Japonesa JEC.

Para el cálculo de las eficiencias se utilizan, respectivamente, métodos directos e indirectos:

- Medición de modo directo es una obtención de los valores de las potencias directamente, para la potencia eléctrica en función de las corrientes y tensiones suministradas y la mecánica en función de la velocidad rotacional y el par disponible en el eje.

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100$$

Donde:

P_{out} = Potencia de Salida

P_{in} = Potencia de entrada

- Medición indirecta, consiste en medir la potencia de salida y calcular las pérdidas para así sumarle las mismas y poder obtener la potencia de entrada.

$$P_{loss} = P_{fe} + P_{fw} + P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{LL}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{loss} + P_{out}} \cdot 100$$

Donde:

P_{loss} = Potencia en las Pérdidas

P_{fe} = Potencia por pérdidas en el Entrehierro

P_{fw} = Potencia por pérdidas por fricción y rozamiento

$P_{s,\theta}$ = Potencia por pérdidas en los devanados del estator

$P_{r,\theta}$ = Potencia por pérdidas en los devanados en el rotor

P_{LL} = Potencia por Pérdidas por corrientes parásitas

Las pérdidas representan diferentes factores:

Pérdidas por rozamiento y ventilación (P_{fw}): Pérdidas provocadas por el rozamiento y todas aquellas pérdidas debidas al rozamiento aerodinámico en todas las piezas de la máquina, incluyendo la energía absorbida por los ventiladores acoplados al eje y en las máquinas auxiliares que forman una parte de la máquina.

Pérdidas de la bobina ($P_{s,\theta}$, $P_{r,\theta}$): En el caso de una máquina de inducción son pérdidas en las bobinas del rotor y del estator.

Pérdidas adicionales (P_{LL}): Pérdidas producidas por la carga de corriente en el hierro activo y otras piezas de metal con excepción de las bobinas conductoras: estas pérdidas son producidas por las corrientes de Foucault en las bobinas conductoras.

Pérdidas en el hierro (P_{fe}).

Factores muy importantes se involucran en el comportamiento eficiente de los motores, como lo menciona Carlos Pérez y Nicolás León en su texto, donde citan lo siguiente. *“El comportamiento del generador síncrono es muy importante para el sistema eléctrico de potencia, ya que aporta la energía eléctrica, estabilidad de frecuencia, regulación de tensión y eficiencia operativa requeridos para su adecuada operación. Debido a su importancia, tiene una normativa asociada muy extensa que cubre requerimientos de capacidades y comportamientos, métodos de prueba, guías de aplicación y recomendaciones para su operación, entre otros.”* (Leon, 2012)

3.2. Normas de Eficiencia

Hoy en día con el creciente énfasis que se le da a la conservación de la energía y los métodos más avanzados de ahorro energético, destaca un punto importante que se debe tener en cuenta, el estado de cada equipo con base en sus condiciones operacionales y de disponibilidad, es por esto que un tema como la eficiencia de un generador no debe de ser tomado a la ligera, ya que un punto tan importante ayuda a maximizar las inversiones de cada industria y, en especial, la de una planta de generación hidroeléctrica.

Debido a la necesidad de poseer equipo de avanzada se le realizan estudios a los generadores para saber su punto de operación más eficiente, aquí nace la importancia de normalizar y establecer diferentes estándares, que puedan regular los valores como el método de cálculo para alinear todos en una sola vertiente de comportamiento, lo que le facilita a las industrias poseer los valores más cercanos a la realidad.

Las políticas que existen actualmente son tan variadas como su forma de cálculo, aquí se encuentran la norma europea y la americana, las cuales son IEC (Internacional Electrotechnical Commission) e IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), respectivamente.

3.2.1. IEEE

La IEEE es una organización sin fines de lucro a nivel mundial, que se encarga de la estandarización en temas del área técnica, aquí se encargan de promover los avances en las tecnologías modernas, enfocándose en diferentes áreas.

La IEEE entre sus diferentes disciplinas tecnológicas, llega a producir aproximadamente el 30% de la literatura publicada a nivel mundial en áreas de la ingeniería eléctrica, electrónica, telecomunicaciones y más.

La IEEE es una organización, que se ha colocado en el mercado mundial como una empresa líder en la estandarización y desarrollo de normas, las cuales involucran gran variedad de industrias, para el 2013 poseía más de 900 estándares activos, con más de 500 normas en elaboración.

Dentro de estas normas se encuentra la norma IEEE 112, la cual se titula “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators” (IEEE, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004)

IEEE 112

La norma 112 de la IEEE establece una serie de características de medición y elaboración de los cálculos que se deben de realizar a un generador para la estimación de su eficiencia, la norma establece diferentes formas de medir estas eficiencias las cuales enumera de la siguiente manera.

Las eficiencias son la diferencia de la potencia de salida contra la potencia de entrada y la involucración de las pérdidas, para lo cual se proporcionan las siguientes fórmulas.

Eficiencia método Directo:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ Salida}{Potencia\ de\ Entrada}$$

La eficiencia por medio de las pérdidas se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de Salida}}{\text{Potencia de Salida} + \text{Pérdidas}}$$

La norma establece diferentes métodos para la obtención de las pérdidas, dependiendo de las características que se puedan obtener.

Métodos perdidos IEEE:

- Método (A) Entrada-salida
- Método (B): Entrada-salida con segregación de pérdidas, medidas indirectas.
- Método (C) Máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y mediciones indirectas.
- Método (E) Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y método directo de cálculo de pérdidas por dispersión de carga.
- Método (E1) Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y asumiendo las pérdidas por dispersión de carga.
- Método (F) Circuito equivalente con medida directa de las pérdidas
- Método (F1) Circuito equivalente asumiendo el valor de las pérdidas
- Método (C/F) Circuito Equivalente, calibrado por medio del método C.
- Método (E/F) Circuito equivalente calibrado por el método E
- Método (E1/F1) Circuito equivalente calibrado por el método E1, asumiendo las pérdidas.

Método IEEE 112-E

La norma establece la selección del método con base en diferentes características que puede presentar el generador como también la obtención de

datos, para el método E se establecen características importantes que se acoplan al PH Río Macho.

La norma establece que el método se basa en la medición de la eficacia por medio de la suma de las pérdidas y la potencia de salida, la cual es la eléctrica, esta suma representa la potencia mecánica que aportan las turbinas al generador.

Se realizan diferentes pruebas, según la norma, las cuales son:

- Resistencia de Frío
- Prueba bajo carga
- Prueba sin carga
- Prueba por dispersión de carga

Cálculos

Las pruebas para el cálculo de pérdidas fueron realizadas por la compañía Andritz Hydro y proporcionadas por el centro de documentación de PH Río Macho.

Tipos de pérdidas que se exponen en la norma:

- **Estator I^2R**

Para el estator la norma cita la siguiente fórmula:

$$P_{SIR} = 1.51 * I^2R$$

Donde:

I=La corriente de línea (A)

R= Resistencia entre dos líneas (Ω)

Corrección por temperatura de la resistencia

La resistencia de las bobinas es tomada a una temperatura en específico, por lo que se le debe de aplicar una corrección al valor con base en la temperatura en la cual se encuentra trabajando.

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1}$$

Donde:

R_a = La resistencia conocida (Ω) a temperatura t_a

t_a = La temperatura de la resistencia a la cual fue medida ($^{\circ}\text{C}$)

t_b = La temperatura de la resistencia a la cual es corregido ($^{\circ}\text{C}$)

R_b = La resistencia corregida (Ω) a temperatura t_b

K_1 =factor de corrección para el aluminio 225, para cobre 234.5

- **Rotor I^2R**

Las pérdidas del rotor incluyen las ocurridas por el contacto de las escobillas, donde se debe de utilizar el deslizamiento como se observa en la siguiente ecuación.

$$I^2R = (\text{potencia de entrada del estator} + I^2R(\text{estator}) + \text{peridas en el nucleo}) * s$$

Donde:

s = Deslizamiento

Deslizamiento

El deslizamiento puede medirse directamente por un estroboscopio o se puede realizar un cálculo de la relación de las velocidades del generador.

$$\text{Velocidad de Deslizamiento} = n_s + n_t$$

Donde:

N_s =Velocidad de Sincronización (RPM)

N_t =Velocidad medida en el generador

El deslizamiento se expresa como:

$$s = \frac{\text{Velocidad de Deslizamiento (RPM)}}{n_s \text{ (RPM)}}$$

Para el deslizamiento también se debe de realizar una corrección por temperatura:

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{t_t + k_1}$$

Donde:

S_s = El deslizamiento corregido a la temperatura t_s

s_t = El deslizamiento a la temperatura del devanado del estator.

t_s = La temperatura de la resistencia a la cual es corregido ($^{\circ}\text{C}$)

t_t = La temperatura del devanado del estator a la cual es corregido ($^{\circ}\text{C}$)

K_1 =factor de corrección para el aluminio 225, para cobre 234.5

- **Fricción y ventilación**

Con los datos de los resultados de las pérdidas en vacío para diferentes valores de tensión de alimentación obtenidos en el ensayo de vacío, se dibuja una gráfica con los valores de pérdidas constantes en función de los valores de voltaje de alimentación en vacío al cuadrado. En la elaboración de esta gráfica se descartan los puntos que muestran una desviación muy notoria. El resultado, que es una línea recta, se extrapola hasta encontrar el punto de corte con el eje de las pérdidas. El valor leído en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación.

- **Núcleo**

Las pérdidas del núcleo se obtienen restando las pérdidas de fricción y ventilación, y las pérdidas por el estator.

- **Dispersión de carga**

Se basa en las pruebas de aislamiento y se determinan a partir de los valores medidos en una prueba con carga y las posteriores correcciones necesarias de acuerdo con las condiciones de temperatura ambiente y temperatura de los devanados durante la prueba.

3.2.2. IEC

The Commission Electrotechnical International (IEC) define el cálculo de eficiencia de motores y generadores en su norma 60034-2 de 1996 y la actualiza con la 60034-2-1 del 2007, la cual abarca un grupo de medidas que pueden ser utilizadas para la obtención de eficiencias.

Al igual que la norma IEEE posee un cálculo con base en las pérdidas, estas son:

- Pérdidas en el cobre de estator
- Pérdidas en el hierro del núcleo
- Pérdidas en el rotor
- Pérdidas por fricción
- Pérdidas adicionales de carga (P_{LL})

Las cuatro primeras se determinan a partir de la potencia de entrada para un motor, con sus datos de tensión, corriente, velocidad de rotación y torque.

Las pérdidas adicionales de carga son las más difíciles de calcular, debido a que la norma ofrece diferentes formas de calcularlo, ya sea por métodos directos o indirectos.

Medición de eficiencia IEC/EN 60034-2: 1996	Medición de eficiencia IEC/EN 60034-2-1: 2007
Método directo	Método directo
Método indirecto: - P_{LL} estimada en 0.5% de la potencia de entrada a carga nominal	Método indirecto: - P_{LL} determinada por medición - P_{LL} estimada en 2.5% - 0.5% de la potencia de entrada a carga nominal - Método alternativo con cálculo matemático de P_{LL}
Pérdidas en bobinados de rotor y estator determinadas a 95°C	Pérdidas en bobinados de rotor y estator a [25°C + elevación de temp. medida]

Figura 3. Tabla de Perdidas de IEC

Fuente: (ABB, 2013)

Diferentes autores como Electric Motor Sistem (EMSA) mencionan la importancia del uso adecuado de la norma IEC, ya que debe seguirse un orden que permita ganar en beneficio del cálculo; de esta forma, se muestra a continuación los pasos para generar un estudio con base en la norma IEC 60034-2-1.

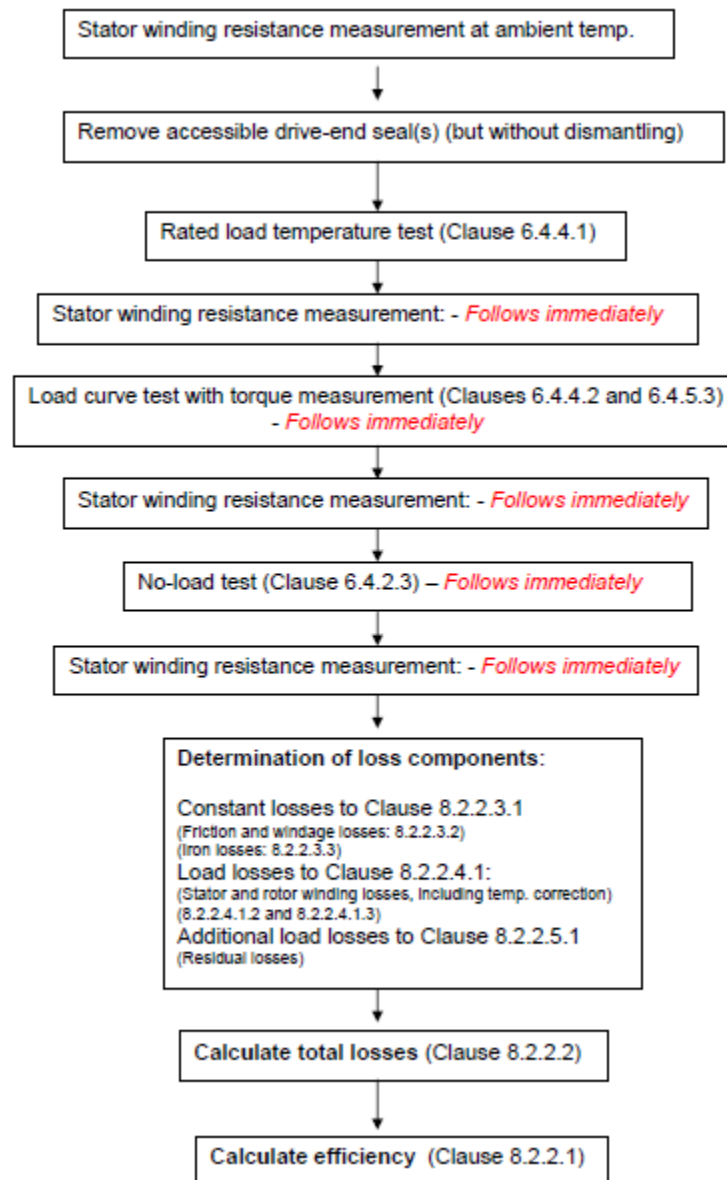


Figura 4. Orden de Calculo IEC

Fuente: (EMSA, 2011)

3.3. Curva de Eficiencia

La eficiencia es la relación existente entre la potencia de salida y la potencia de entrada de un generador, donde se presenta un conjunto de pérdidas de un proceso a otro, estas son ocasionadas por diferentes características dentro de la máquina, es por esto que tiene gran importancia cómo se encuentre el estado del equipo para presentar mayores o menores pérdidas.

El estudio de la eficiencia tiene mucha relevancia para conocer la capacidad operativa que tiene el generador, permite generar un criterio de cuál es el estado y si este presenta problemas que afecten la producción de energía.

Las curvas de eficiencia le permiten al ingeniero interpretar el comportamiento de la máquina y su estado en operación.

Diferentes autores mencionan la importancia que radica en el estudio de la eficiencia, como cita Antonio Carvajal: *“Actualmente, la eficiencia energética del generador es un parámetro utilizado para los análisis relacionados a la gestión de las centrales generadoras y se utiliza para dar soporte técnico a la toma de decisiones, rehabilitaciones, sustitución y operación eficiente de estos equipos”* (Carvajal, 2014).

Seguidamente se muestra la gráfica de la curva de eficiencia:

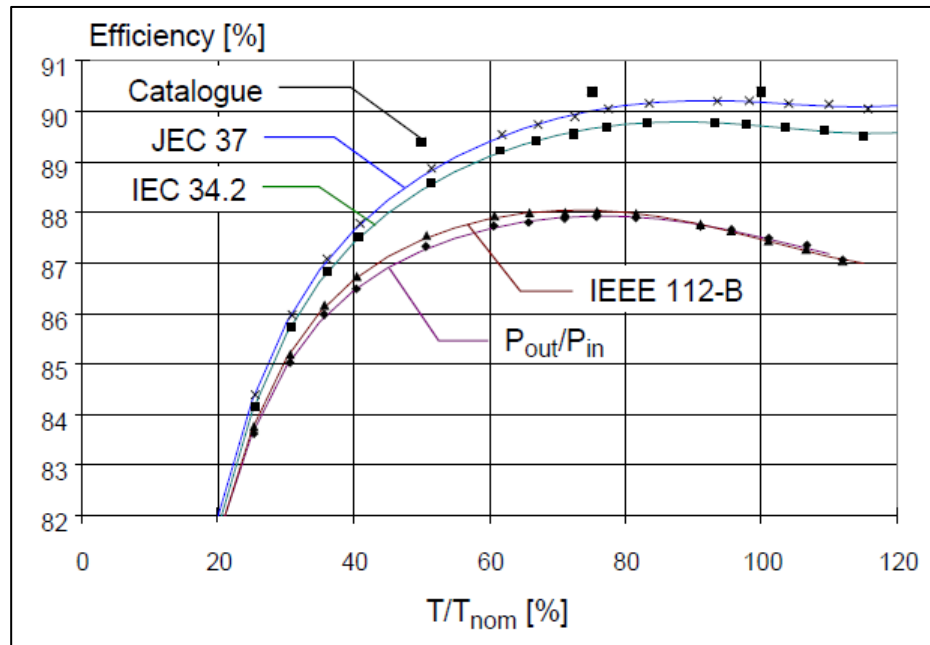


Figura 5. Curva de Eficiencia

Fuente: (Van-Roy, 2011)

3.4. Curva de Capacidad

Las curvas de capacidad son gráficas generadas a partir de los valores de operación de los generadores con el fin de establecer parámetros de operación de los equipos, donde se establecen límites superiores e inferiores que les permiten a los operadores monitorear el estado actual de los generadores.

Como lo menciona el ingeniero Manuel Martínez: *“La operación de un generador síncrono es limitada principalmente por el calentamiento de los devanados estático y rotórico, el sobrecalentamiento de estos devanados repercute en la vida útil de la máquina, se dice que por cada 10°C que se excede la temperatura nominal del devanado, el tiempo promedio de la máquina se acorta a la mitad. Por esta razón, una máquina síncrona no puede ser sobrecargada a menos que sea absolutamente necesario.”* (Martínez, 2003).

A continuación se presenta la gráfica correspondiente a la curva de capacidad:

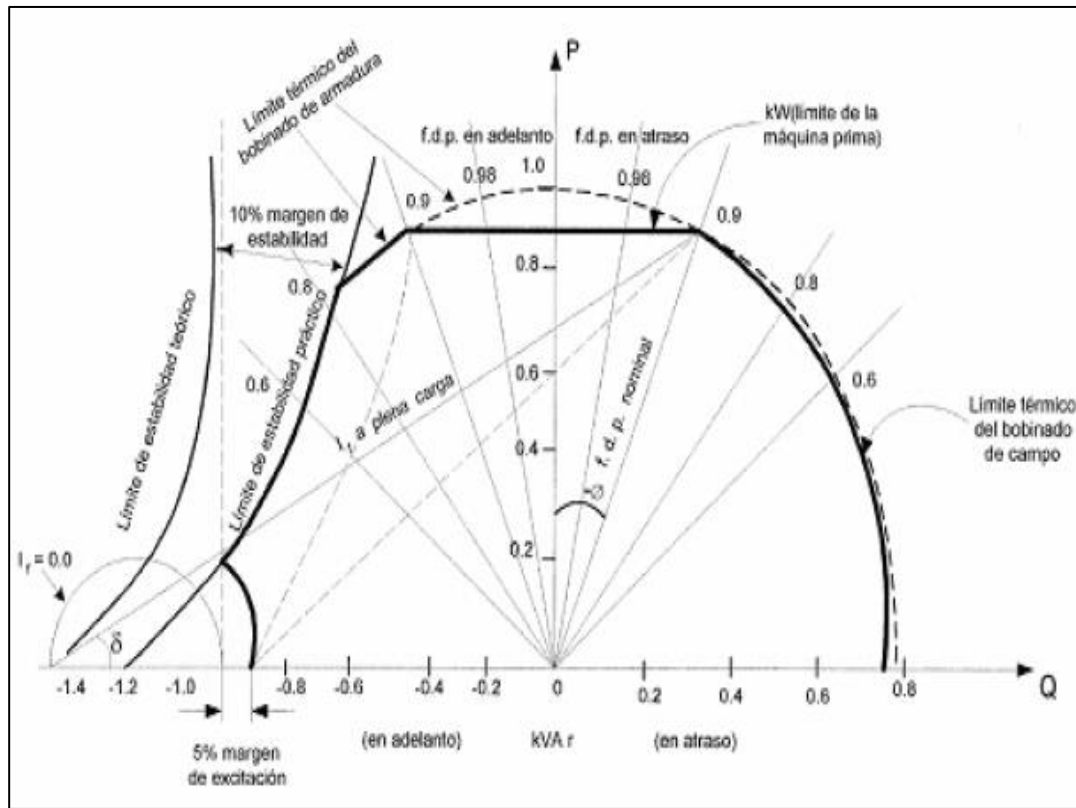


Figura 6. Curva de Capacidad

Fuente: (Leonardo Paucar, 2011)

3.5. Andritz Hydro

La empresa cuenta con más de 175 años de experiencia en turbinas y generadores, y han instalado cerca de 31 600 turbinas para una capacidad de 434 600 MW instalados con rangos de hasta los 800 MW, es por esto que son líderes en servicio y rehabilitación.

Entre los principales productos que ofrecen se encuentran:

- Componentes Hidromecánicos
- Componentes de Turbinas
- Generadores hidro y turbo.
- Componentes eléctricos.

Andritz Hydro cuenta con talleres de trabajo en Europa, Asia y América del Norte, los cuales brindan:

- Soluciones, productos y servicios para todo el rango de equipos eléctricos para centrales hidroeléctricas.
- Ingeniería de planta y potencia, incluidos estudios de sistemas y red.
- Integración de todos los sistemas (“from water-to-wire”).

Capítulo 4. Estudio Comparativo de las Normas

Introducción

En este capítulo se realizó un estudio comparativo entre las características de cálculo que presentan las normas IEC e IEEE, y además los resultados del cálculo de eficiencias a diferentes valores de potencia para estudiar su comportamiento. El estudio se realizó en la unidad de generación #1 de la PH Río Macho y, como referente teórico, se utilizaron los documentos proporcionados por el centro de documentación de esta planta.

4.1. Características comparativas

Ambas normas dentro de sus atestados poseen una gran variedad de características que las diferencian, pero que a la vez las relacionan entre sí, un estudio comparativo se basa en ejecutar las fórmulas de cada una de ellas y comparar los resultados directamente.

Como se mencionó anteriormente el diseño de las normas se basa en dos métodos, directo (medición de potencias) e indirecto (medición de pérdidas), para efectos del trabajo dentro de la PH Río Macho se procedió a realizar el estudio por el método indirecto, es decir, calculando sus pérdidas, debido a que la investigación realizada por ANDRITZ HYDRO utilizó la norma IEC 60034-2 por el método indirecto. Los datos proporcionados por el fabricante fueron realizados en las unidades 1 y 2 es por esto que para la norma IEEE se utilizó la unidad número 1. Dichos datos presentan un número de características que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos de Fabrica Unidad 1

Dato	Valor
Potencia nominal	21.2 MVA
Tensión Nominal	13.8 KV
Corriente Nominal	886.9 A
Velocidad Nominal	450 RPM
Clase de Aislamiento	F
Frecuencia	60 Hz
Forma Constructiva	IM 7325

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de PH Río Macho, 2016.

Para el cálculo de las pérdidas de potencia del generador se utilizaron los datos de las resistencias e impedancias que fueron otorgadas por el fabricante y obtenidas del centro de documentación de la planta de Río Macho.

Tabla 2. Datos de Impedancias

Dato	Valor
Resistencia del devanado del estator	26,3 mΩ
Resistencia del devanado del rotor	47,0 mΩ
Capacidad del devanado del estator, 3 fases contra tierra	1,075 μF
Capacidad del devanado del rotor, devanado contra tierra	0,08 μF

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho, 2016.

Los ingenieros de Andritz Hydro realizaron las pruebas necesarias dentro de la planta para garantizar la veracidad de los cálculos, así como también la eficiencia y estado en el momento de cada unidad a la hora de ser instalada.

A continuación se exponen los datos obtenidos por parte del fabricante para las pérdidas de los generadores por medio de la norma IEC.

Tabla 3. Pérdidas en Unidades dadas por el Fabricante

Tipo de Pérdida	Valor (KW)
Fricción y Rozamiento	52
Cojinetes del generador	24
Hierro	99
Cobre de estator y adicionales de carga (a 115°C)	119
Cobre del Rotor y perdidas eléctricas de las escobillas (115°C)	57
Sistemas de Excitación	9
Totales	360

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho, 2016.

4.1.1. Eficiencia IEC 34-2.

Para la estimación de los valores de eficiencia se tomaron los utilizados por el fabricante, los cuales reflejan los valores en la siguiente tabla. El estudio de la eficiencia fue realizado por medio de pruebas en sitio, las cuales permitieron una mayor exactitud en los datos.

Tabla 4. Eficiencia IEC Unidad 1

Potencia (%)	Eficiencia (%)
25	97,40
50	97,68
75	97,87
100	98,12

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho, 2016.

4.1.2. Eficiencia IEEE 112

Para el estudio de la norma IEEE se seleccionó el método de prueba tipo E, ya que en sus especificaciones se aclara que se debe aplicar un método indirecto de cálculo de potencias, es decir, considerando las pérdidas.

Para efectos de cálculo se programaron las fórmulas que indica la norma en una hoja de Excel, así se redujo el tiempo, permitiendo comparar los datos más rápidamente.

La toma de los datos se realizó en la sala de control de las instalaciones de la PH Río Macho en Orosi, por medio del sistema SCADA, el cual permitió extraer los valores que cita la norma, ya que Río Macho es una planta de regulación de energía del país, y por esta razón las unidades se encuentran en una constante variación de carga en el transcurso de los días, es por esto que en la norma IEC se comparan los datos tomados y los más cercanos a las pruebas.

Los datos que se tomaron en cada una de las mediciones fueron:

- Potencia de Salida (MW).
- Corriente de Línea (A).
- Velocidad nominal.
- Factor de Potencia.
- Temperaturas en cada uno de los devanados de las terminales del rotor y estator.

Las mediciones anteriores se colocaron en la hoja de Excel, la cual realizaba los cálculos necesarios.

A continuación se expondrá uno de los cálculos para la toma de datos, la cual fue realizada el 16 de marzo del 2016 a las 6:30 pm.

Aquí se observa que los datos obtenidos se colocan de manera que puedan ir realizando cálculos.

Tabla 5. Hoja de cálculo de eficiencia U1

Pérdidas para IEEE:		67,25%
I²R(Rotor)(W)		6834,79796
I²R(Estator)(W)		162108,601
Potencia (W)		10760000
Toma de Datos:		
Corriente(A)		466
	a	481
	b	452
	c	467
Velocidad	RPM	408,15
	%	90,70%
Deslizamiento	TempCorrec	1,53171362
	Valor	1,907
Fp		1
Resistencias	0,0263	0,02098276
Temperaturas(°C)		
Estator		
U1		45,72
U2		46,26
U3		47,87
V1		45,08
V2		44,75
V3		46,8
W1		45,08
W2		44,75
W3		47,33
Rotor		
U		48,09
V		46,26
W		48,95
EFICIENCIA		96,82%

Fuente: Elaboración propia por medio de Excel, 2016.

Para efectos de este proyecto se realizó una dispersión de siete grupos de datos a diferentes potencias, las cuales se compararon con el estudio realizado por el fabricante, que tomó cuatro; los datos se colectaron con la ayuda del registro histórico que se almacena en la base de datos del SCADA en la planta de Río Macho, con el fin de acercar más la comparación.

La siguiente tabla es un resumen de los datos recolectados y sus cálculos, expresa el porcentaje de la potencia a la cual se encontraba el equipo así como también la eficiencia obtenida con la hoja de cálculo anterior.

Datos de eficiencia IEEE

Tabla 6. Eficiencia Unidad 1 IEEE

Potencia (MW)	Potencia (%)	Eficiencia (%)
4.56	28,63	93,13
8.80	55,00	96,15
9.29	58,06	96,31
10.76	67,25	96,82
11.51	71,94	97,01
13.51	84,44	97,35
14.15	88,44	97,45

Fuente: Elaboración Propia por medio de Excel, 2016.

4.1.3. Gráfica Comparativa

Una vez obtenidos los valores de eficiencia elaborados por medio de las dos normas a condiciones de potencia similares se procedió a realizar la gráfica de los datos y comparar sus valores para exponer las variaciones en cada uno de los puntos.

Se utilizó el programa MATLAB[®] R2010a, el cual por medio de un código, enlaza las hojas de Excel para llamar los datos y las coloca como se observa a continuación:

```

1      %Jorge Luis Morales Arce
2      %201106124
3      %Practica Profesional
4      %Desarrollo de Eficiencias
5      %Metodo Grafico
6      %Datos de entrada para la parametrizacion de la grafica IEC
7 -   DatosEntradaIEC=xlsread('Datos IEC.xlsx');
8 -   DatosEntradaIEC;
9 -   xIEC=DatosEntradaIEC(:,1);
10 -  yIEC=DatosEntradaIEC(:,2);
11 -  %yIEC=DatosEntradaIEC(:,3);
12
13     %Datos de entrada para la parametrizacion de la grafica IEEE
14 -  DatosEntradaIEEE=xlsread('Datos IEEE.xlsx');
15 -  DatosEntradaIEEE;
16 -  xIEEE=DatosEntradaIEEE(:,1);
17 -  yIEEE=DatosEntradaIEEE(:,2);
18 -  %yIEEE=DatosEntradaIEEE(:,3);
19 -  plot(xIEEE,yIEEE,xIEC,yIEC)

```

Figura 7. Programación de Curvas

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

Una vez realizada la programación se puso a correr el sistema para verificar y obtener las gráficas correspondientes a la comparación, las cuales se pueden observar en la siguiente figura, y representan una trasposición de ambas normas y sus valores.

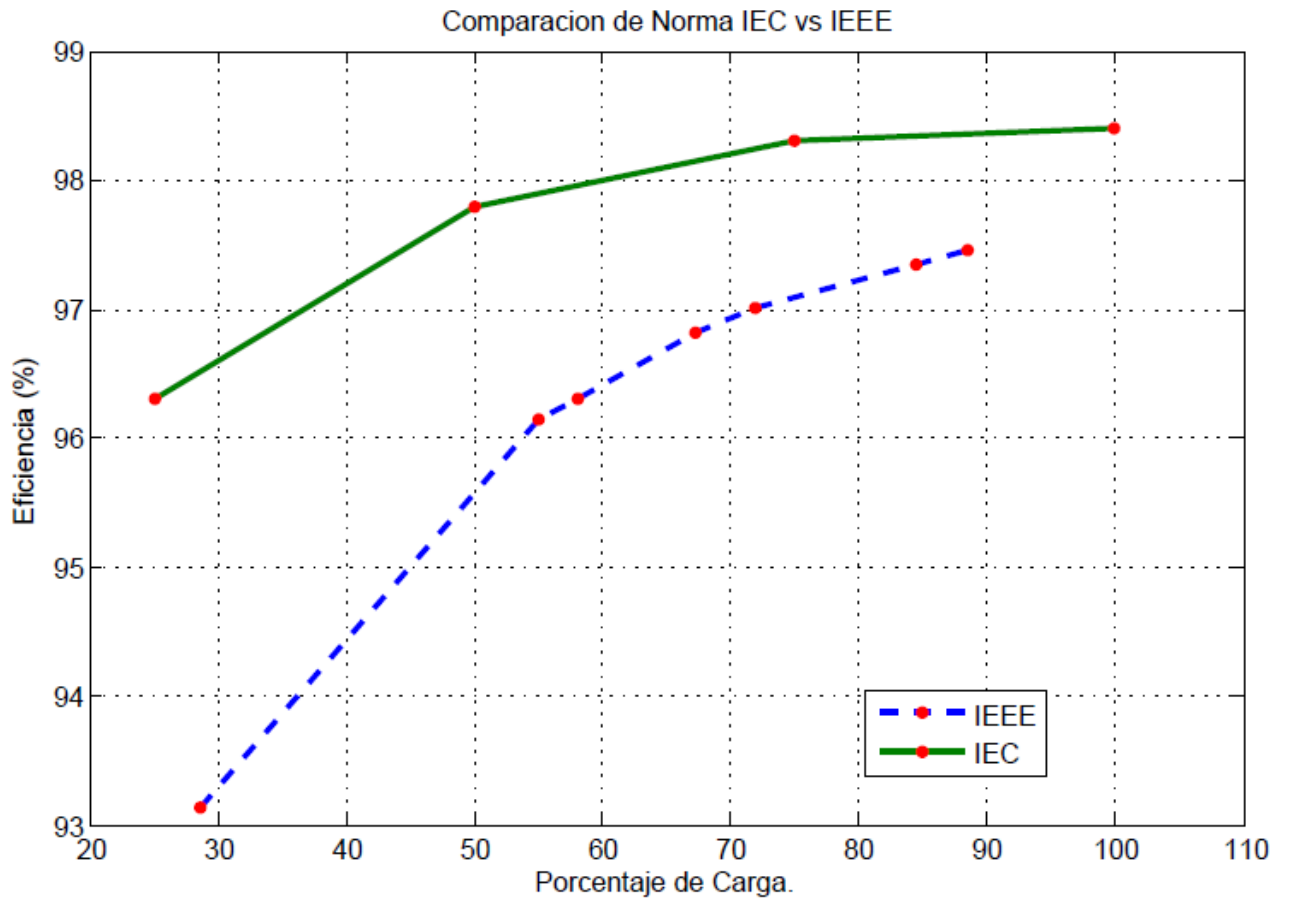


Figura 8. Eficiencias IEC vs IEEE

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

Ante los resultados obtenidos se presenta una variación significativa en el valor de los datos, las variaciones marcan aproximadamente un 2% de la eficiencia.

Dicho valor de variación se presenta por el método del cálculo, debido a que esta es la forma en que la norma expresa las pérdidas.

Como se muestra en la gráfica siguiente las pérdidas varían significativamente.

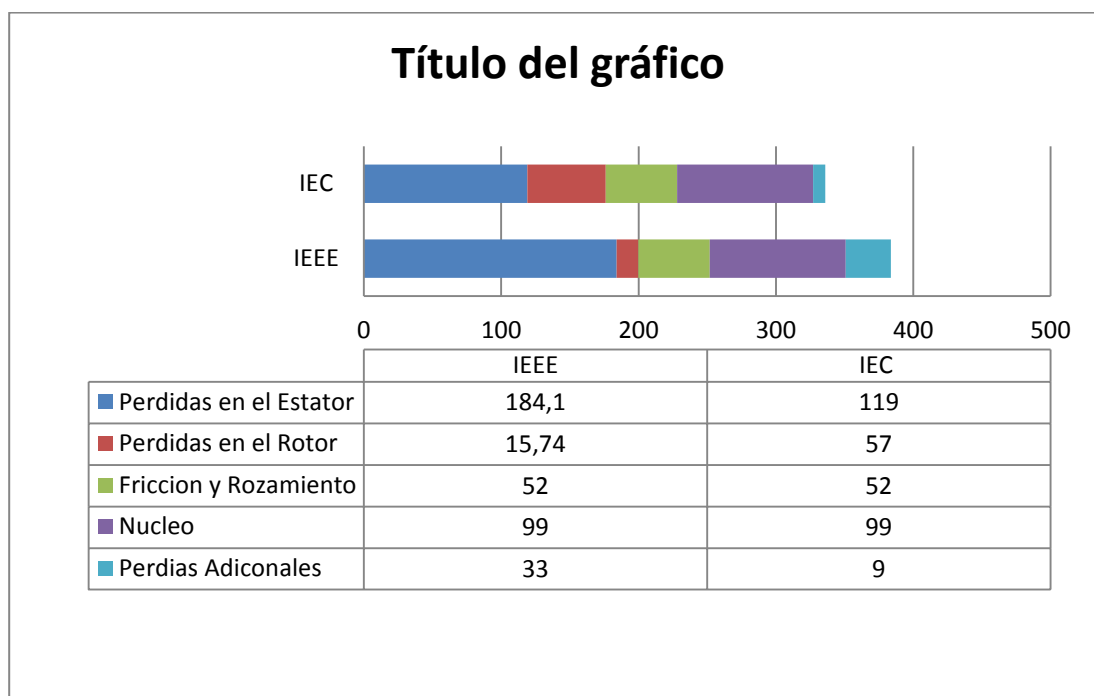


Figura 9. Datos de pérdidas

Fuente: Elaboración propia por medio de Excel, 2016.

Dentro de las normas se definen diferencias y métodos que son similares para el cálculo de las pérdidas, como lo son las temperaturas.

Datos Generales

Dentro de la norma se indican algunos parámetros que ayudan a establecer ciertas diferencias que afectan el cálculo y otros que varían al ser comparados. A continuación se mencionan algunos estándares para garantizar la viabilidad del cálculo realizado.

Dentro de la norma IEEE se establece el factor de distorsión de armónicos, THD, el cual no debe de exceder el 0,05.

Como también el desbalance de tensiones en el sistema trifásico, la norma indica que no puede exceder el 0,5%.

A la vez indica que la frecuencia no debe desviarse más de $\pm 0,1\%$, y en caso de presentarse variaciones en la realización de la prueba, ésta no debe de exceder el 0,33% de la frecuencia promedio.

Para la norma IEC el factor de armónicos de voltaje no debe de exceder 0,03, el desbalance de voltaje del sistema trifásico debe de ser tal que el componente de secuencia negativa no exceda el 1,5%.

La frecuencia no debe de desviarse más de $\pm 0,3\%$ de la frecuencia nominal.

Temperaturas

La norma IEEE establece la corrección por temperatura, la cual se debe realizar para las impedancias en los devanados de armadura, así como también el efecto que puede tener sobre el deslizamiento de la máquina.

La norma IEEE expone la temperatura ambiente de referencia a 25°C y hace explícita referencia a correcciones por temperatura por medio de la fórmula(citada anteriormente); para la realización de los cálculos anteriores se efectuaron las correcciones por temperatura correspondientes, las cuales fueron tomadas del sistema SCADA para cada fase del generador.

La norma IEC no establece un parámetro de temperatura estándar, propiamente, el procedimiento indica que se debe realizar una medición una vez ejecutada la prueba cuando la misma está en caliente y realizar una referencia a temperatura ambiente.

Cálculo de las Pérdidas

Ambas normas establecen parámetros y metodologías para el cálculo de las pérdidas, algunas presentan similitud en las mecánicas; pero las pérdidas en los devanados y por dispersión de la carga tienden a variar significativamente.

En cuanto a las pérdidas por fricción y ventilación ambas normas comparten la forma de cálculo, es por esto que se consideran similares. Situación parecida ocurre con las pérdidas en el núcleo, se toman sin ninguna variación.

Las pérdidas I^2R en el estator varían en la forma directa de la corrección del valor, la norma IEEE establece que para corregir se debe llevar el valor de la resistencia tomada a 25 °C y extrapolarlo a uno aproximado de la temperatura a la cual estaba operando el generador, luego se debe calcular el valor de las pérdidas.

Para la norma IEC la corrección se debe aproximar a la temperatura desde las pérdidas ya calculadas y no, directamente, a la resistencia utilizada que estaba inicialmente a 25 °C.

Cálculos como los de las pérdidas en la dispersión de la carga varían significativamente, debido a que se utilizan métodos indirectos, los mismos para la norma IEEE se ven como el 1,8 de la suma de las pérdidas y para la IEC el 0,5 de las mismas.

Acotaciones debido a la comparación

La ausencia de la corrección en la impedancia de los devanados para la norma IEC desvía el cálculo, ya que no prevé la variación existente a diferentes alturas y condiciones atmosféricas en las cuales se pueda presentar la prueba.

Aunque las diferencias en los valores de distorsión y desbalance de tensiones son porcentualmente muy bajas, éstas siempre permitirán una pequeña alteración en la obtención de los resultados.

De los valores más determinantes en la variación de resultados son las correcciones de temperatura de las pérdidas I^2R del estator presente en IEEE, pero ausente en IEC.

Capítulo 5. Análisis de la Eficiencia de Generador

Introducción

En este capítulo se procedió a elaborar un conjunto de etapas que permitieron estudiar la eficiencia del generador, como también de todo el grupo generador-trasformador. El enfoque se propuso con base en: la obtención de la eficiencia por medio de la norma IEEE 112-E, y la construcción de gráficas, que permitieron observar un comportamiento característico, esto con el fin de establecer una base teórica y gráfica del funcionamiento de los generadores a diferentes potencias de salida, para beneficiar el activo a futuros años, previniendo que el equipo no sufra el mayor deterioro.

Las características de la eficiencia se relacionaron con factores como posibles fallas y efectos negativos, que pudieran suceder sobre las partes mecánicas y eléctricas del equipo, para tal efecto se estudió el estado en cuestión de las unidades generadoras.

5.1. Cálculo de las Curvas de Eficiencia

5.1.1. Toma de Datos

Para la elaboración de las curvas de eficiencia se tomó como base la norma IEEE 112-E (como se mencionó anteriormente), para cada uno de los casos se obtuvieron los valores del sistema SCADA, para que facilitaran el procedimiento de cálculo.

Los valores que se extrajeron del sistema fueron:

- Potencia de Salida (MW)
- Corriente de Línea (A)
- Velocidad nominal.(RPM)
- Factor de Potencia
- Temperaturas en cada uno de los devanados de las terminales del rotor y estator.

Con estos valores se elaboró la hoja de cálculo que permitió la obtención de las eficiencias.

Para el desarrollo del proyecto se estudiaron las tres unidades de mayor potencia, a saber, U3, U4 y U5, las cuales trabajan a una potencia nominal de 36 MW. Estos datos fueron tomados de la placa del generador (**ver Anexo 1**).

Para el primer cálculo se tomó y estudió la norma con base en el método E, el cual se basa en la potencia eléctrica y la relación de las pérdidas.

Después se procedió a desarrollar el siguiente ejemplo con base en la toma de datos y cálculos realizados el día 5 de abril del 2016 en el centro de Producción Río Macho, a las 13 horas con 39 minutos.

Las pruebas para el cálculo de pérdidas mecánicas fueron realizadas por la compañía Andritz Hydro y proporcionadas por el centro de documentación de PH Río Macho.

El primero de los pasos fue la recopilación de los datos que se propiciaron por medio del sistema SCADA de la PH Río Macho.

Tabla 7. Datos para el Cálculo de Eficiencia

Dato	Valor
Potencia (MW)	15.83
Corriente (A)	847
Factor de Potencia	0.85
Tensión	13.8
Unidad	5
Hora	1:39 pm

Fuente: Sistema SCADA, sala de control de PH Río Macho, 2016.

Para hacer las correcciones debidas en la ejecución de la norma, se tomaron los datos de temperatura.

El primer grupo de los datos corresponde a cada una de las fases del devanado del estator y su temperatura a 25°C.

Tabla 8. Datos de temperatura del devanado de estator.

Zona de medición	Temperatura °C
U1	52.17
U2	53.57
U3	53.14
V1	50.77
V2	51.63
V3	53.78
W1	52.49
W2	52.49
W3	52.71

Fuente: Sistema SCADA de sala de control de PH Río Macho, 2016.

Para el segundo grupo de datos de temperatura se obtuvieron los valores del rotor.

Tabla 9. Datos de temperaturas del rotor.

Zona de medición	Temperatura °C
U	52.06
V	51.20
W	48.19

Fuente: Sistema SCADA de sala de control de PH Río Macho, 2016.

Una vez obtenidos los datos del sistema SCADA se calcularon las pérdidas para poder obtener el valor de eficiencia.

5.1.2. Pérdidas en el Estator I^2R

Por norma:

$$P_{SIR} = 1.51 * I^2R$$

La resistencia que se observa debe de ser corregida, como se mencionó anteriormente.

Corrección por temperatura de la resistencia

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1}$$

$$R_b = \frac{(0.0111)(53 + 225)}{25 + 225}$$

$$R_b = 0.009075 \Omega$$

Una vez corregido el valor de la impedancia del devanado del estator se procedió a sustituir el valor en la fórmula de las pérdidas del estator.

$$P_{SIR} = 1.51 * (847 A)^2 * (0.009075 \Omega)$$

$$P_{SIR} = 9765.3 W$$

5.1.3. Pérdidas en el Rotor I^2R

Las pérdidas en los devanados del rotor se encuentran directamente afectadas en las bobinas, las características de operación y ciclaje de carga benefician su magnitud, las pérdidas en el devanado de campo se ven afectadas por diferentes situaciones donde se involucran las escobillas. Las pérdidas de campo se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor, y son afectadas, de igual manera, por la temperatura.

$$I^2R = (178765,3) * 1,62049$$

Deslizamiento

El efecto del deslizamiento en los generadores es muy bajo debido a que, constantemente, opera a velocidades de sincronización, lo que es equivalente a 450 RPM.

$$I^2R = 289687,2 \text{ W}$$

5.1.4. Pérdidas Mecánicas

Las pérdidas mecánicas dependen de las características constructivas y de diseño, factores como la fricción en los rodamientos, la velocidad, el tipo de rodamiento y la lubricación utilizada, afectan las pérdidas mecánicas dentro del generador. Las variaciones en los cambios de carga, afectan muy ligeramente al valor de las pérdidas mecánicas, es por esto que se toma el cálculo estándar para todas las potencias.

Para este proyecto, las pérdidas mecánicas fueron tomadas de las diferentes pruebas que se le realizaron al generador (una vez instalado en el PH. Río Macho), por parte de los ingenieros de la empresa Andritz Hydro, y esta información fue suministrada por el centro de documentación de PH Río Macho.

- **Fricción y ventilación**

Con los datos obtenidos de las pérdidas en vacío para diferentes valores de tensión de alimentación, se dibuja una gráfica con los valores de pérdidas constantes en función de los valores de voltaje de alimentación en vacío al cuadrado. En la elaboración de esta gráfica se descartan los puntos que muestran una desviación muy notoria. El resultado, que es una línea recta, se extrapola hasta encontrar el punto de corte con el eje de las pérdidas. El valor leído en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación.

- **Núcleo**

Las pérdidas del núcleo se obtienen restando las pérdidas de fricción y ventilación y las pérdidas por el estator.

Las pérdidas mecánicas, especificadas anteriormente, se obtuvieron por medio del centro de documentación del PH Río Macho.

Tabla 10. Pérdidas Mecánicas

Pérdidas	Watts
Core (Núcleo)	169000
Stray-load-Loses (Perdidas por dispersión de Carga)	72000
F&W (Fricción y Ventilación)	158000

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho, 2016.

5.1.5. Dispersión de carga

Se determina a partir de los valores medidos en una prueba con carga y las posteriores correcciones necesarias de acuerdo con las condiciones de temperatura ambiente y temperatura de los devanados durante la prueba. Se estiman como 1,8% de la potencia útil nominal.

5.1.6. Hoja de Cálculo Norma IEEE

Para desarrollar un estudio más eficiente, estandarizado y de mayor rapidez, se diseñó una hoja en Excel que permite un cálculo inmediato, con solo ingresar los valores medidos en el sistema SCADA.

Tabla 11. Hoja de Cálculo de Eficiencia Unidades 3, 4 y 5.

Toma de Datos para el cálculo de eficiencias			
Norma IEC		Norma IEEE	
% de carga	1	% de carga	1
100	98,12	46,9%	95,96%
90	98,07	44,0%	95,66%
80	97,99	91,5%	97,73%
70	97,87	72,5%	97,25%
60	97,68	24,9%	92,75%
50	97,4	59,1%	96,68%

Perdidas para IEEE:		46,9%	44,0%	91,5%	72,5%	24,9%	59,1%
I ² R(Rotor)(W)		8085,01252	9765,27425	30203,4532	18457,505	4869,53793	14921,9279
I ² R(Estator)(W)		285884,655	289687,374	323295,487	303692,185	279326,526	298353,824
Potencia (W)		16890000	15830000	32930000	26090000	8960000	21260000
Datos de entrada							
Corriente(A)		774	847	1478	1157	605	1049
	a	748	822	1478	1157	605	1049
	b	780	857	1478	1157	605	1049
	c	789	860	1478	1157	605	1049
Velocidad	RPM	450	450	450	450	450	450
	%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Deslizamiento	TempCorrec	1,61439216	1,6204902	1,62294118	1,62005882	1,60652941	1,62217647
	Valor	2	2	2	2	2	2
Fp		0,97	0,85	1	1	0,69	0,91
Resistencias	0,0111	0,0089972	0,00907458	0,00921757	0,00919211	0,00886923	0,0090403
Potencia Mecanica		17930000	16940000	33670000	27000000	9890000	22270000
Padicionales		18720	19980	13320	16380	16740	18180
Temperaturas(°C)							
Estator							
U1		49,8	52,17	57,34	56,56	46,67	51,91
U2		51,09	53,57	57,34	56,56	46,67	51,91
U3		50,88	53,14	57,34	56,56	46,67	51,91
Promedio		50,59	52,96	57,34	56,56	46,67	51,91
V1		48,62	50,77	57,34	56,56	46,67	51,91
V2		49,37	51,63	57,34	56,56	46,67	51,91
V3		51,42	53,78	57,34	56,56	46,67	51,91
Promedio		49,80333333	52,06	57,34	56,56	46,67	51,91
W1		50,13	52,49	57,34	56,56	46,67	51,91

W2	50,34	52,49	57,34	56,56	46,67	51,91
W3	50,34	52,71	57,34	56,56	46,67	51,91
Promedio	50,27	52,56333333	57,34	56,56	46,67	51,91
Rotor						
U	50,99	52,06	50,9	50,41	48,11	50,77
V	50,02	51,2	50,9	50,41	48,11	50,77
W	47,33	48,19	50,9	50,41	48,11	50,77
Promedio	49,44666667	50,48333333	50,9	50,41	48,11	50,77

Fuente: Elaboración Propia en Excel, 2016.

5.1.7. Elaboración de las Gráficas de Eficiencia

Para generar las gráficas más representativas se trabajó con un conjunto de datos durante seis veces al día en diferentes horarios, para asegurar la variación, debido a que el generador es controlado por el CENCE (Centro Nacional de Control de la Energía Costa Rica), y los valores de potencia debían ser los que ellos manejaban en el generador, lo que imposibilitaba la manipulación para beneficios de la variación en la potencia.

Gracias a la base de datos que se tiene en la planta, fue posible tomar información de horas anteriores y graficarlos, debido a que las zonas horarias de mayor potencia son las llamadas pico en el país.

Tabla 12. Datos de Eficiencia

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
46,9	95,96	16,89
44,0	95,66	15,83
91,5	97,73	32,93
72,5	97,25	26,09
24,9	92,75	8,960
59,1	96,68	21,26

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Con la información de eficiencia calculada con base en el modelo de IEEE 112-E, se grafica cada uno de los datos en función de la carga para lograr visualizar el comportamiento de la eficiencia a diferentes potencias.

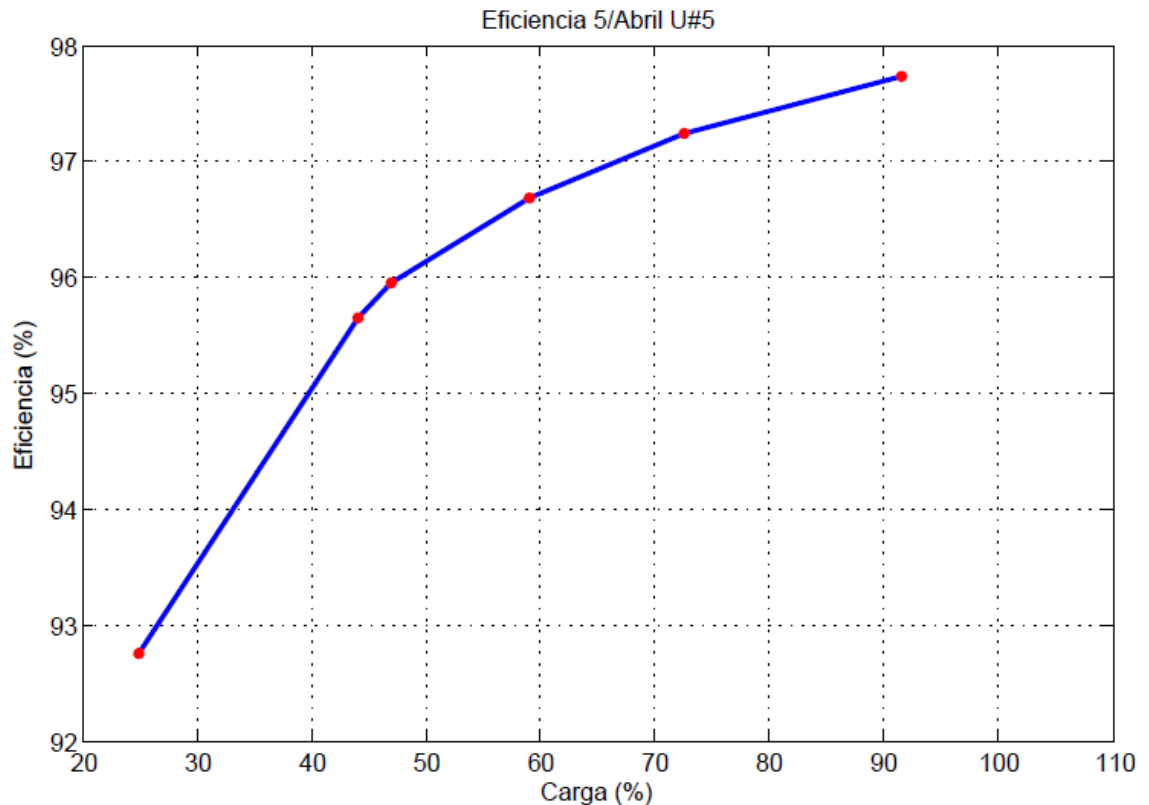


Figura 10. Grafica de Eficiencia.

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

El desarrollo de las curvas de eficiencia se enfocó en la elaboración de un conjunto de gráficas por un mes, diseñadas cada día con base en un mínimo de seis grupos de datos, estos, como se mencionó antes, tendieron a variar.

Se aprecia en la siguiente figura que la curva varía, debido a que los datos que se obtuvieron de las potencias eran muy bajos, mucho más que los anteriores. Estos ciclos de cargas presentan efectos sobre los devanados del generador que se mencionarán más adelante.

El estudio del día 31 de Marzo pertenece a un grupo particular de curvas, que se presentaron en ciertos días, cuando la toma de los datos se reducía, ya que las sequías en esa época presentaban bajos caudales, alrededor de 2.3 m³/s, los cuales imposibilitaban el uso de más de una unidad de generación a potencias elevadas.

Tabla 13. Datos de Eficiencia 31 de Marzo U5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
44,0	95,90	15.83
52,8	96,46	19.02
39,1	95,33	14.06
53,2	96,47	19.14

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Los cuatro valores representan las variaciones más grandes en todo el día de operación.

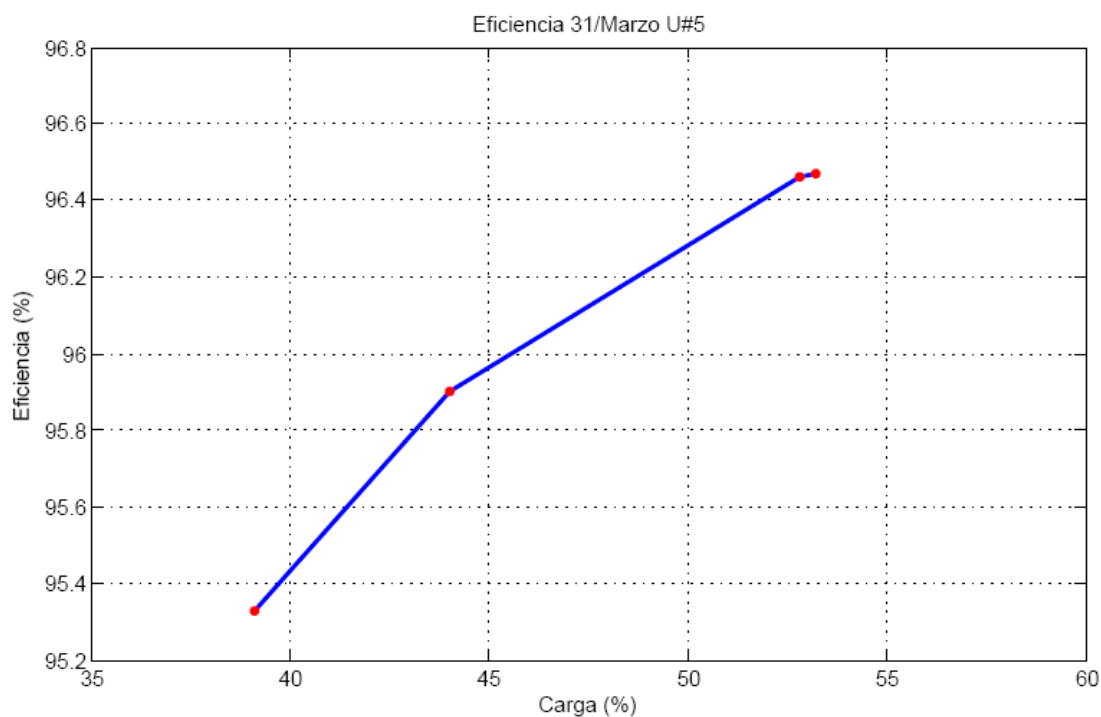


Figura 11. Curva de Baja Eficiencia

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a

5.2. Monitoreo de fallas en los Generadores de PH Río Macho.

El objetivo de realizar un estudio de eficiencia nace de la necesidad de conocer puntos importantes de operación, que faciliten el conocimiento de los generadores y el estado a través de los años, que permita prolongar la vida útil en función de la mayor operación. Para alcanzar la calidad, capacidad de generación, y disminuir las pérdidas que se presentan en toda la operación, con la finalidad de evitar que los equipos fallen.

Una adecuada coordinación entre los subsistemas de producción, estrategias de mantenimiento, adquisición de repuestos, programación de servicios y flujo de información, permiten la obtención de metas organizacionales.

Alta confiabilidad y bajo costo de producción son metas que pueden ser alcanzadas, solamente, cuando toda la corporación trabaja integrada.

5.2.1. Monitoreo de fallas en PH Río Macho.

El SCADA le permite al ICE tener un control muy versátil de los generadores, debido a que por medio de alarmas le informa cuando los parámetros de las unidades tienden a disminuir los rangos normales de operación, como corrientes y temperaturas, también en complicaciones de operación y funcionamiento, permitiendo o prohibiendo la entrada en línea de la unidad.

A continuación se expone una lista de las fallas y alarmas más importantes que se monitorean, las cuales no son las únicas debido a que existen gran cantidad de alarmas que indican variaciones en los niveles de operación definidos.

La regularidad en las alarmas es muy baja, debido al poco tiempo de operación que presentan las unidades, es por esto que se exponen las fallas más críticas que podrían suscitarse en los equipos.

Tabla 14. Señales de Alarma

Alarma	Descripción
Secuencia Negativa	Falla de puesta en Línea.
Potencia Inversa	Protecciones que presenta el generador por cambio a síncrono.
Enfriamiento	Bajo flujo de Agua en el enfriamiento del generador.
Alta Temperatura en Generador	Fallo unidad de ventiladores, fallo en el circuito de enfriamiento.
Falla a Tierra de Estator	Aumento de la corriente en el neutro del devanado que se coloca a tierra.
Bajo Voltaje	Ineficiente proceso de excitación en los devanados, creando campos magnéticos débiles.
Sobre Corriente	Fallas en los devanados.
Energización Inadvertida	Puesta en Marcha de la unidad sin indicaciones de control.
Falla a tierra de Rotor	Incremento de la tensión a tierra en otras partes del devanado y genera sobre tensiones.
Sobre Voltaje	Debido a fallas o excentricidades en el devanado de campo o estator.
Baja Impedancia	Los conductores presentan una sólida conexión entre sí.
Pérdida de excitación	Falla en el sistema de excitación, falso contacto con escobillas.
Frecuencia	Alteraciones importantes en la frecuencia de operación.
Sobre Carga	Elevación de la carga por encima de la nominal recomendada por el fabricante.

Fuente: Elaboración Propia por medio de Sala de Operación PH Río Macho, 2016.

Los operadores de PH Río Macho están en todas las facultadas de dirigir el procedimiento más adecuado para la solución de los problemas en conjunto con los técnicos eléctricos, mecánicos y civiles que trabajan en la planta.

5.2.2. Indicaciones NEMA de Fallas.

Los estándares NEMA, estipulados en la MG 1-2009, son un documento utilizado en la selección de generadores y motores. Contienen información práctica acerca de los valores de operación, seguridad, pruebas, construcción y manufactura para motores y generadores en AC y DC.

Para el estudio de la eficiencia realizada en el PH Río Macho, primero se seleccionó un día específico para verificar los puntos que estipula NEMA.

Para tal efecto se tomó el día 22 de marzo del 2016 y los cálculos fueron realizados con la Unidad de Generación #5.

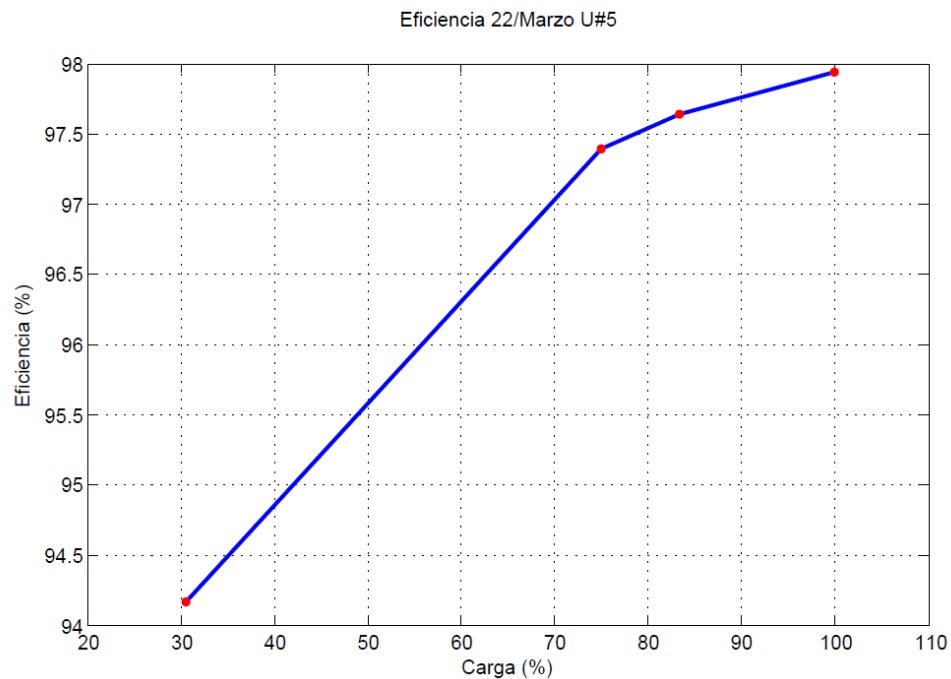


Figura 12. Curva de Eficiencia 22 de Marzo

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

NEMA establece los parámetros de eficiencia en que deben encontrarse los generadores para dar un funcionamiento eficiente, los cuales establecen que el método de análisis para el cálculo de la eficiencia debe de ir en función de la norma IEEE 112, para efectos de comparación, debido a que pequeñas variaciones no se deben de presentar en el cálculo de la norma. El valor de las pérdidas, según NEMA, nunca debe exceder el 20% del mínimo establecido.

Para el desarrollo del proyecto se observa en la siguiente tabla los valores de pérdidas por cada eficiencia calculada el día martes 22 de marzo.

Tabla 15. Valor de las Pérdidas

Potencia (MW)	Pérdidas (KW)	Eficiencia (%)
30,00	723,95	97,64
11,00	681,16	94,17
27,00	722,44	97,39
36,00	757,29	97,94

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

NEMA en su tabla 12-10 (**ver Anexo 1**), establece cuáles valores nominales de eficiencia se deben de considerar como punto mínimo. Según este estándar para las eficiencias anteriores se deben tener los siguientes valores.

Tabla 16. Valores Mínimos Según NEMA MG 1

Eficiencia Nominal (%)	Eficiencia Mínima (%)
97,64	97,1
94,17	93,0
97,39	96,8
97,94	97,4

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

El cálculo de la eficiencia mínima se basa en las pérdidas, es decir, una pérdida considerable de eficiencia en los generadores ocurre cuando las pérdidas de potencia calculadas exceden en un 20% su valor para eficiencia mínima; por consiguiente, el aumento de las pérdidas de los generadores es bajo efectos de mayores corrientes, y por ende, una elevación sustancial en la temperatura de los devanados y núcleo ocasionan un aumento en las posibles descargas parciales que se presentan en los aislamientos.

Este valor mínimo delimita una zona de operación, en la cual el generador debe variar sus datos de eficiencia a diferentes potencias, esto con el fin de garantizar una operación óptima.

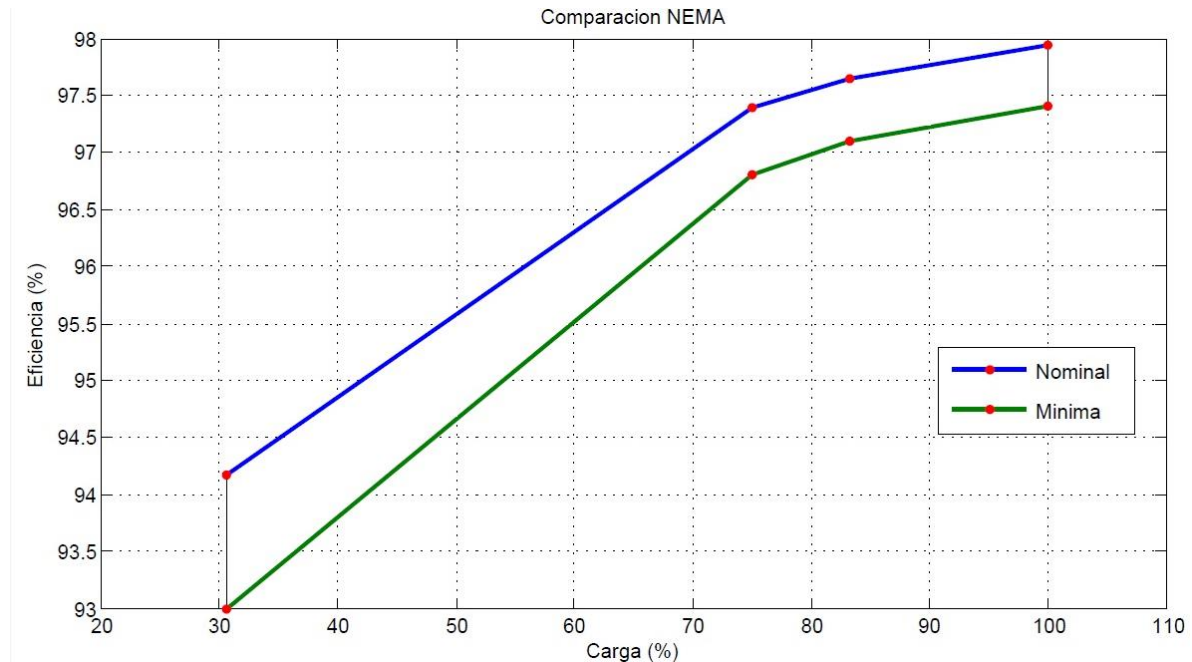


Figura 13. Zona de Operación según NEMA

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

5.3. Descargas Parciales en los Generadores

En la norma IEEE Std 43-2013TM, las descargas parciales no son un síntoma, los autores las consideran un daño directo a la resina de los aislantes, las máquinas, al igual que los generadores de PH Río Macho constan de resina de mica que ayuda a evitar un deterioro prematuro.

Según el seminario de DP facilitado por el centro de documentación de la PH Río Macho, para máquinas de 13.8 kV, que presenten descargas parciales su daño se verá en los próximos 5 años.

Como se observa en la siguiente figura los generadores de PH Río Macho presentan variaciones de potencia, afectando en mayor medida el devanado del estator y rotor.

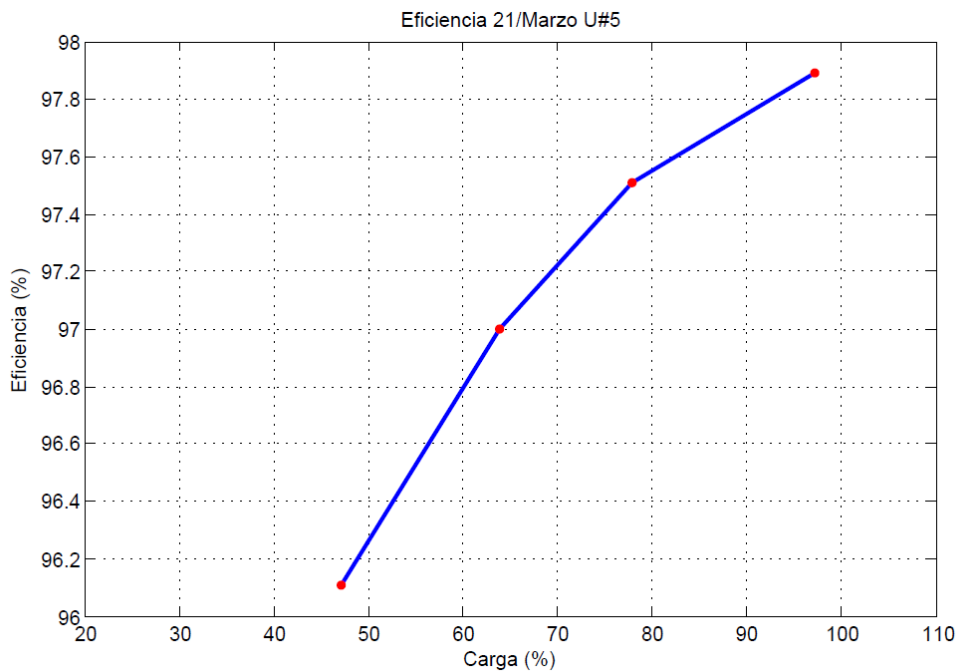


Figura 14. Eficiencia 21 de marzo de la U#5

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB[®] R2010a, 2016.

5.3.1. Efecto sobre el aislamiento

Los niveles de descargas parciales pueden ser medidos en cada momento del proceso de degradación, el cual para los generadores suele ser de una lenta evolución, y los resultados pueden ser utilizados para planificar el mantenimiento adecuado, o para decidir si es necesario llevar adelante una operación de rebobinado.

Ciclaje de Carga

El ciclaje de carga es uno de los efectos más nocivos hacia los aislantes del generador, ya que las variaciones de carga benefician la ganancia de pérdidas presentes en los devanados del estator I^2R .

En los siguientes datos aparecen las variaciones diarias promedio que manipula el CENCE, respecto de la potencia activa.

Tabla 17. Datos de Ciclaje Diario de Carga

Potencia (MW)	Eficiencia (%)	Hora
9,95	93,63	13:44
19,11	96,50	9:54
25,04	97,11	14:37
26,89	97,40	18:15
29,06	97,54	8:39

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

En el siguiente gráfico se observa uno de los comportamientos típicos del generador y cómo éste va cambiando su potencia en el transcurso del día.

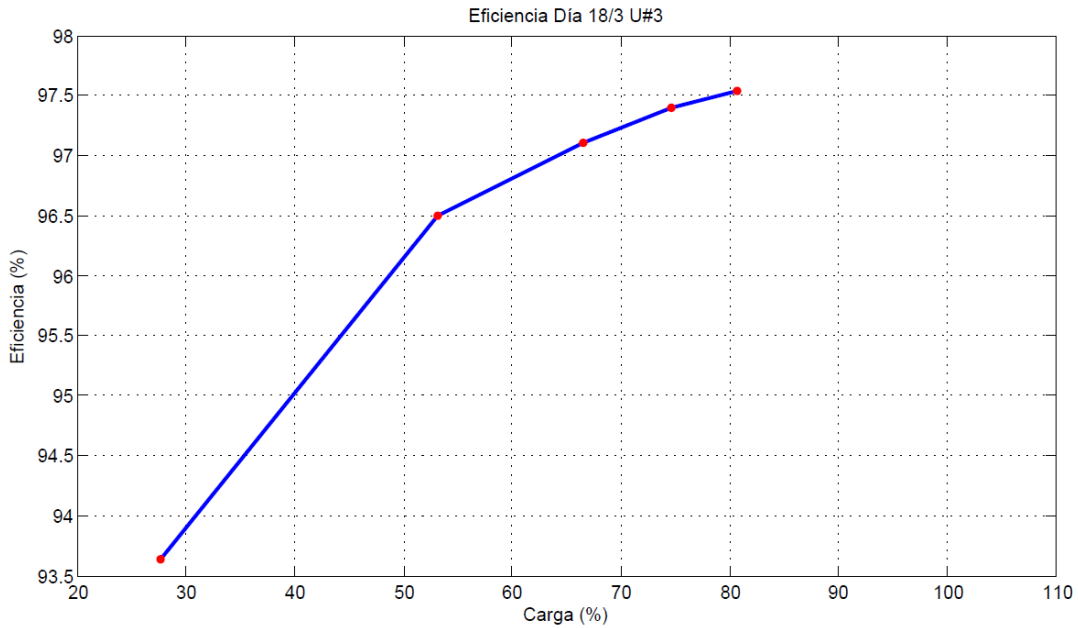


Figura 15. Gráfica de Eficiencia

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

Las variaciones de carga que se observan en la gráfica anterior ocasionan tensiones cíclicas de corta duración sobre el aislamiento, según IRIS POWER en el seminario de DP, esto se debe a los diferentes coeficientes lineales de expansión térmica en los materiales del devanado del estator.

Como el cobre se expande con el aumento de temperatura debido a las pérdidas en I^2R , cuando se presenta un coeficiente de expansión térmica más bajo y bajas temperaturas, el aislamiento que está pegado al cobre y apretado firmemente entre el conductor y el núcleo no se expande.

Este conjunto de tensiones repetitivas, que se mencionan debido al cambio en las potencias de los generadores, ocasionan una fatiga en la unión mecánica entre el aislamiento principal y el aislamiento de los subconductores, o de las espirales. Esto ocasiona que las uniones se vayan debilitando, poco a poco, hasta el punto de fractura.

5.3.2. Estudio de descargas parciales y tangentes delta

El estudio de descargas parciales y tangentes delta demuestra el estado en que se encuentra el aislamiento de los generadores, específicamente, la capacidad aisladora, recordando que el estado del generador depende en casi un 80% de la capacidad de aislamiento.

El siguiente estudio fue realizado por el Centro de Servicio Técnico de la Región Central del ICE, sobre tangentes delta y descargas parciales a la unidad de generación #1.

Los procedimientos y criterios de las pruebas se fundamentan en las normas IEEE-43-2002 y IEEE 286-2000, éstas fueron realizadas por personal del área de aislamiento de generadores del Centro de Servicio Técnico del ICE de la Región Central.

Para observar todo el reporte realizado del estado del aislamiento (**ver Anexo 3**).

A continuación se exponen los resultados más relevantes del ensayo realizado el 07 de junio del 2014, aproximadamente, un año después de su puesta en marcha.

Tabla 18. Índice de Absorción

Mediciones de Fase a Tierra						Medición Entre Fases		
Lectura	(R-S-T)	R	S	T	Rotor	R(s-T)	S(R-T)	T(R-s)
Índice	2.20	1.82	1.83	1.72	2.0	1.79	1.82	1.96
Absorción	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Fuente: Centro de Documentación de PH Río Macho, 2014.

Tabla 19. Índice de Polarización

Mediciones de Fase a Tierra						Medición Entre Fases		
Lectura	(R-S-T)	R	S	T	Rotor	R(s-T)	S(R-T)	T(R-s)
Índice Polarización	5.91	4.60	4.88	4.71	3.00	4.90	4.78	4.43
	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

Fuente: Centro de Documentación de PH Río Macho, 2014.

Los valores anteriores exponen los resultados obtenidos de las pruebas de aislamiento, las cuales se calcularon con base en el método de evaluación del tiempo.

Para realizar el índice de polarización se estudiaron los valores en megahmínios calculados en intervalos de tiempo que variaban en un minuto, empezando en 30 s, 1 minuto hasta los 10 minutos, razón de cálculo que dio como resultado el valor correspondiente de cada punto de medición.

Los Índices obtenidos denotaron el excelente estado en el que se encuentra el aislamiento, ya que los valores de absorción debían encontrarse por encima de 1,6, donde el menor valor fue de 1,72. Y para los niveles de polarización los índices adecuados debían ser del orden de 2, siendo mayor que 4, un valor excelente de medición en el estado del aislamiento.

5.4. Curva Analítica

Para realizar un análisis más confiable se procedió a implementar un estudio analítico del comportamiento de la eficiencia del generador.

Para la elaboración de la curva analítica se graficó, por medio de MATLAB® R2010a, el comportamiento ideal que debe de tener la eficiencia con base en la fórmula de cálculo, y cómo ésta se ve afectada por las variaciones de corriente y el factor de potencia en múltiples escenarios.

La siguiente gráfica se elaboró sustituyendo en el modelo analítico un intervalo que le permitió obtener 2338 conjuntos de posibilidades de operación, esto debido a que se establecieron dos parámetros de funcionamiento, el de corriente y el factor de potencia, el primero se encontraba de [400;1569], y el segundo a [0.8;1], lo que dio como resultado:

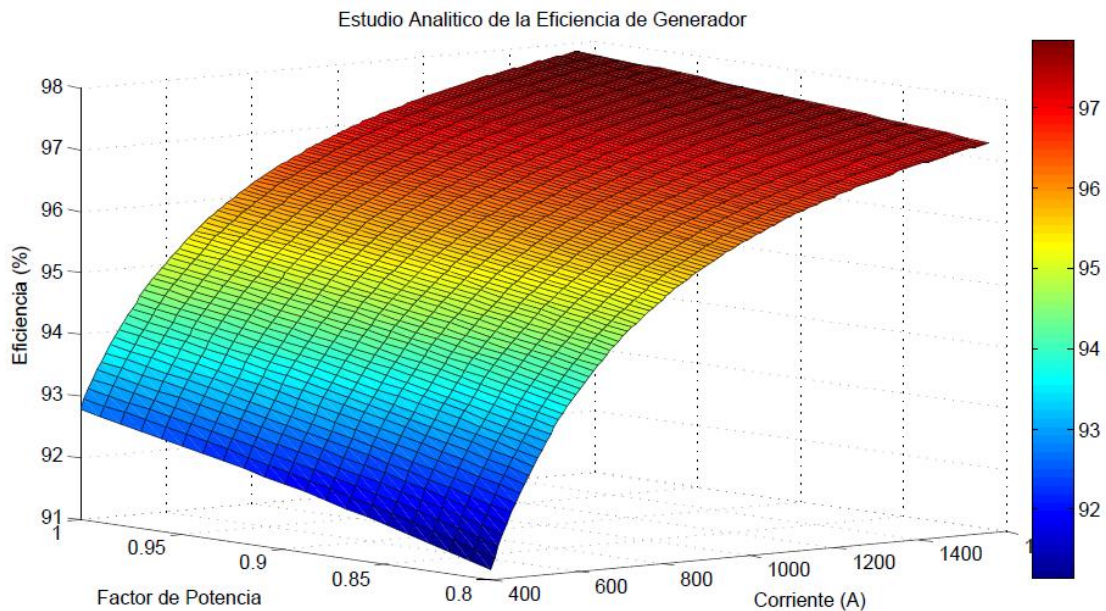


Figura 16. Estudio Analítico

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

En la gráfica se observó que los puntos más cercanos al color rojo de la barra de niveles presentan eficiencias más altas, lo cual es beneficioso para la operación del equipo; es decir, desde el punto de vista analítico la eficiencia crece conforme aumenta la corriente y su factor de potencia no fluctúa.

Esto es un estudio de comportamiento ideal de la eficiencia, por eso se realiza una comparación respecto a las gráficas obtenidas en puntos anteriores, las cuales mostraron un comportamiento diario, con el fin de observar la veracidad del cálculo de la norma y la hoja elaborada.

A continuación se expone una tabla comparativa, donde se tomó como base el día 15 de abril de 2016 de la unidad de generación #5, y se sobrepuso con factores de operación similar, pero obtenidos de la curva analítica, con el fin de corroborar los cálculos.

Tabla 20. Comparación de Estudios

Carga (%)	Corriente (A)	FP	Eficiencia (%)		Diferencia (%)
			Analítico	Técnico	
41,1	770	0,82	95,23	95,54	0,31
42,7	840	0,8	95,48	95,67	0,19
54,1	1001	0,88	96,5	96,5	0
55,1	1010	0,9	96,54	96,56	0,02
69,2	1080	1	97,08	97,22	0,14
75	1290	0,92	97,28	97,37	0,09

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Los datos anteriores demuestran que la diferencia en porcentajes de eficiencia en el cálculo analítico y teórico, no superan el 0,31 %, es decir, los datos varían en el orden de 10^{-3} de su valor calculado.

Otra forma de visualizar los datos anteriores es por medio de una gráfica de trasposición de ambas, en una vista en 2D, que permite confirmar lo anterior.

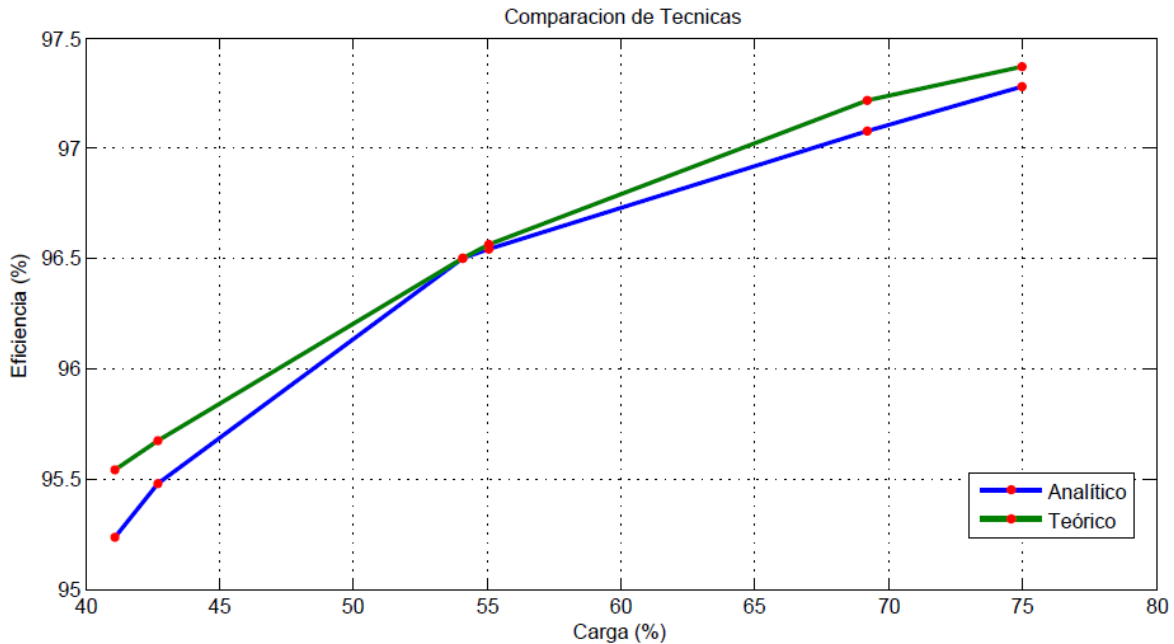


Figura 17. Gráfica Comparativa de Técnicas

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

La gráfica anterior muestra la comparación y una visión más clara del cálculo de la eficiencia.

Los estudios más teóricos o de base en observación tienden a generar una dispersión de valores que pueden afectar el cálculo y ganar un porcentaje de error importante, pero son más rápidos y tangibles; sin embargo, un estudio analítico proporciona valores más exactos y precisos a la hora de cálculo, estos tienen un porcentaje de error mucho más pequeño debido a que evalúan todas las posibilidades y las comparan una con la otra.

El escoger entre cada uno de los estudios depende de la aplicación, pero para el caso de la eficiencia del generador ambos proporcionan información valiosa; sin embargo, el estudio teórico genera un volumen de datos más oportuno para un departamento de mantenimiento, debido a que expone el estado real del activo y ayuda a generar una base de conocimiento y comparación con la operación en los años siguientes.

5.5. Comparación Mensual

El desarrollo del proyecto se efectuó por un tiempo establecido de un mes, específicamente, del 14 de marzo del 2016 al 15 de abril del 2016, en este periodo se generaron un total de 31 gráficas de eficiencia, respecto de los porcentajes de carga a los cuales trabajaba el generador.

Se realizó un estudio comparativo para observar las diferencias de operación de las unidades, debido a que para las fechas de cálculo el porcentaje de lluvias era muy bajo, lo que ocasiona disminución en los caudales, afectando la cantidad de unidades en generación, por esta razón el estudio mensual realizado debió reducirse, la mayoría de las ocasiones, a una unidad solamente.

Para esto se eligió el mes de mayores caudales y porcentajes de lluvias como lo es diciembre. Con la ayuda del centro de documentación de Río Macho y el CENCE, se extrajo la información de este mes y se contrapuso con la de marzo.

A continuación se exponen las gráficas proporcionadas por el CENCE para los kWh del día 21 de ambos meses, la selección de este día se fundamenta en ser la fecha del pico más alto de potencia en el mes de diciembre.

Para el mes de diciembre.



Figura 18. Gráfica de Potencia del 21 de Diciembre

Fuente: (CENCE, 2016)

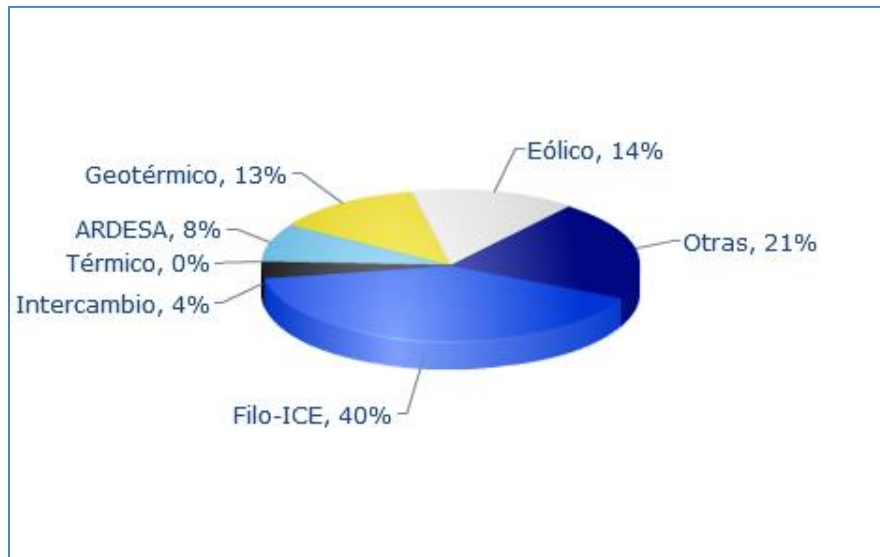


Figura 19. Gráfico Pastel de Producción Eléctrica 21 Diciembre

Fuente: (CENCE, 2016)

Ambas gráficas se pueden obtener de la misma forma para el día 21 de Marzo del 2016.



Figura 20. Gráfica de Potencia de 21 de Marzo

Fuente: (CENCE, 2016)

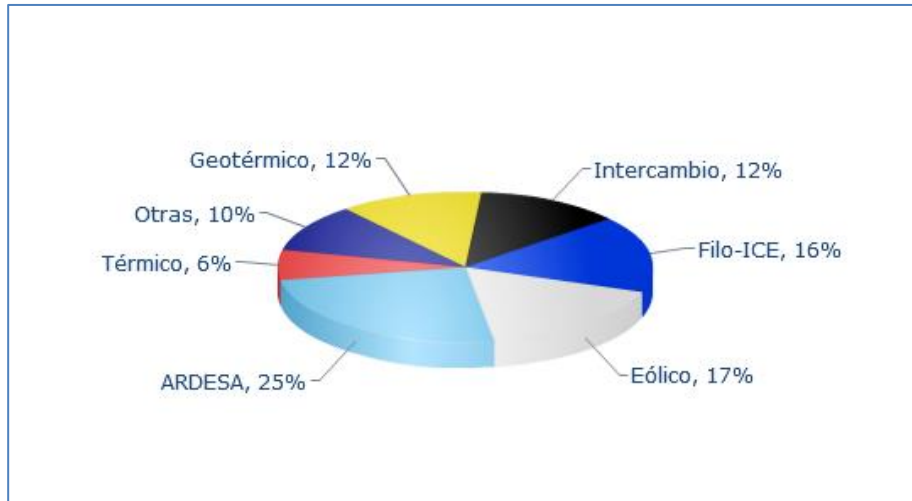


Figura 21. Gráfico Pastel de Producción Eléctrica del 21 de Marzo

Fuente: (CENCE, 2016)

La información anterior y los gráficos fueron obtenidos gracias a la página del CENCE, la cual proporcionó una base teórica que permitió corroborar la información, donde se observó que para diferentes meses las producciones hídricas son muy diferentes cuantitativamente, en función de la cantidad de agua que se puede presentar en una época específica del año.

Las variaciones de caudales van en función de la precipitación diaria, es por esto que la eficiencia depende de la época, ya que para periodos de sequía, la operación de las unidades es alternada, y tiende a funcionar a grandes potencias solamente en horas pico, situación que varía en la época húmeda, cuando los caudales son mayores, y por ende, opera más de una unidad generadora, dando como resultado mayores potencias otorgadas por la PH Río Macho.

En la siguiente tabla se muestran las variaciones de un día que son muy grandes para épocas diferentes del año, lo que ocasiona que las plantas del tipo filo se adapten a las precipitaciones mensuales.

Tabla 21. Comparación de Potencia Diaria

Comparación Mensual de MWh			
Hora	21-dic-15	21-mar-16	Diferencia
00:00	21,21	0,00	21,21
01:00	21,21	0,00	21,21
02:00	17,95	0,00	17,95
03:00	26,90	8,00	18,90
04:00	28,26	16,00	12,26
05:00	45,99	26,06	19,93
06:00	53,66	39,70	13,96
07:00	40,88	16,00	24,88
08:00	42,41	16,00	26,41
09:00	55,41	16,00	39,41
10:00	42,41	16,00	26,41
11:00	42,41	20,15	22,26
12:00	55,41	42,47	12,94
13:00	55,41	68,47	-13,06
14:00	55,40	38,88	16,52
15:00	55,41	21,23	34,18
16:00	50,10	21,23	28,87
17:00	55,41	21,23	34,18
18:00	55,41	16,67	38,74
19:00	55,41	14,08	41,33
20:00	55,41	15,65	39,76
21:00	55,41	0,00	55,41
22:00	55,41	0,00	55,41
23:00	55,41	0,00	55,41
MWh	1.098,30	433,82	664,48

Fuente: (CENCE, 2016)

De la tabla anterior se observa que la diferencia de potencia diaria es de casi 665 MWh, es decir, que en un día promedio para la época lluviosa se produce más del doble de potencia diaria que para el verano.

El efecto que resulta de estas variaciones de potencia se observó en análisis anteriores, concluyendo que a mayor potencia el generador tiende a ser más eficiente, lo que le otorga una vida más útil.

De la misma manera se pueden exponer los valores de eficiencia de ambos días, los cuales denotan puntos de operación de las unidades y potencias más eficientes.

Tabla 22. Datos del 21 de Marzo Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)	Hora
77,8	97,51	28,00	7:20
47,2	96,11	17,00	8:46
97,20	97,89	35,00	12:35
63,9	97,00	23,00	15:40

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Los datos tomados representan un ciclaje de carga característico de la época de verano es por esto que se dan eficiencias relativamente diferentes.

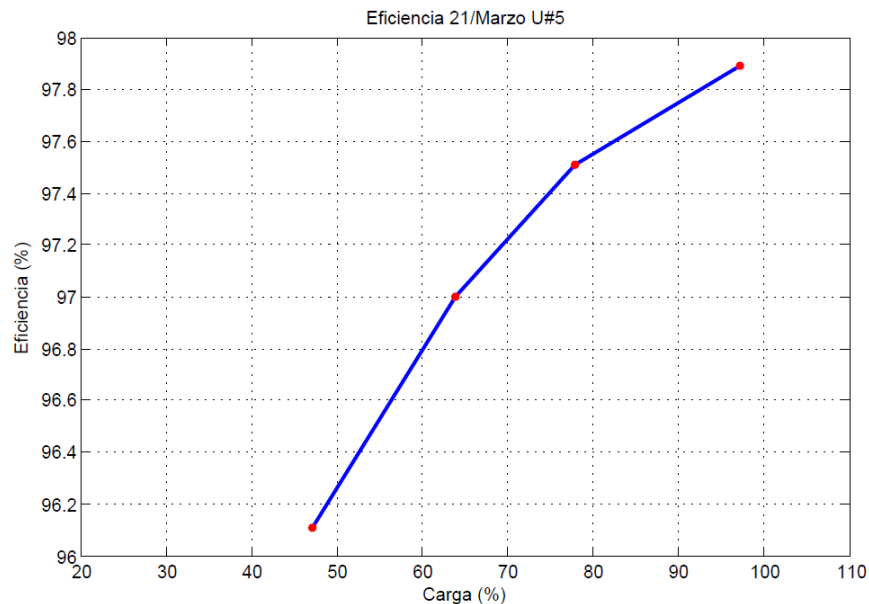


Figura 22. Eficiencia día de Verano

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

En contra parte las potencias entregadas para los días de diciembre tienden a ser más constantes en valores de los 30 MW, esto beneficia al generador, ya que se ven menos afectadas sus características mecánicas y térmicas.

Tabla 23. Datos de Potencias del 21 de Diciembre del 2015

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)	Hora
64,1	97,23	25,00	18:34
74,4	97,55	29,00	16:29
87,2	97,83	34,00	22:07
94,9	97,95	37,00	15:34

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

De igual manera se grafica la eficiencia para observar las variaciones, debido a que la unidad trabaja a potencias mayores por ciclos más largos de tiempo.

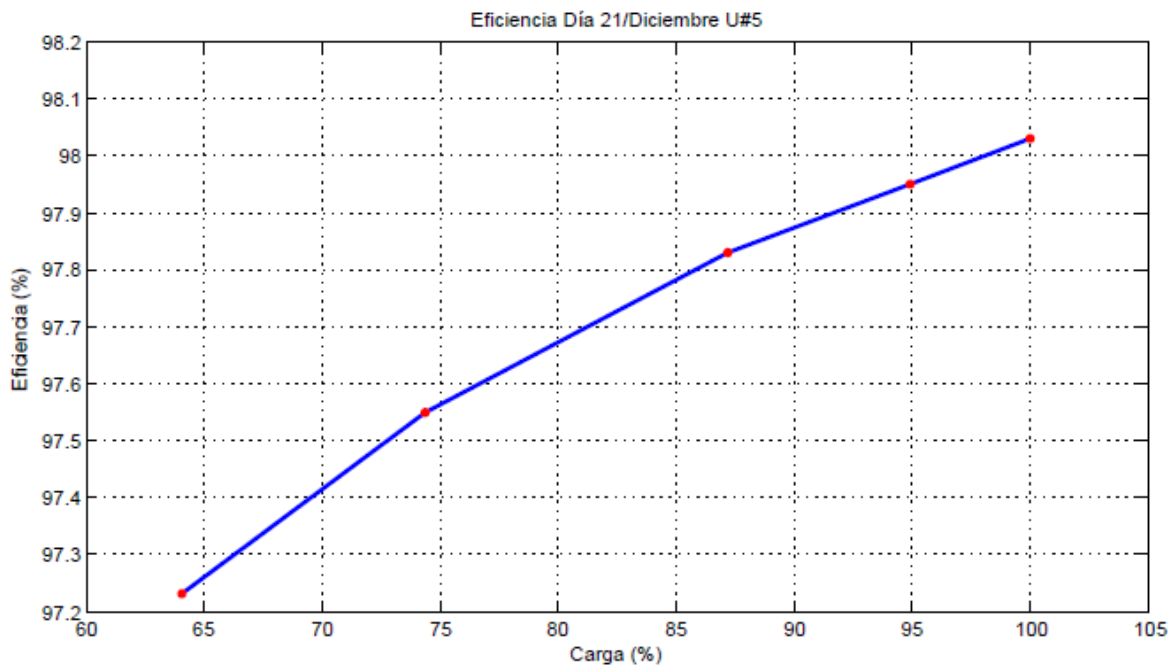


Figura 23. Grafica de Eficiencias del 21 de Diciembre del 2015

Fuente: Elaboración propia por medio de MATLAB® R2010a, 2016.

5.6. Estudio de Generador-Trasformador

La intención de analizar la eficiencia en conjunto del generador y transformador, surge para realizar una visión más integral del sistema, ya que al visualizar la transformación de energía mecánica en eléctrica y como ésta es introducida en la red, beneficia a la visión de la generación y el departamento de mantenimiento para tener un conjunto mayor de herramientas para la toma de decisiones.

5.6.1. Eficiencia Transformador

La planta de Río Macho posee un grupo de transformadores, los cuales convierten la tensión otorgada, es decir, por cada unidad de 36 MW se posee un transformador y para las unidades de 18 MW se posee solamente uno para ambas.

Tabla 24. Datos de Transformadores de Río Macho

Unidad	Código Transformador
1 y2	24-09
3	04-14
4	06-14
5	05-14
Transformador Extra	1-82

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Por medio de la información suministrada en el Laboratorio de Investigación y Mantenimiento de Alta Tensión (LIMAT), se obtuvo el valor de la eficiencia promedio que poseen los transformadores.

$$\text{Eficiencia Promedio} = 99,6\%$$

5.6.2. Eficiencia Grupo Generador-Trasformador.

El grupo se refiere a la eficiencia que presenta el generador como también el transformador.

El punto anterior mencionó que la eficiencia promedio para los transformadores se estima en 99,6%,

Tabla 25. Eficiencias de Grupo Generador-Trasformador

Unidad	Eficiencia
Generador	97,85%
Trasformador	99,6 %

Fuente: Elaboración propia por medio de LIMAT y Centro de Documentación Río Macho, 2016.

De todo lo anterior se desprende que a mayores factores de potencia se obtienen eficiencias más altas, afectando menos al generador, muchas variantes dependen del análisis de un grupo generador, debido a que son máquinas diferentes y no dependen en funcionamiento para dar la mejor eficiencia, sino que ambas se estudian por aparte.

Se debe recordar que el PH Río Macho es una planta de generación del tipo Filo, es decir, son plantas que regulan la potencia nacional, es por esto que las variaciones de eficiencia en conjunto con el generador no son valores constantes, y esta situación no puede variar, de ahí que para efectos de las mejores eficiencias de operación, siempre se debe buscar llevar el generador a potencia nominal.

5.7. Curvas de Capabilidad

La curva de capacidad o capacidad, delimita los regímenes en los cuales se debe trabajar con el generador para mantenerlo bajo condiciones seguras, y le permitan dar su rendimiento de la mejor manera, por el mayor tiempo posible, situación que depende del ingeniero a cargo.

Es por esto que se realizó un pequeño estudio, con base en los parámetros de la curva propia de los generadores 3,4 y 5 de la PH Río Macho.

La elaboración de las curvas, los datos tomados para ésta y gráficas fueron realizados por los ingenieros de Andritz Hydro y proporcionados por el centro de documentación de la Planta de Río de Macho.

A continuación se observa el dato de placa utilizados para la elaboración de las curvas.

Tabla 26. Datos de Placa para Curva de Capabilidad

Centro de Producción RÍO MACHO		
Generador 3 fases, 60Hz, rotor bobinado MITSUBISHI ELECTRIC CO.		
Dato de Placa	Valor	Unidad
Snom	37,400	MVA
Snom _{max}	43,125	MVA
Pot. Turbina	35,300	MW
FP	0,8	
Vnom	13800	V
Inom	1565	A
Angulo máx. carga	65,69	°
Valores medidos		
xd	1,060	
xq	0,680	

Fuente: Centro de Documentación Río Macho, 2016.

Como se mencionó anteriormente las curvas trabajan bajo límites, que se establecen para garantizar el funcionamiento de manera estable, los cuales se mencionan a continuación:

- Límite Corriente de Armadura.
- Límite de potencia mecánica de la máquina prima.
- Límite de máxima corriente de excitación.
- Límite de estabilidad permanente teórico (Angulo de torque máximo).
- Límite de mínima corriente de excitación.

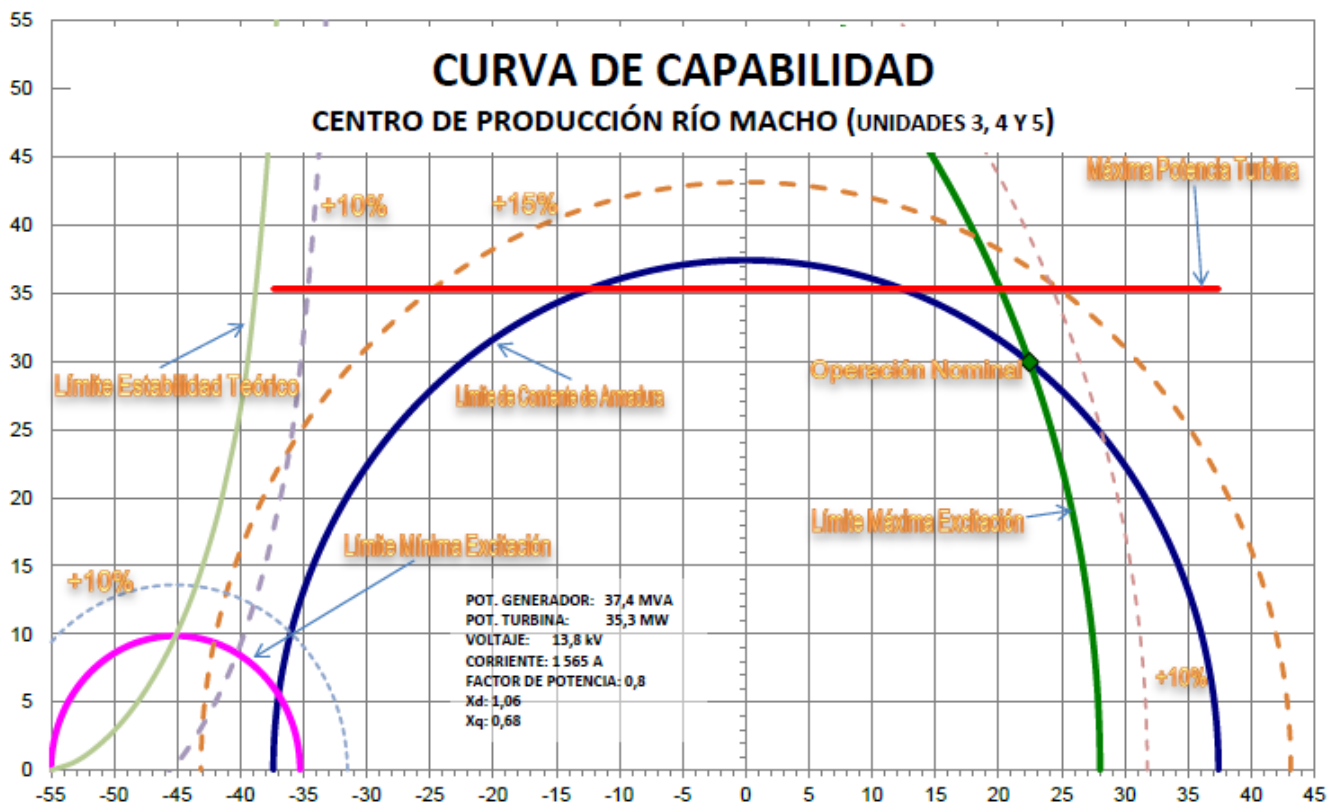


Figura 24. Curva de Capacidad Río Macho

Fuente: Centró de Documentación Río Macho, 2015.

5.7.1. Límite Corriente de Armadura

Es una característica que se encuentra muy ligada a los valores de la eficiencia, debido a que este límite define la corriente máxima que puede trasegar por la armadura, es impuesta por el calentamiento del estator, por lo cual influye en la vida del aislamiento. Gráficamente es la semicircunferencia de color azul en la figura anterior, donde delimita los regímenes de operación estable.

5.7.2. Límite de potencia mecánica de la máquina prima

Esta característica indica la potencia máxima que puede entregar la máquina motriz, para el caso del PH Río Macho sería la turbina Pelton, la cual se indica como la línea horizontal al eje x en el valor de máxima potencia de la turbina.

5.7.3. Límite de máxima corriente de excitación

El límite de corriente de excitación máxima está definido en parte por el calentamiento que pueda presentar el rotor, el cual es un valor que induce una FEM máxima que genera un límite de potencia aparente entregado por el generador.

5.7.4. Límite de estabilidad permanente teórico y práctica (Ángulo de torque máximo)

El ángulo de torque define la potencia máxima que puede suministrar el generador, la potencia máxima determina el límite de estabilidad estática. Normalmente, los generadores no se acercan a este límite, siendo los ángulos típicos de torque entre 15° y 20° a plena carga.

No es aconsejable operar el generador, justo en este límite teórico, debido a las perturbaciones del sistema que puedan ocurrir, en tal sentido se recomienda definir un límite práctico de seguridad como límite de estabilidad permanente. Este se obtiene trasladando la curva para una menor potencia de 10% a 20% de la capacidad nominal de la máquina.

5.7.5. Límite de mínima corriente de excitación

El límite representa los flujos residuales que resultan de la excitatriz, la cual siempre presenta una FEM inducida que contrarresta estos pequeños valores, teóricamente, los autores mencionan que existen estimaciones de entre 5 a 19 % de la excitación con carga nominal.

5.7.6. Factores importantes de las Curvas de Capacidad

La curva que se obtiene una vez definidos los límites se llama curva de operación, la cual establece las regiones en donde se garantiza una operación estable.

Las diferentes variaciones de MegaWatts y MegaVARs están definidas por la curva, que depende de los diferentes factores de potencia como también de los ángulos de torque a los cuales se trabaja. Los VARs positivos son suministrados por el generador y es la zona de sobreexcitación, donde el generador funciona con factor de potencia inductivo; y los VARs negativos son alimentados dentro del generador desde el sistema de energía y es la zona de subexcitación, donde el generador trabaja con factor de potencia capacitivo.

Diferentes autores mencionan que por cada 10° que se excede la temperatura nominal del devanado se reduce la vida útil del generador a la mitad.

5.8. Generador en Condensador.

Las centrales eléctricas como PH Río Macho exportan potencia activa, pero también exportan potencia reactiva, para tal efecto el CENCE es el encargado de indicar el número de unidades que deben de estar en operación y el centro nacional es el encargado de manipular el valor de la potencia entregada.

Para efectos de compensar los reactivos en la red en ciertos momentos del día, el CENCE solicita poner una de las unidades en condensador esto con el fin de reducir la carga de reactivos en la red y balancearla.

Se debe recordar que al colocar el generador en condensador el mismo adelantará la corriente por delante de la tensión, y así consumirá los reactivos en la red.

Como la tensión en la planta de generación se debe de mantener constante, para variar la potencia se debe de manipular la corriente de excitación del generador para colocarlo en modo condensador o en una bobina, es decir, en capacitivo o inductivo.

Para tal efecto se elevan altas corrientes de excitación, lo que permite una gran cantidad de potencia reactiva capacitiva, con la que se compensa la potencia reactiva inductiva que se encuentra en la red. Al ser la potencia reactiva dependiente de la tensión de excitación del generador.

5.8.1. Fallas por Sobre excitación

Las posibles fallas que pudieran ocasionar sobre la unidad dependen de la estabilidad que ésta pueda mantener de manera óptima.

Las fallas por sobreexcitación son causantes de situaciones como la saturación del núcleo magnético del generador.

Como lo menciona José Manuel Cuevas R, la sobreexcitación se debe a que se exceden los valores de la relación Voltz/Hertz. Dicha falla al presentarse en las terminales del generador provoca un flujo de dispersión que afecta a los componentes del generador que no están diseñados para el caso.

Existen relaciones de valores para los generadores, con el fin de garantizar una operación eficiente, la cual anda en valores según ANSI/IEEE de 1.05 p.u en base del generador.

Los aislamientos se ven afectados de igual forma al sobreexcitar la unidad, debido a que pueden presentar tensiones interlaminales, las cuales pueden degradar aún más los aislamientos.

La toma de datos siguiente representa los valores para los cuales el SCADA monitorea las condiciones del generador.

Tabla 27. Datos de Generador en Condensador

Generador como Compensador Síncrono		
Dato	Valor	Unidad
Potencia Activa	-1.30	W
P. Reactiva	-2.72	VAR
Corriente	110	A
Temp. Estator	41.96	°C
Temp Rotor	46.04	°C

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Los valores se encuentran en parámetros normales de operación, lo cual indica que se presenta un desgaste normal y presencia de temperaturas adecuadas, las eficiencias no son posibles de obtener debido al tipo de dato no coincidente con la norma, pero las pérdidas por temperatura y corrientes son las siguientes:

Tabla 28. Pérdidas Condensador

Generador como Compensador Síncrono		
Dato	Valor	Unidad
I ² R(Rotor)	158,185578	W
I ² R(Estator)	269697,851	W
Dispersión de Carga	4857	W
F&W	158000	W
Core	169000	W

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Las pérdidas anteriores son en función de los datos de corriente y temperaturas obtenidas, esto debido a que las unidades aunque no presenten una potencia activa si ocasionan un deterioro.

La sobre excitación que se produce para llevar el generador a modo condensador perjudica al generador en valores cuantificables en casi 602 kW en total.

Capítulo 6. Estudio Económico

Introducción

El siguiente capítulo expone el estudio de las variaciones económicas que presentan los valores del cálculo de eficiencia en función de las pérdidas y potencias generadas en la unidad #3, este análisis buscó la relación de caudal volumétrico que pueda verse afectado en la generación.

6.1. Estimaciones Económicas de la Eficiencia del Generador

El estudio de la energía renovable puede significar un costo muy diferente a otro tipo de plantas generadoras en el país, la producción hidroeléctrica como se sabe depende de los caudales que posean los ríos que se utilizan para alimentar el embalse principal.

Como se ha mencionado anteriormente la modernización de la planta de Río Macho además de presentar unidades nuevas, tuvo un proceso de mejora global que involucró desde tomas, ventanas, estructura civil y alumbrado que no se contempla dentro de este documento, pero que es importante mencionar.

La modernización de la Planta obedece a planes creados por el ICE años atrás, muchos costos pueden ser considerados, los cuales afectan un proyecto de este tipo.

Sin embargo, aquí se calculó los valores para la unidad #3 y cómo beneficia al proyecto y a la planta.

El costo de los equipos electromecánicos asciende a valores muy elevados en millones de colones por lo que es de suma importancia saber económicamente su consumo.

El siguiente cuadro expone los costos económicos de generación en colones, para tal efecto se tomó el 7 de abril del 2016, se observó la variación de carga, la cual beneficia el estudio.

Tabla 29. Costos de Generación Diaria

POTENCIA				Eficiencia
Horas de Operación	MW	kWh	Colones	%
3,5	19,48	68185,39	¢3.849.747,25	96,40
3	15,56	46698,13	¢2.636.576,33	95,59
4	19,67	78696,97	¢4.443.230,84	96,52
2	9,65	19316,82	¢1.090.627,57	92,98
1	27,44	27449,80	¢1.549.815,93	97,38
2	21,49	42986,33	¢2.427.008,27	96,73

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

La potencia total no se convierte en energía eléctrica al 100%, debido a las pérdidas estudiadas anteriormente, las cuales competen un costo económico importante.

Tabla 30. Costo de Pérdidas

Perdidas en Potencia				Eficiencia
Horas de Operación	kW	kWh	Colones	%
3,5	701,54	2455,39	¢138.631,45	96,40
3	686,04	2058,13	¢116.201,93	95,59
4	684,24	2736,97	¢154.529,24	96,52
2	678,40	1356,82	¢76.605,97	92,98
1	719,80	719,80	¢40.640,13	97,38
2	703,16	1406,33	¢79.401,47	96,73

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

En síntesis el cuadro anterior expone el costo económico que se pierde solamente en los devanados del generador y que no termina siendo útil para los usuarios.

Un estudio con base en las eficiencias radica en la comparación económica del porcentaje de utilización, es decir, las tablas anteriores demostraron que a mayor potencia mayor es el costo, pero la relación de transformación de energía es mayor, es decir, las pérdidas son menores.

A mayores eficiencias se da mayor inversión económica, pero se genera mayor energía de salida respecto a la de entrada, debido a que la unidad de generación contiene pérdidas muy similares a potencias variantes esto porque la eficiencia crece y la relación de entrada/salida de generación es más completa.

Tabla 31. Costo de Generación

Eficiencia	Perdidas	Potencia	Δ Gasto Económico
%	Colones	Colones	Colones
96,40	¢138.631,45	¢3.849.747,25	¢3.711.115,80
95,59	¢116.201,93	¢2.636.576,33	¢2.520.374,40
96,52	¢154.529,24	¢4.443.230,84	¢4.288.701,60
92,98	¢76.605,97	¢1.090.627,57	¢1.014.021,60
97,38	¢40.640,13	¢1.549.815,93	¢1.509.175,80
96,73	¢79.401,47	¢2.427.008,27	¢2.347.606,80

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Otro de los puntos importantes a mencionar es el volumen de agua que se pierde por los diferentes valores de eficiencia en las unidades.

Tabla 32. Volumen en función de la potencia

Potencia	Perdidas	Volumen de Generación	Volumen de Perdidas
MW	kW	m ³ /s	m ³ /s
19,48	399,0	16832,05	606,13
15,56	407,0	13449,06	592,74
19,67	479,0	13457,18	850,38
96,58	399,0	8344,86	586,14
27,44	399,0	23716,63	621,90
21,49	399,0	18570,09	607,53

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Para los cálculos anteriores se utilizaron los siguientes valores de conversión facilitados por el P.H Río Macho.

Tabla 33. Datos de uso Económico

Dato	Valor	Unidad
Volumen de agua que utiliza por segundo un generador para producir un MW	0.24	m ³ /s
Valor del Kwh en Colones	56.46	¢/kWh
Factor de conversión de la generación a volumen de agua	0.864	m ³ /MW

Fuente: Elaboración Propia, 2016.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

- Se analizaron las curvas de eficiencia con base en las gráficas y resultados del cálculo matemático y demostraron que a mayor potencia el generador gana más eficiencia, extendiendo el ciclo de vida del activo.
- Se revisó toda la información bibliográfica, es decir, normas y documentos científicos que ayudaron a dar solidez a la investigación y a desarrollar los objetivos.
- Se analizó la eficiencia del grupo generador- transformador por medio de LIMAT y PH Río Macho, para observar que las eficiencias óptimas en operación nominal son de 97,94% y 99,6% respectivamente.
- El estudio comparativo de las normas IEEE e IEC, demostró que ambas difieren en un 2%, aproximadamente, mayor para la norma Europea, debido a la aproximación en el cálculo de las pérdidas sin corregir la impedancia por cambios en la temperatura.
- La eficiencia en operación para la época seca y a potencia nominal es de 97,94%.
- La variación en las pérdidas para el cálculo de la eficiencia no puede ser mayor al 20% del valor mínimo establecido.
- El ciclaje de carga afecta el aislamiento, disminuyendo las capacidades del material por las constantes descargas por diferenciales térmicos.
- La curva analítica demostró una variación porcentual de 0,2% en promedio para cada valor, dándole solidez a los resultados del análisis teórico.
- El mes de diciembre demostró que para épocas lluviosas, se presentan mayores unidades en funcionamiento, lo que presenta una mejor eficiencia, debido a que los caudales son más elevados respecto del mes de marzo que es una época seca.
- El estudio de la norma IEEE vs IEC demostró que la información que brinda el sistema SCADA es de mayor utilidad y exactitud en complemento con la IEEE por el cálculo de las pérdidas por temperatura.

- Se beneficia el estudio del generador, utilizando la norma IEEE debido a las correcciones por temperatura que realiza para las impedancias, dando mayor exactitud.
- La operación de una mayor cantidad de unidades beneficia la producción, y esto ayuda a reducir el ciclaje de carga en cada una de las unidades.

7.2. Recomendaciones

- Recurrir a una hoja de cálculo para estandarizar el método de obtención de las eficiencias y no perder valores en las variaciones.
- Utilizar el programa de modelado de MATLAB[®] R2010a para garantizar una solidez en los gráficos.
- Ubicar los valores de eficiencia entre 91,02 a 97,94, dependiendo de la potencia a la que se encuentra.
- Regular las variaciones de la eficiencia, según los estándares NEMA, que establece en el MG1-2009 en su tabla 12-10, para valores mínimos de eficiencia.
- Definir la zona de operación comprendida entre la curva de operación nominal y mínima de la eficiencia obtenida para un día, para el funcionamiento óptimo y confiable de las unidades.
- Comparar valores de eficiencia teóricos con los analíticos, para garantizar la confiabilidad de los datos.
- Estudiar la curva de capacidad de las unidades le permite al operador de la planta monitorear el estado de operación de las unidades generadoras.
- Continuar monitoreando los equipos, ya que se comprobó su eficiencia, con la finalidad de garantizar la mejor producción ante una eventualidad.

Bibliografía

- A. L. Diniz, M. I. (2007). *A Mathematical Model for the Efficiency Curves of Hydroelectric units*. IEEE.
- A. Hanita, M. (1984). *TECHNICAL OVERVIEW THROUGH DEVELOPMENT OF THE LARGEST SCALE TURBINE-GENERATOR MODEL WITH FULL WATER COOLING*. Yokohama: IEEE.
- ABB. (2013). Nueva Norma IEC define niveles de Eficiencia en Motores de CA de baja tensión. ABB.
- Cabo, L. A. (s.f.). *Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de v.*
- Carvajal, F. (2014). *Eficiencia energética de motores y generadores eléctricos*. MEXICO.
- CENCE. (2016). Obtenido de Operación sistema Eléctrico Nacional:
<http://appcenter.grupoice.com/CenceWeb/CencePredespachoTecnicoNacional.jsf?init=true>
- EMSA. (2011). Guide for the use of electric motor testing methods based on IEC 60034-2-1. *Electric Motor Systems*.
- ICE. (mayo de 2011). *Postulación al Premio Nacional a la Calidad en la Gestión Pública*. Recuperado el febrero de 2016, de
<https://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/b97cf6fc-cab4-423e-ba45-c3facc46822c/ICE.pdf?guest=true>
- ICE. (21 de Enero de 2016). *Historia del ICE*. Recuperado el 2 de Marzo de 2016, de
http://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/AcercadelGrupoICE/Qui%C3%A9nes%20somos/Historia%20del%20ICE!/ut/p/z1/pVJbb9owGP0r7CF5AzsXSJgUTRaXMApToU2BvKDEMU4oiYNTyPrvZ8MeNmINN82S9Sxf3eccEIMtiKvkWtBEFqxKTup_Fw_23spH1iyEi9CbJSBaPg-Q5U1syxqATVvCct4H8a9hf_nkQGQNF-G
- IEEE. (2000). *IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery*. IEEE.
- IEEE. (2004). *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE.
- Leon, C. P. (2012). *Sistemas para el cálculo de parámetros eléctricos y eficiencia energética para generadores hidroeléctricos de gran capacidad*. Mexico: Tendencia tecnológica .
- Leonardo Paucar, Z. Ñ. (2011). *EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO BASADO EN LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA CURVA DE CAPABILIDAD*. Lima: guslop.
- Marroquin, M. M. (2003). *GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE OPERACIÓN*. Guatemala.

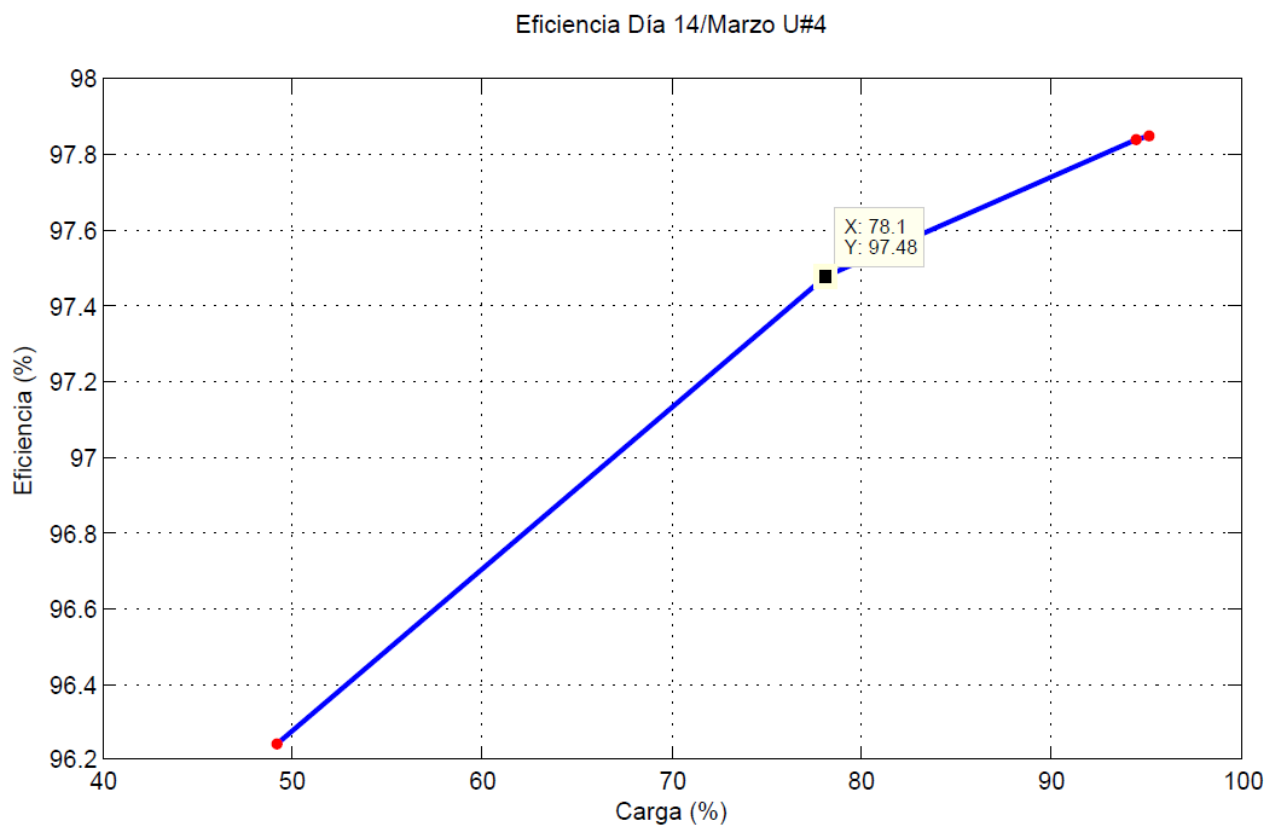
- Martinez, M. (2003). *Guia para la determinacion de limites de operacion, curva de capacidad, pruebas y mantenimeinto predictivo de generadores sincronos* . Universidad de San Carlos de Guatemala .
- Miao Peiqing, L. X. (2012). *Multi-source Separation Method for Partial Discharge Detection in Substations*. IEEE.
- Ocampo, J., & Carvajal, F. (2009). *GESTIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE*. Santiago de Cali.
- Power, I. (2014). *Seminario de Descargas Parciales*. Toronto, Canada: Iris Power.
- Tin Bariša, D. S. (2015). *Comparison of Maximum Torque per Ampere and Loss Minimization Control for the Interior Permanent Magnet Synchronous Generator*. Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing.
- Van-Roy, P. (2011). *Efficiency Measurement of Induction Motors*.

APÉNDICE

Apéndice 1. Modelas Diarios de Eficiencia por un mes.

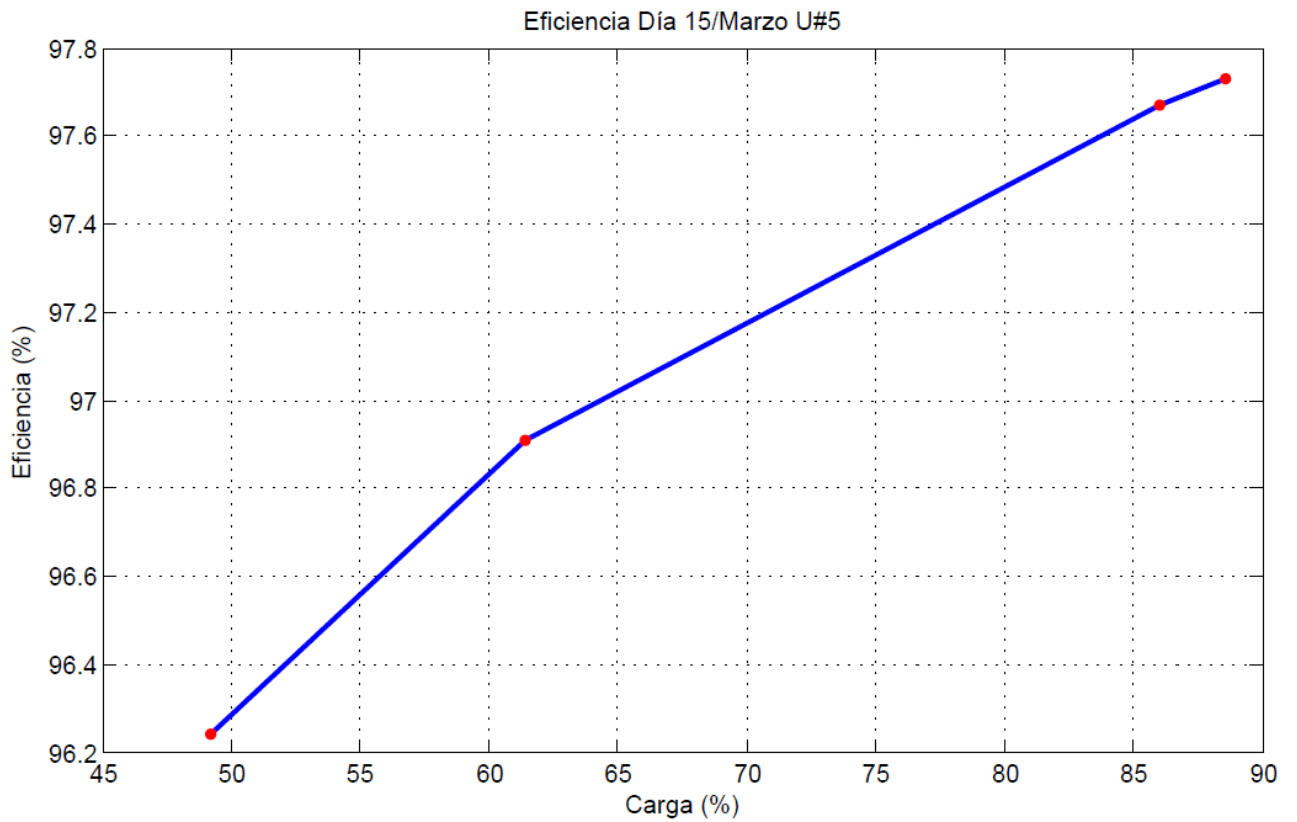
Día 1. 14 de Marzo de 2016. Unidad #4

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
49,2	96,24	17,72
94,5	97,84	34,02
95,2	97,85	34,26
78,1	97,48	28,11



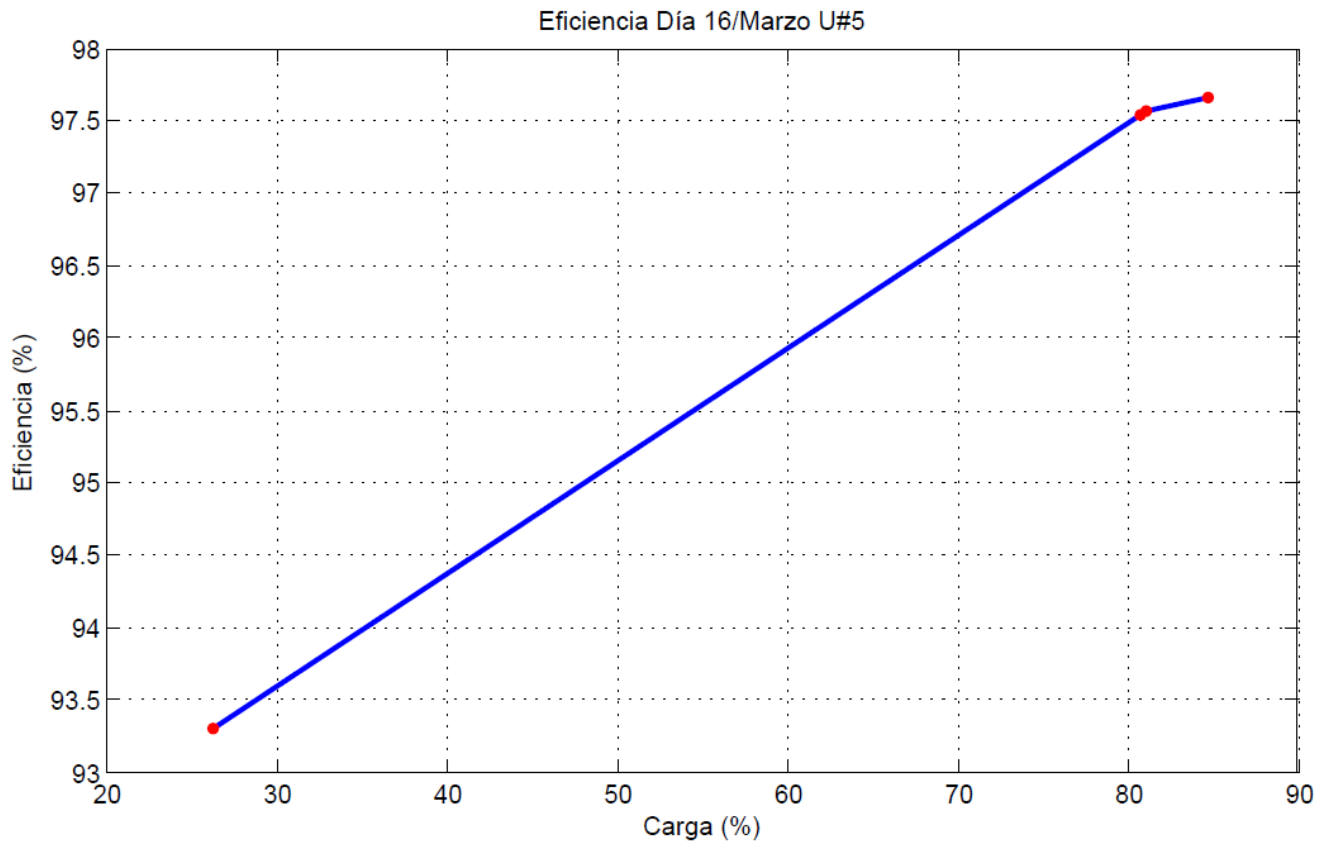
Día 2. 15 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
61,4	96,91	22,09
86,0	97,67	30,95
88,6	97,73	31,89
49,2	96,24	17,72



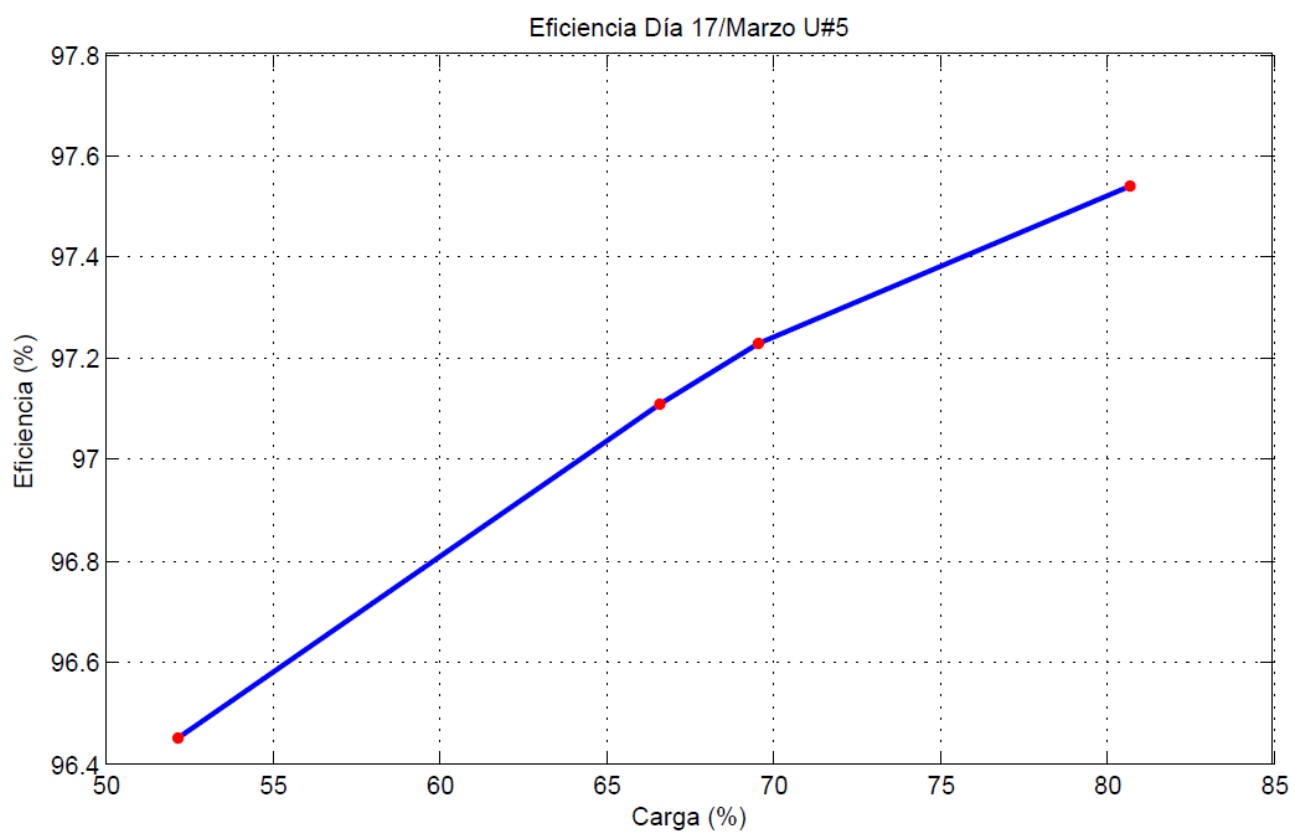
Día 3. 16 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
81,1	97,56	29,19
80,7	97,54	29,06
26,3	93,30	9,45
84,7	97,66	30,48



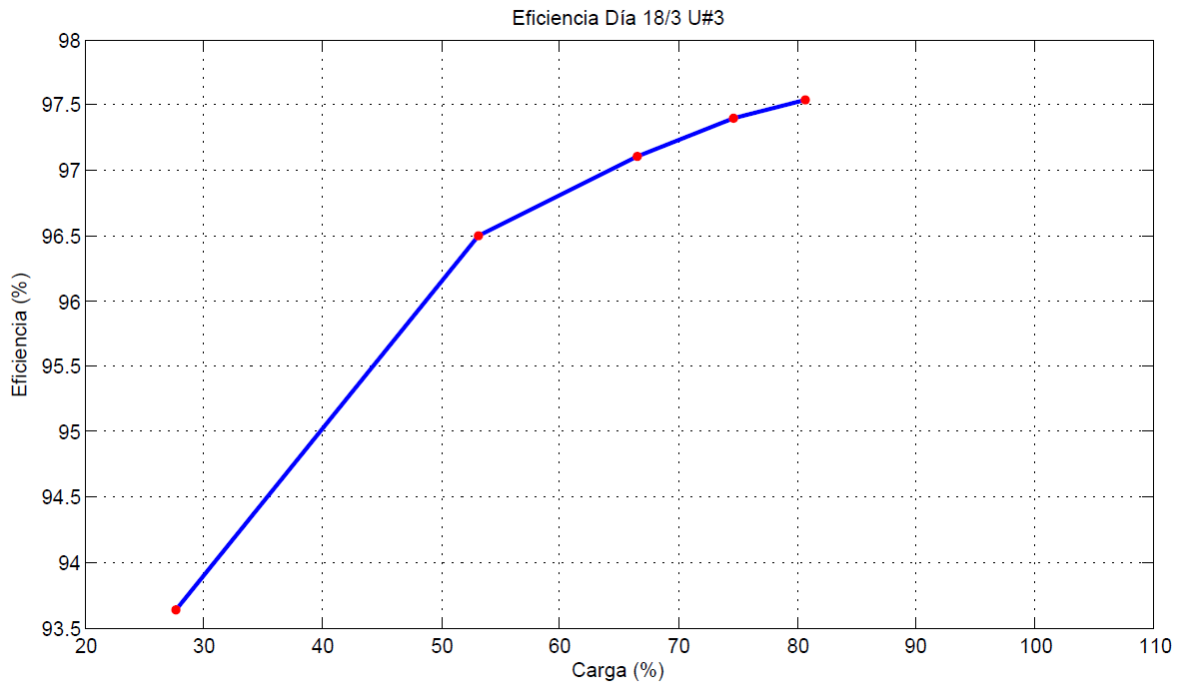
Día 4. 17 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
80,7	97,54	29,06
66,6	97,11	23,98
52,5	96,45	18,90
69,6	97,23	25,04



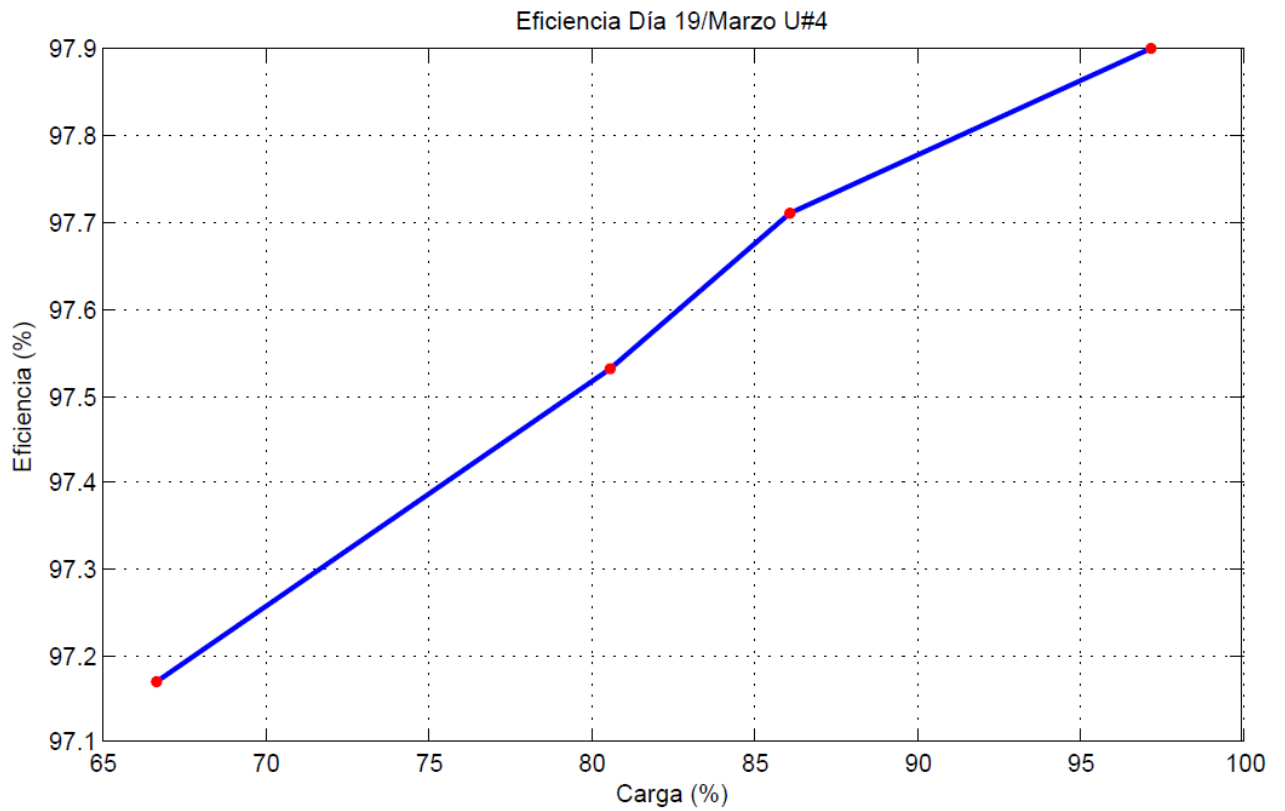
Día 5. 18 de Marzo de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
53,1	96,50	19,11
74,7	97,40	26,89
27,6	93,63	9,95
80,7	97,54	29,06
66,6	97,11	23,98



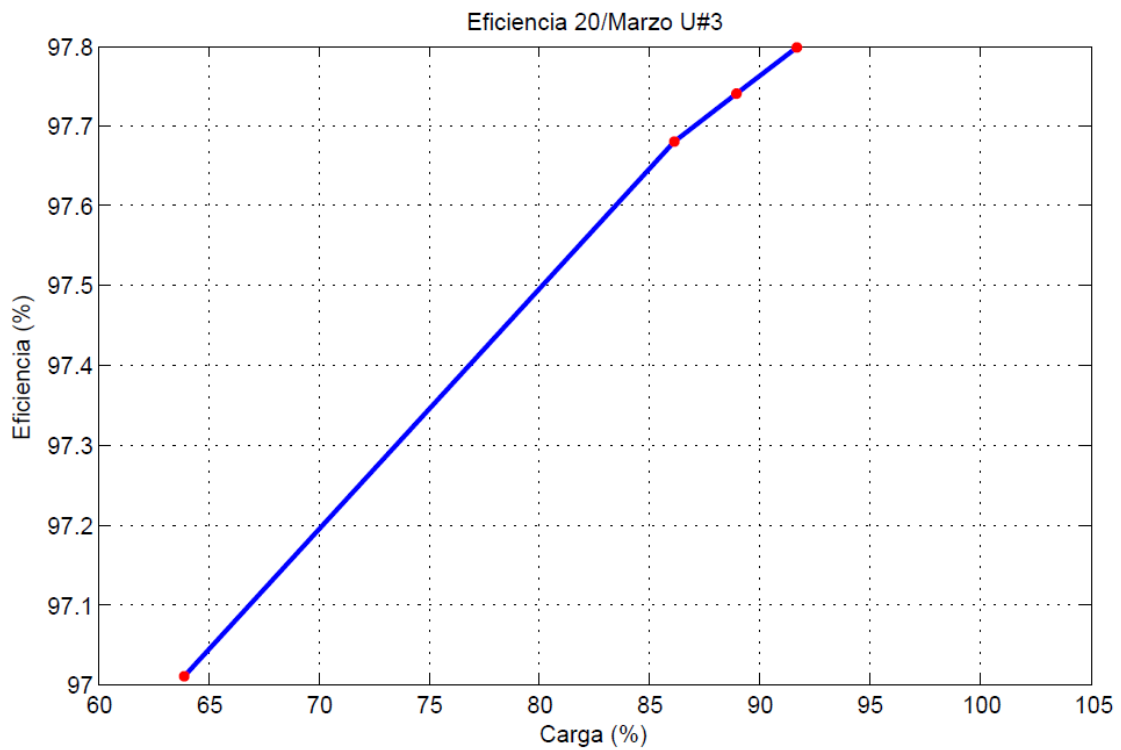
Día 6. 19 de Marzo de 2016. Unidad #4

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
66,7	97,17	24,00
86,1	97,71	31,00
97,2	97,90	35,00
80,6	97,53	29,00



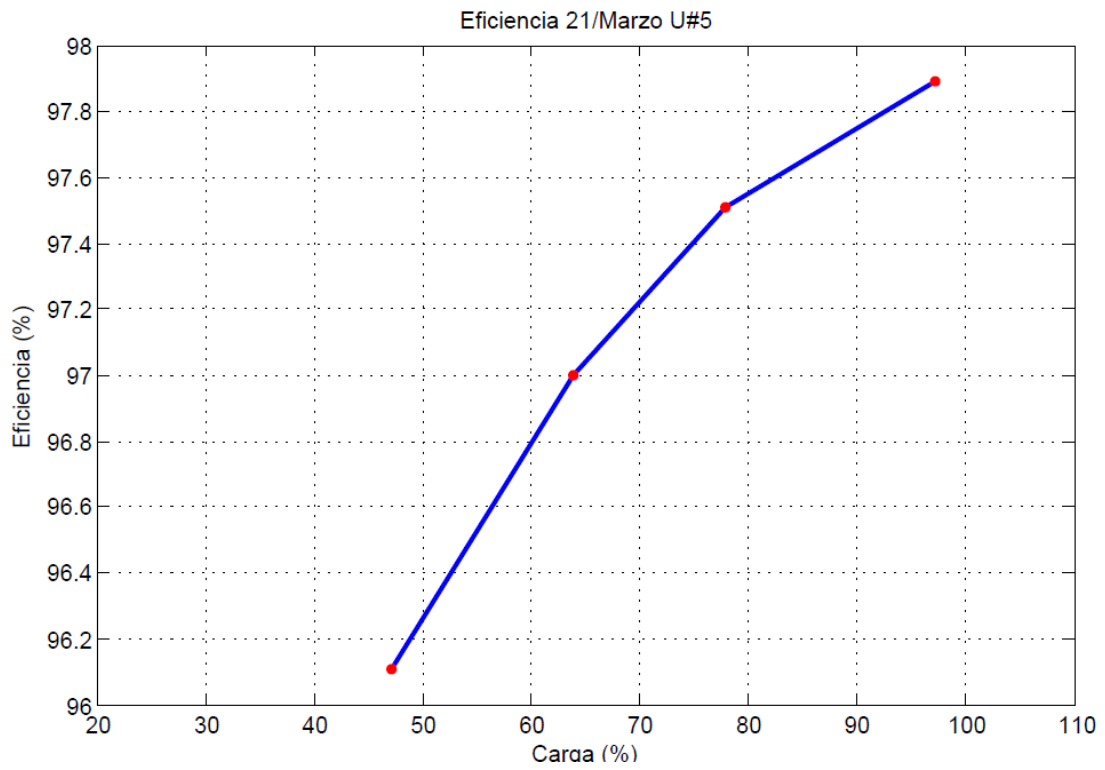
Día 7. 20 de Marzo de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
86,1	97,68	31,00
88,9	97,74	32,00
91,7	97,80	33,00
63,9	97,01	23,00



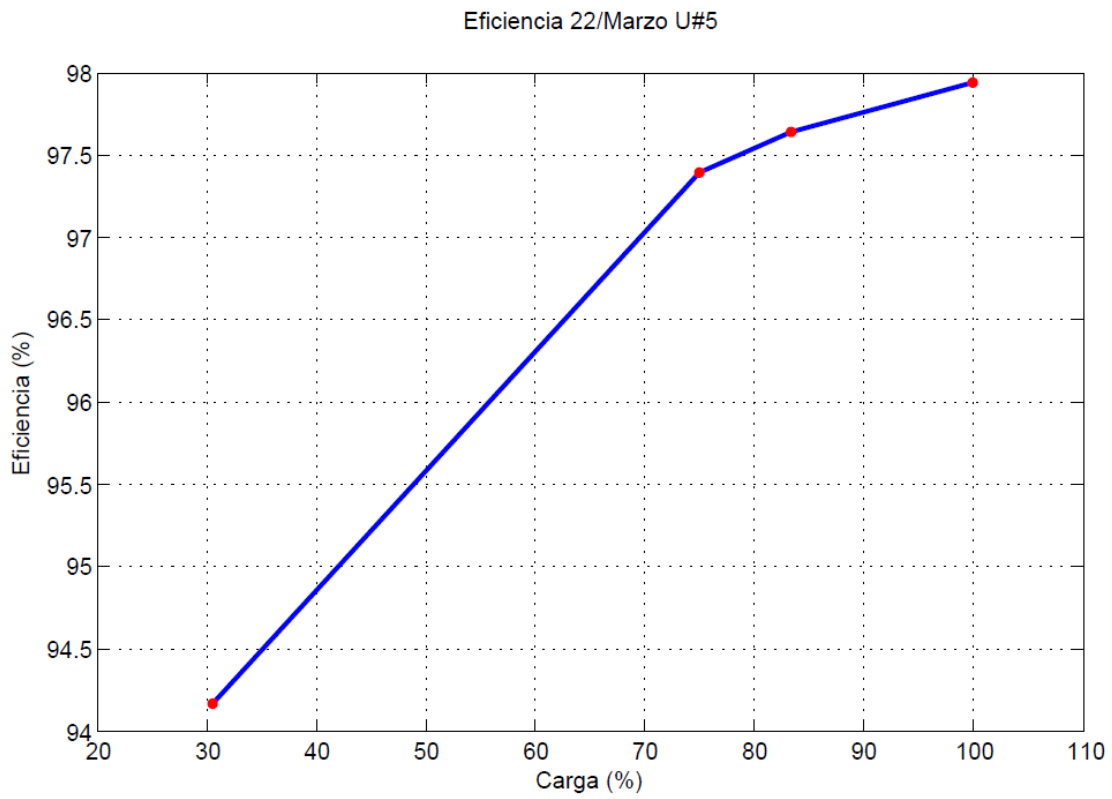
Día 8. 21 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
77,8	97,51	28,00
47,2	96,11	17,00
97,2	97,89	35,00
63,9	97,00	23,00



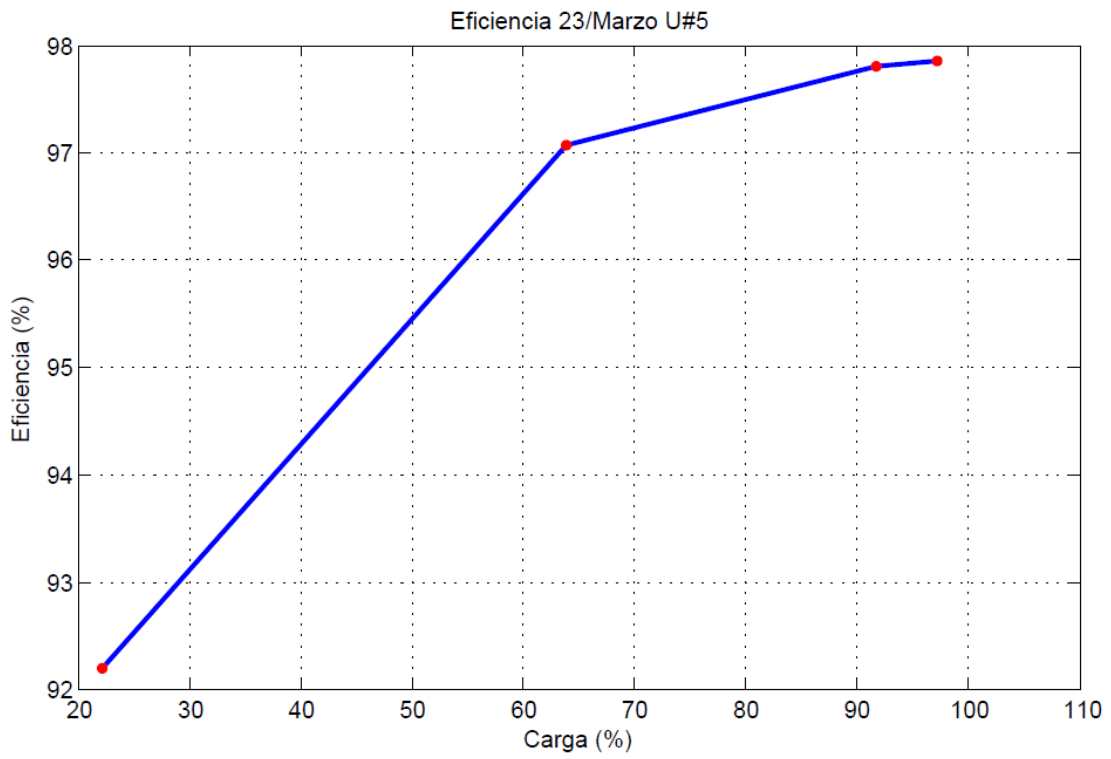
Día 9. 22 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
83,3	97,64	30,00
30,6	94,17	11,00
75,0	97,39	27,00
100,0	97,94	36,00



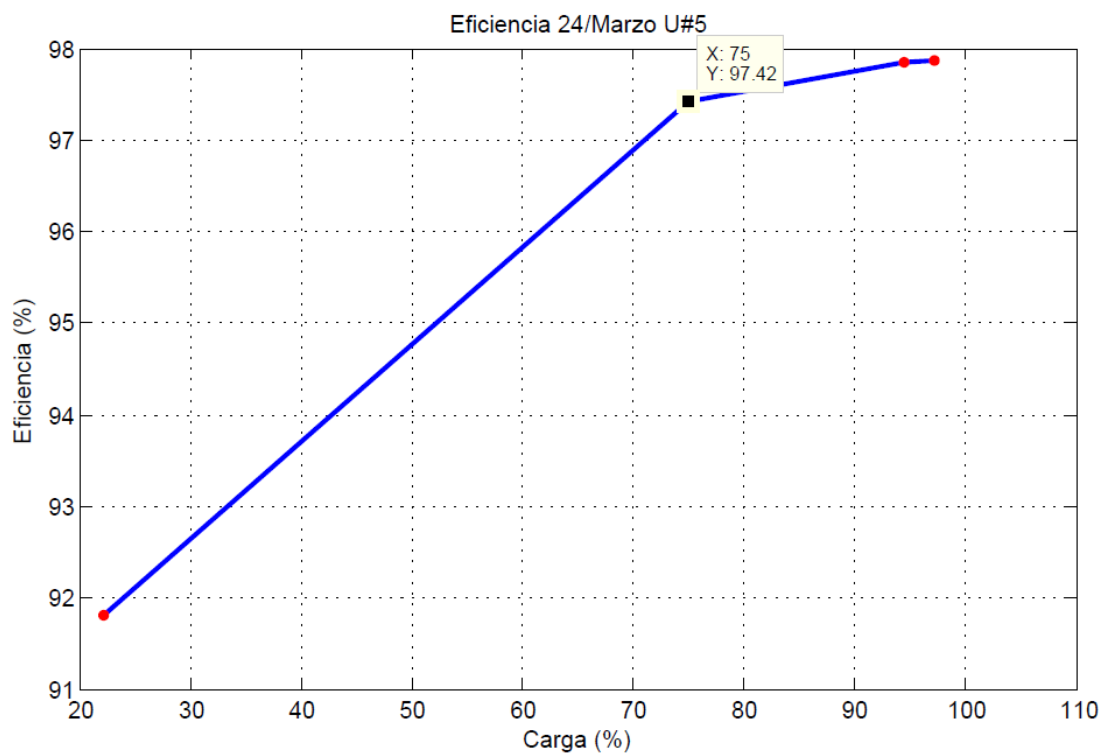
Día 10. 23 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
63,9	97,07	23,00
91,7	97,81	33,00
22,2	92,20	8,00
97,2	97,86	35,00



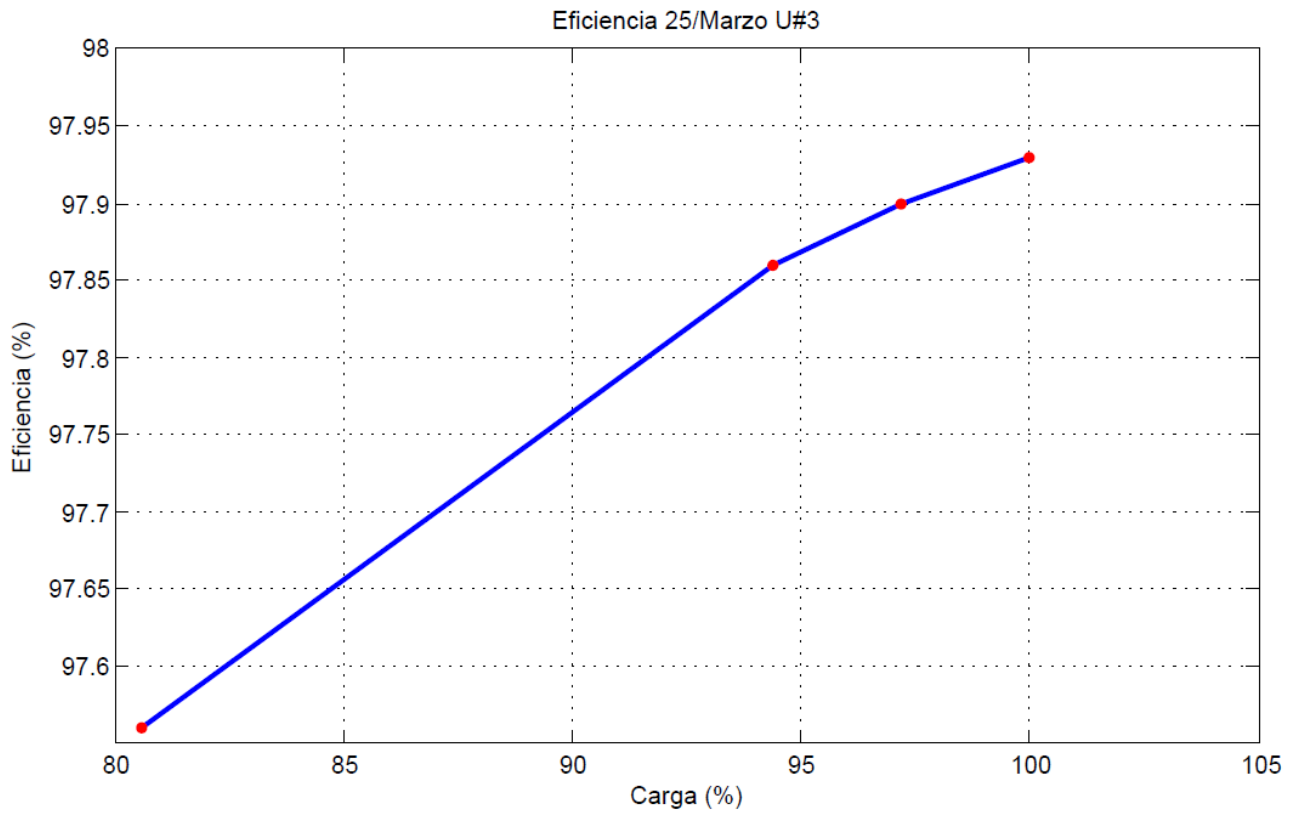
Día 11. 24 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
75,0	97,42	27,00
22,2	91,81	8,00
94,4	97,85	34,00
97,2	97,87	35,00



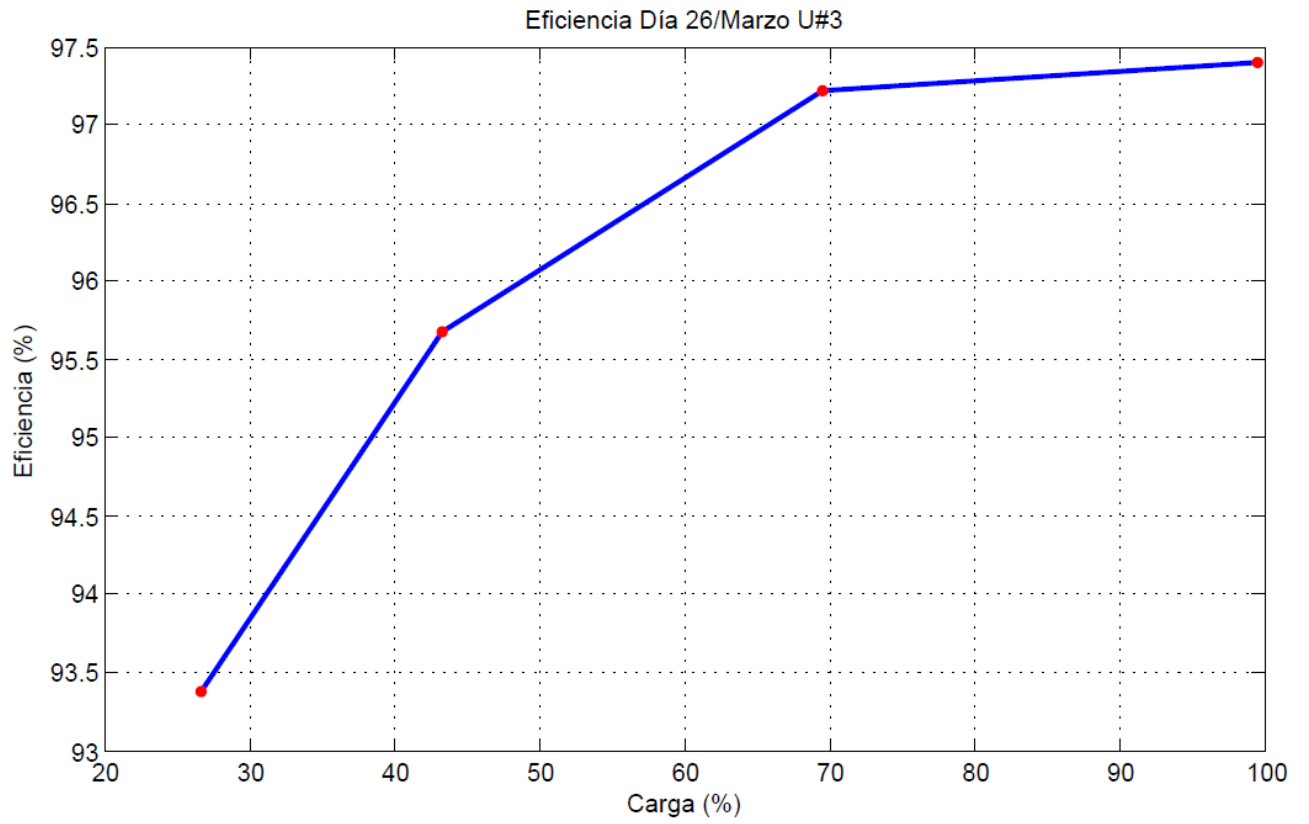
Día 12. 25 de Marzo de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
94,4	97,86	34,00
80,6	97,56	29,00
97,2	97,90	35,00
100,0	97,93	36,00



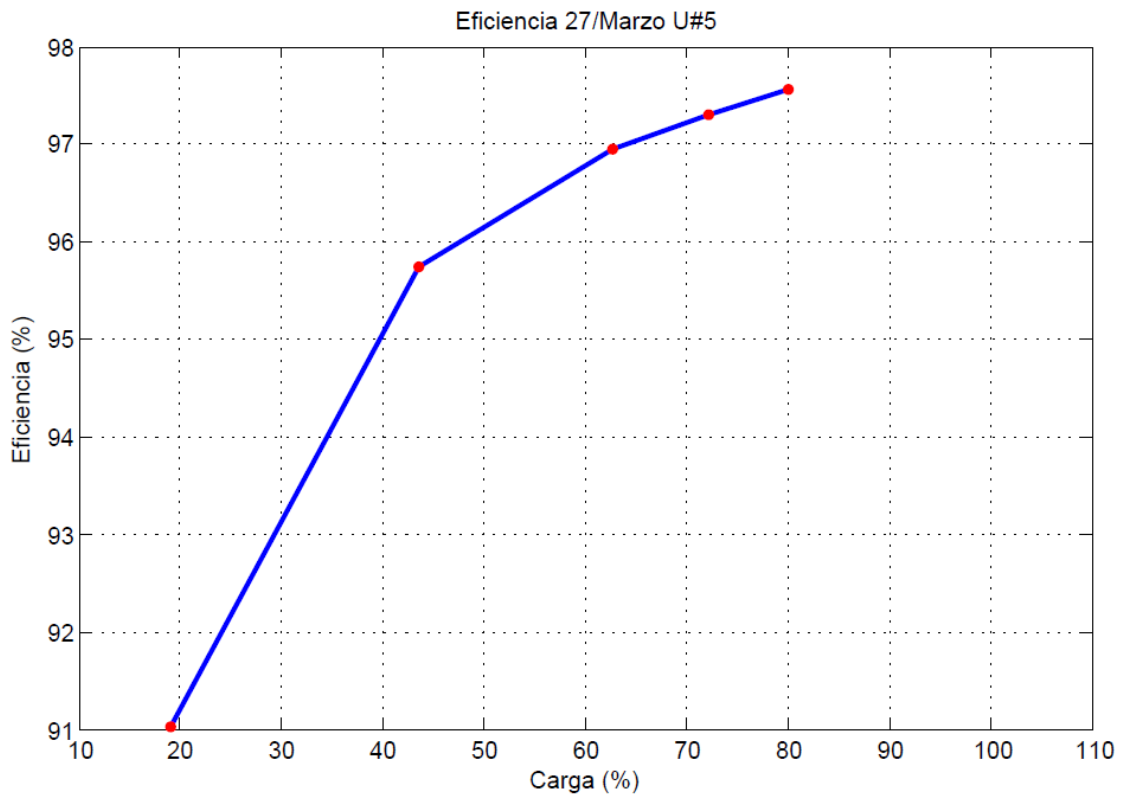
Día 13. 26 de Marzo de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
69,6	97,22	25,06
26,7	93,38	9,61
43,3	95,68	15,59
97,2	97,90	35,00



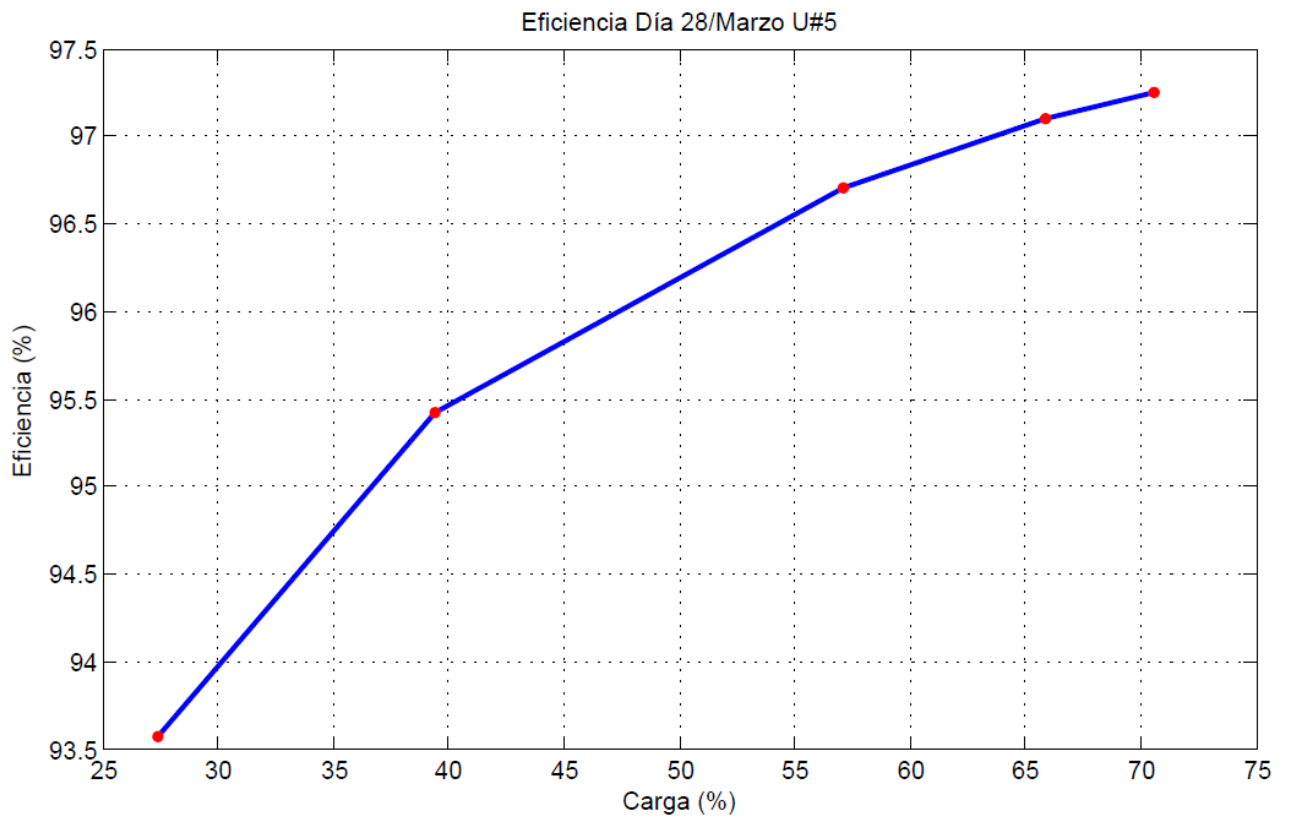
Día 14. 27 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
43,5	95,74	15,66
62,7	96,95	22,56
72,2	97,31	25,99
80,0	97,56	28,80
19,1	91,02	6,88



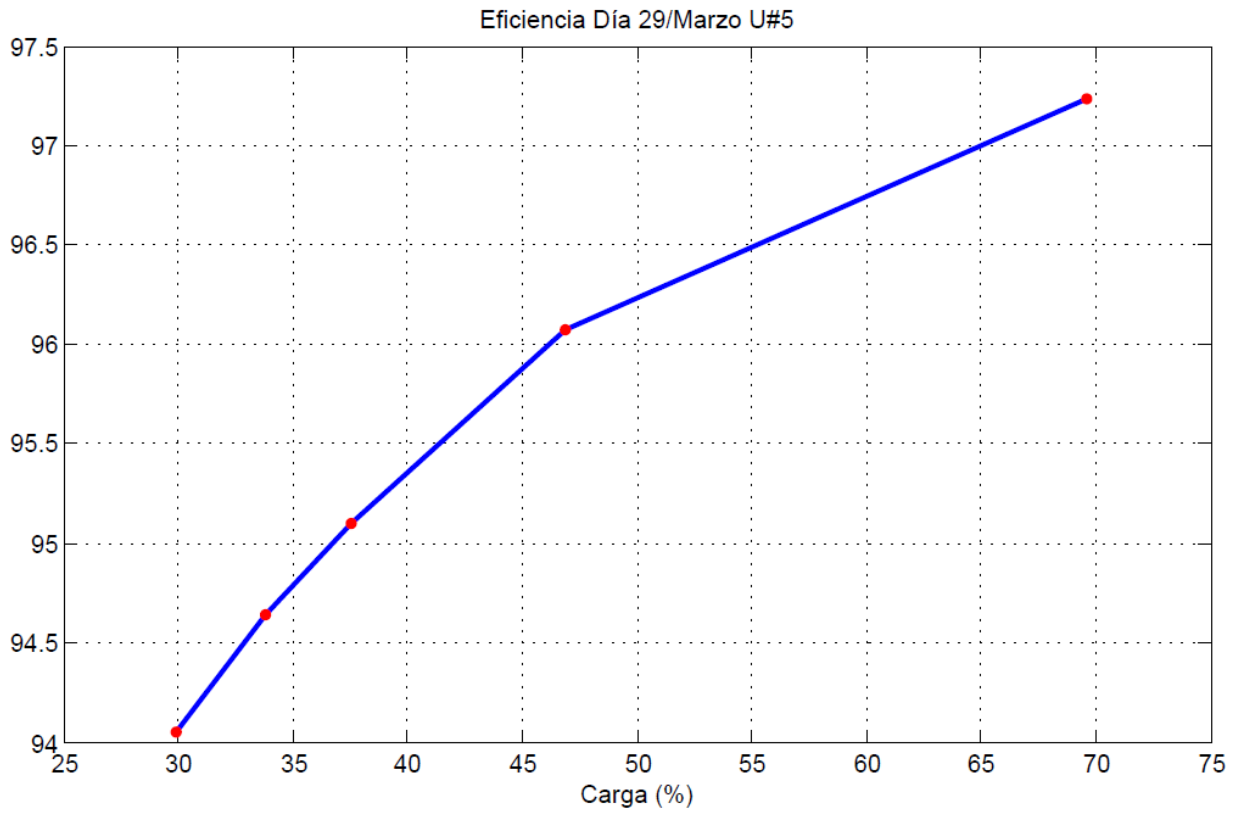
Día 15. 28 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
57,1	96,70	20,55
70,6	97,25	25,40
27,4	93,57	9,88
65,9	97,10	23,74
39,4	95,42	14,18



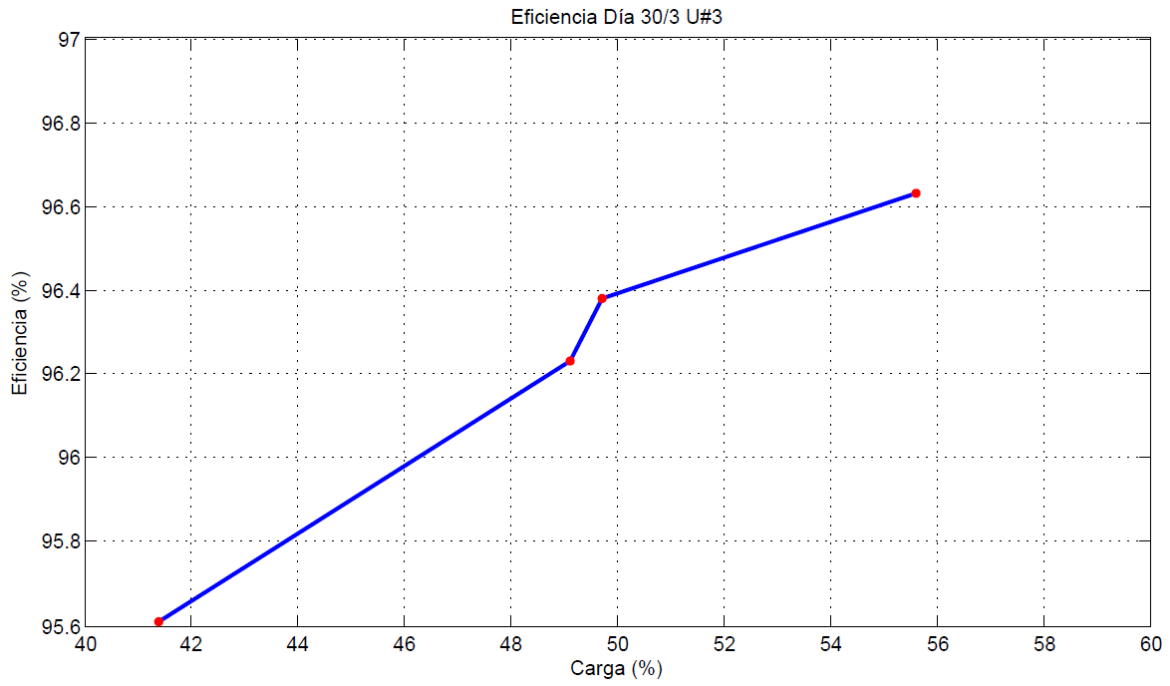
Día 16. 29 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
29,9	94,05	10,75
33,8	94,64	12,71
37,5	95,10	13,49
69,6	97,23	25,04
46,9	96,07	16,89



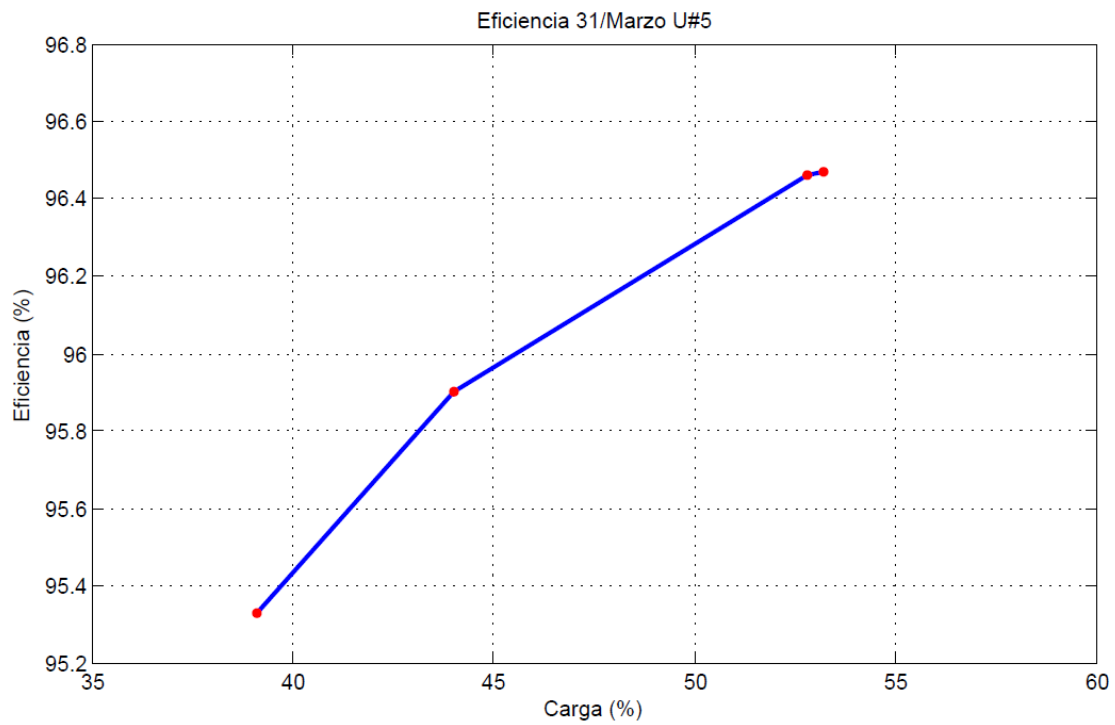
Día 17. 30 de Marzo de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
41,4	95,61	14,90
55,6	96,63	20,00
49,7	96,28	17,90
49,1	96,23	17,69



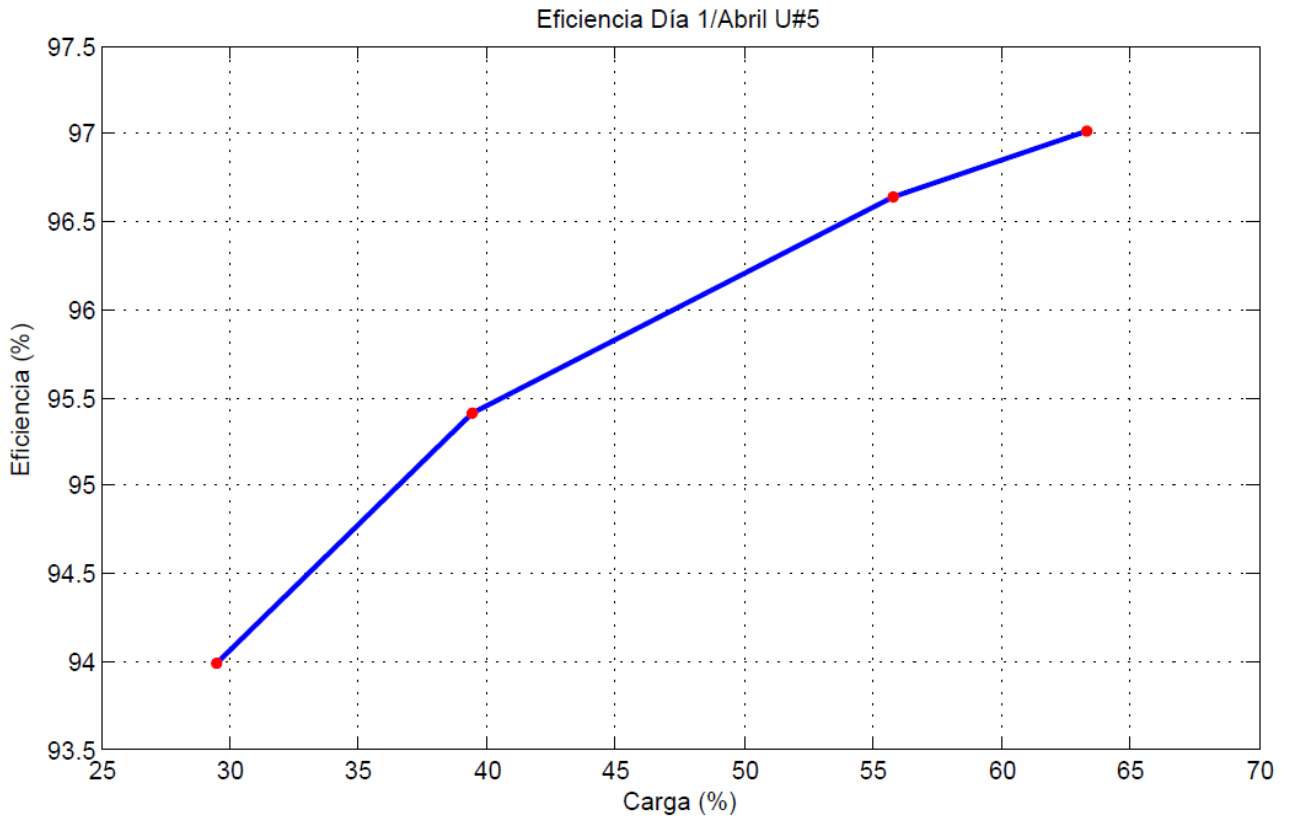
Día 18. 31 de Marzo de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
44,0	95,90	15,83
52,8	96,46	19,02
39,1	95,33	14,06
53,2	96,47	19,14



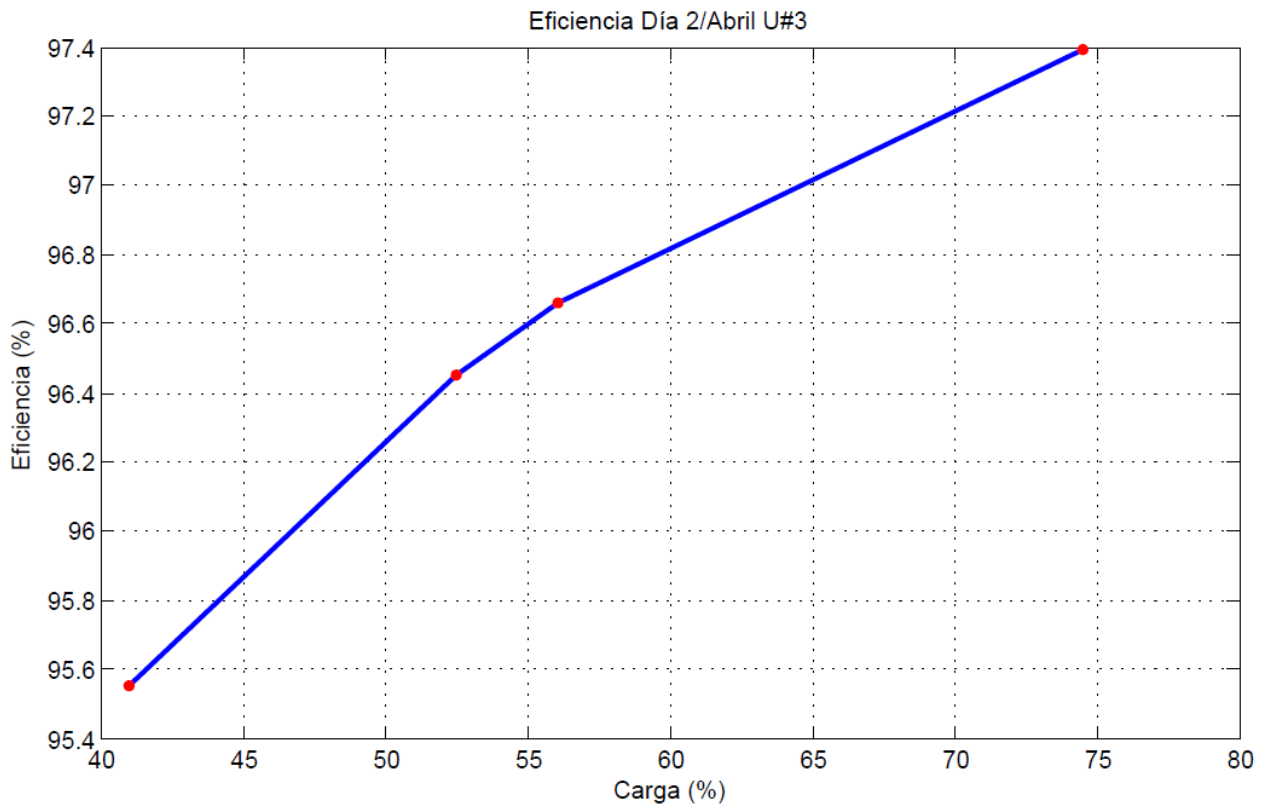
Día 19. 1 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
39,4	95,41	14,18
63,3	97,01	22,80
55,8	96,64	20,08
29,5	93,99	10,63



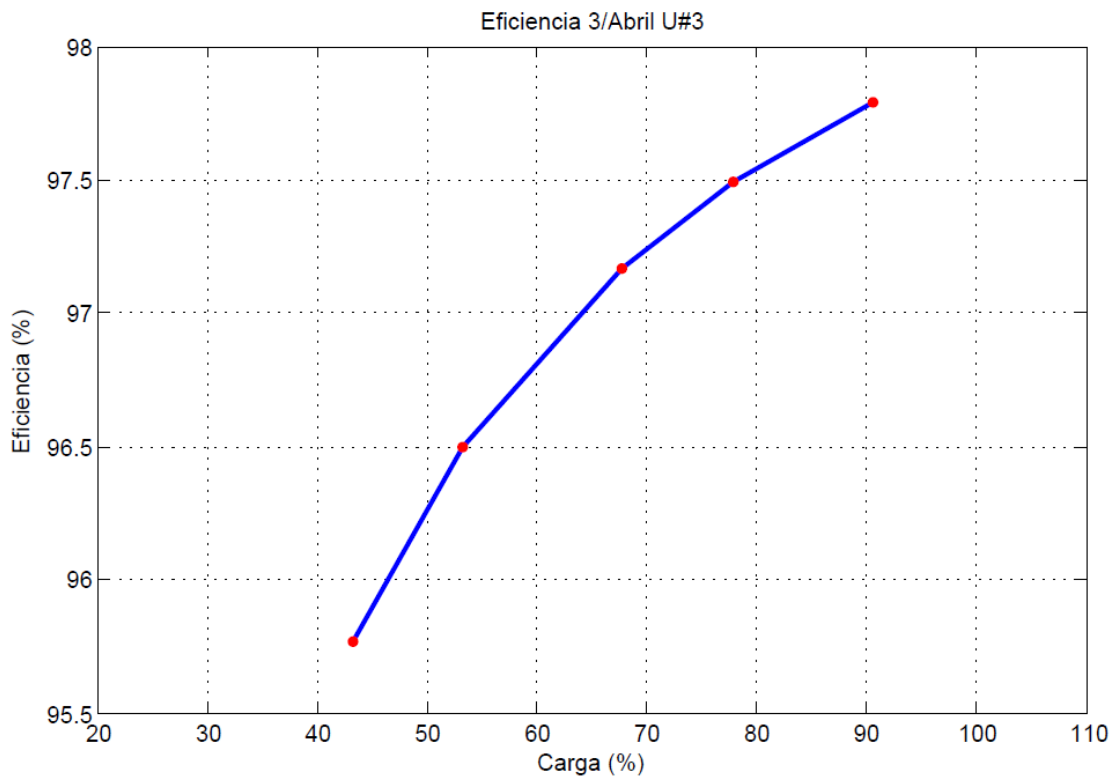
Día 20. 2 de Abril de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
52,5	96,45	18,90
41,0	95,55	14,77
74,5	97,39	26,81
56,1	96,66	20,20



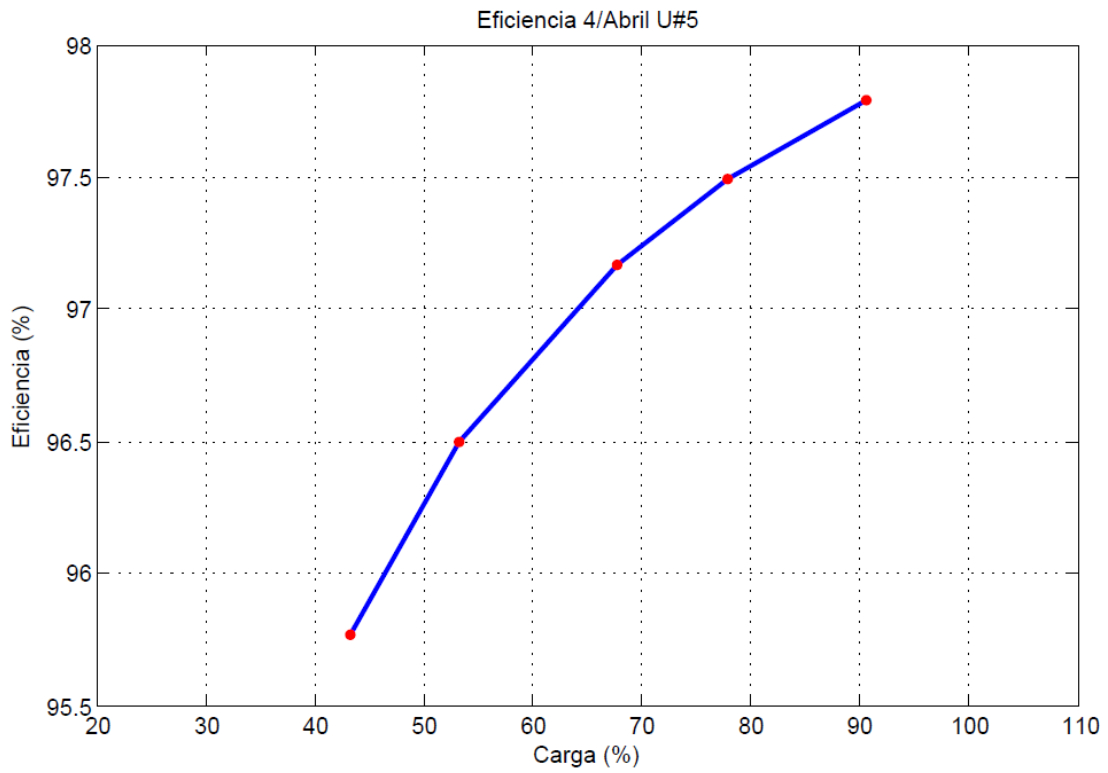
Día 21. 3 de Abril de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
90,6	97,79	32,60
43,3	95,77	15,59
77,8	97,49	28,00
67,7	97,17	24,38
53,3	96,50	19,20



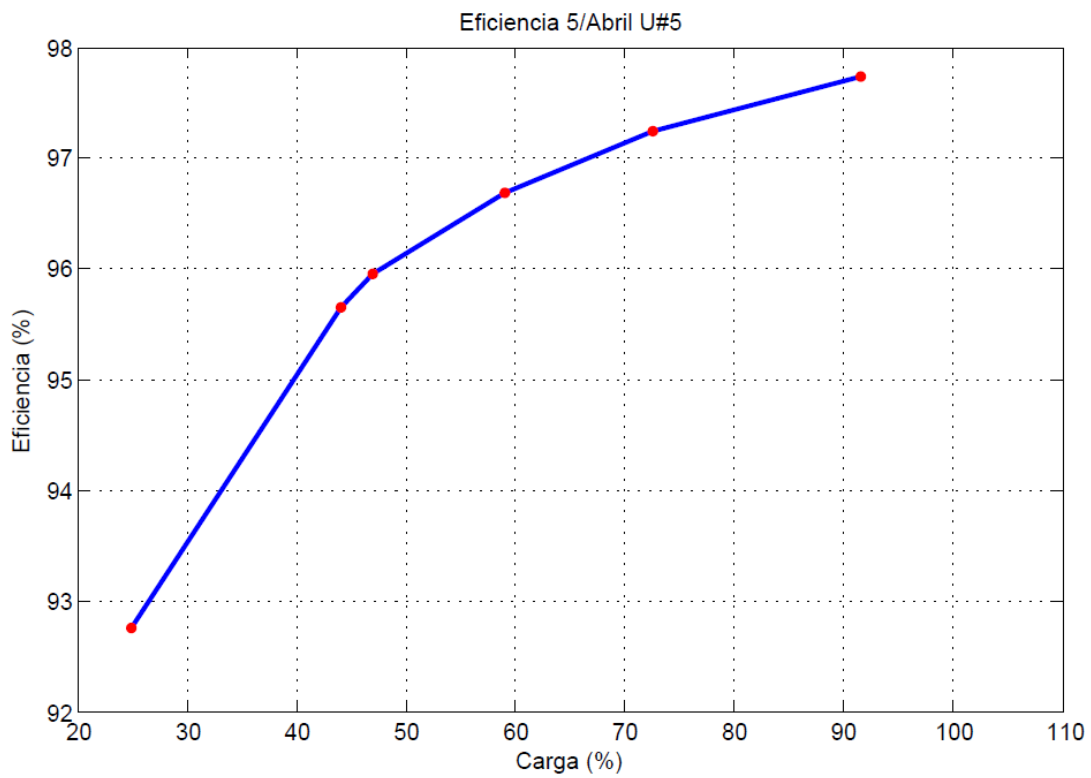
Día 22. 4 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
39,1	95,32	14,06
82,0	97,59	29,53
54,5	96,56	19,61
19,4	91,15	6,97
54,8	96,55	19,73



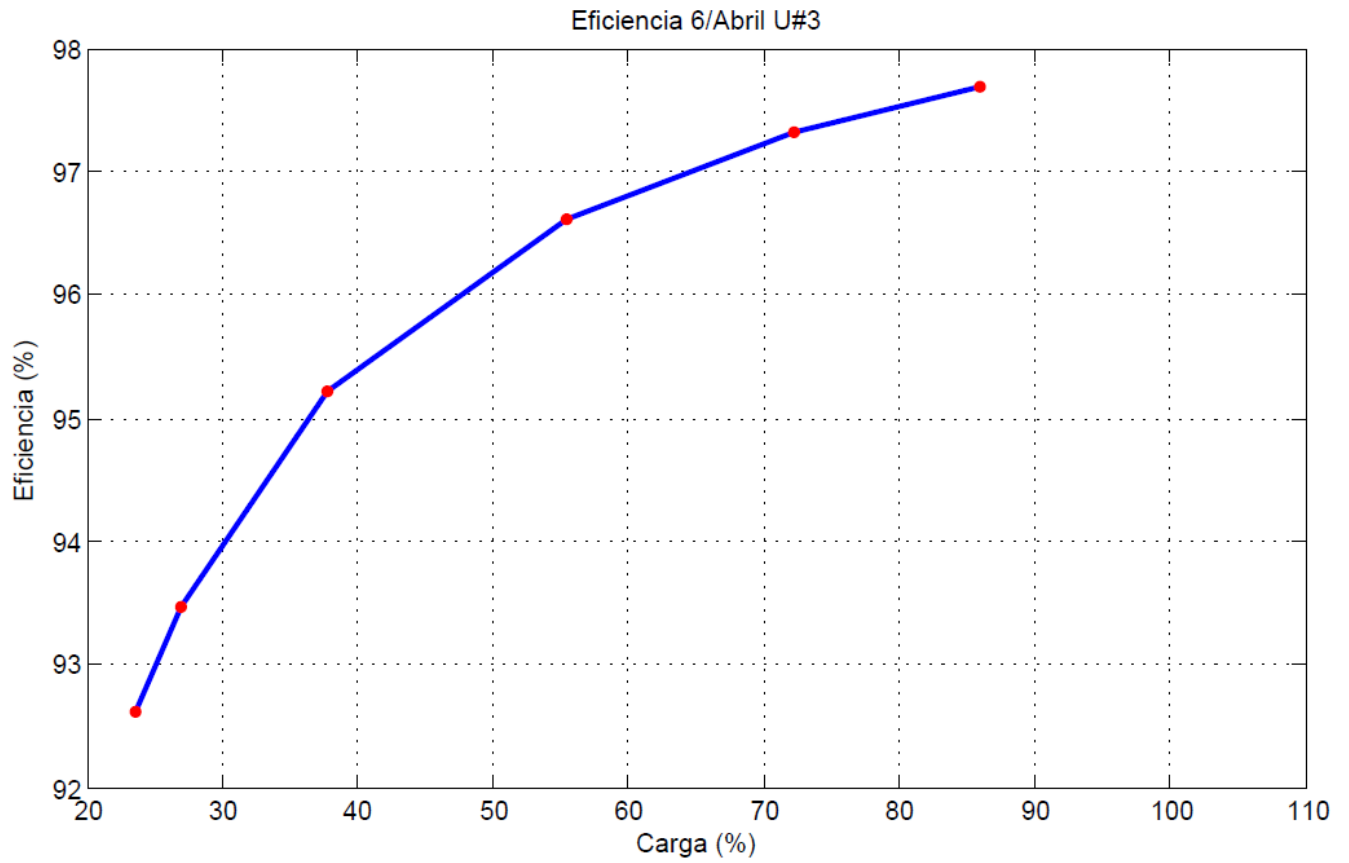
Día 23. 5 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
46,9	95,96	16,89
44,0	95,66	15,83
91,5	97,73	32,93
72,5	97,25	26,09
24,9	92,75	8,96
59,1	96,68	21,26



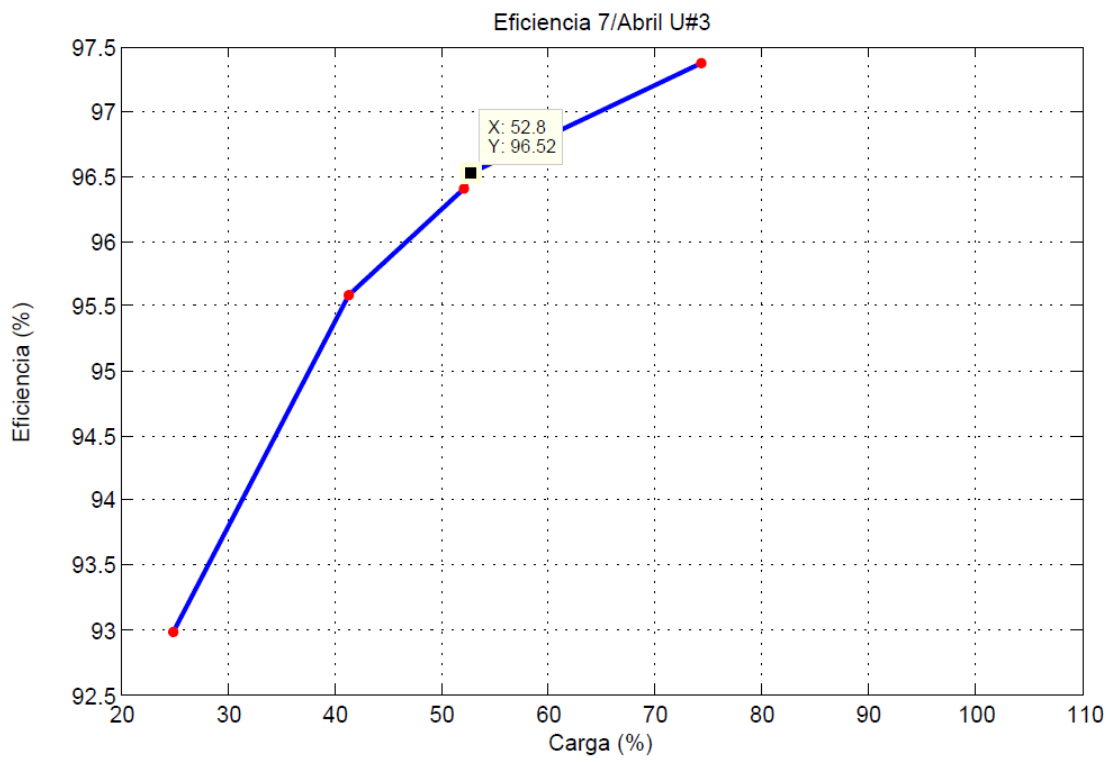
Día 24. 6 de Abril de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
26,9	93,46	9,69
55,4	96,62	19,96
72,2	97,32	25,99
37,7	95,21	13,58
86,0	97,69	30,95
23,6	92,62	8,48



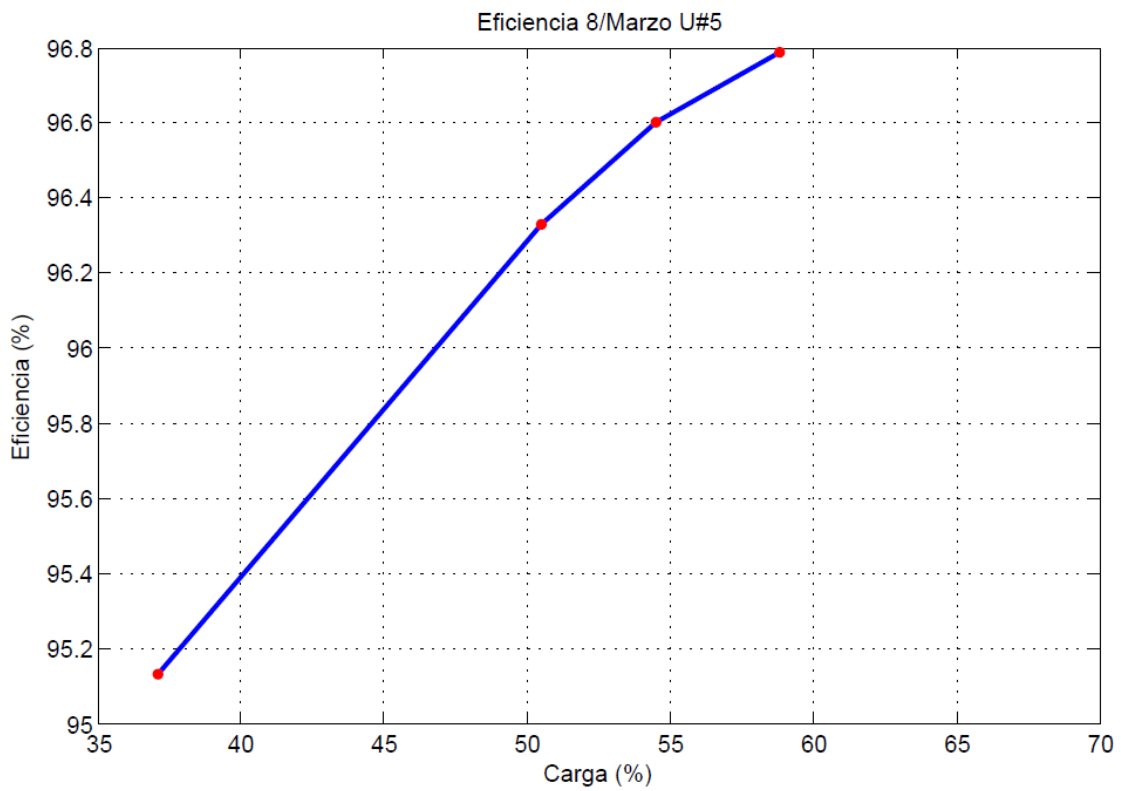
Día 25. 7 de Abril de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
52,2	96,40	18,78
41,3	95,59	14,88
52,8	96,52	18,99
24,9	92,98	8,98
74,3	97,38	26,73
57,8	96,73	20,79



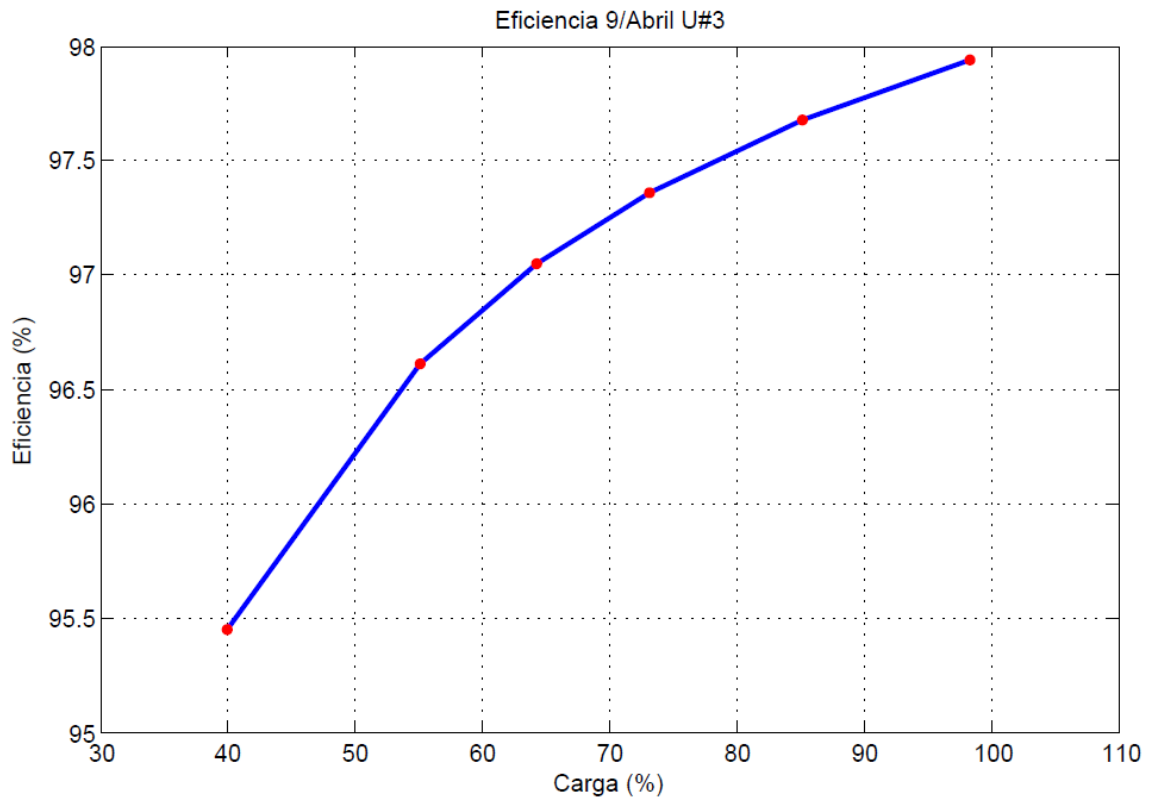
Día 26. 8 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
54,5	96,60	19,61
37,1	95,13	13,35
58,8	96,79	21,16
50,5	96,33	18,19



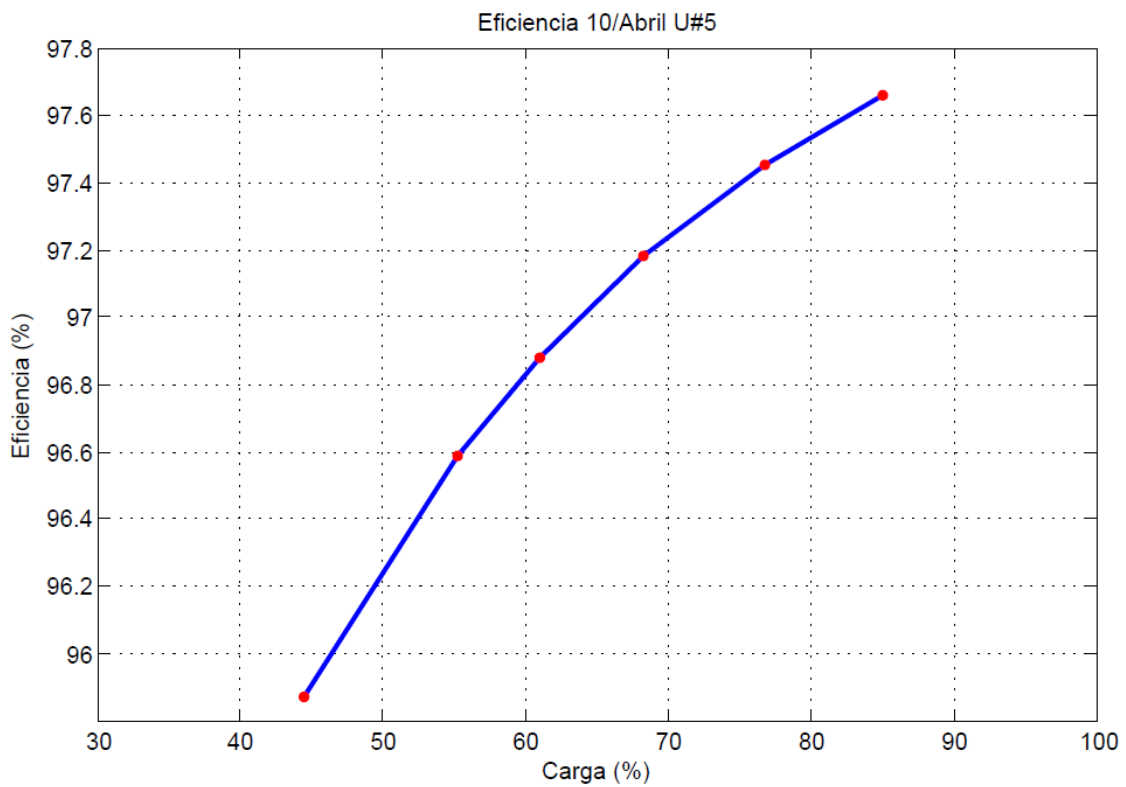
Día 27. 9 de Abril de 2016. Unidad #3

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
85,2	97,68	30,66
55,1	96,61	19,85
64,3	97,05	23,15
73,2	97,36	26,34
40,0	95,45	14,41
98,4	97,94	35,44



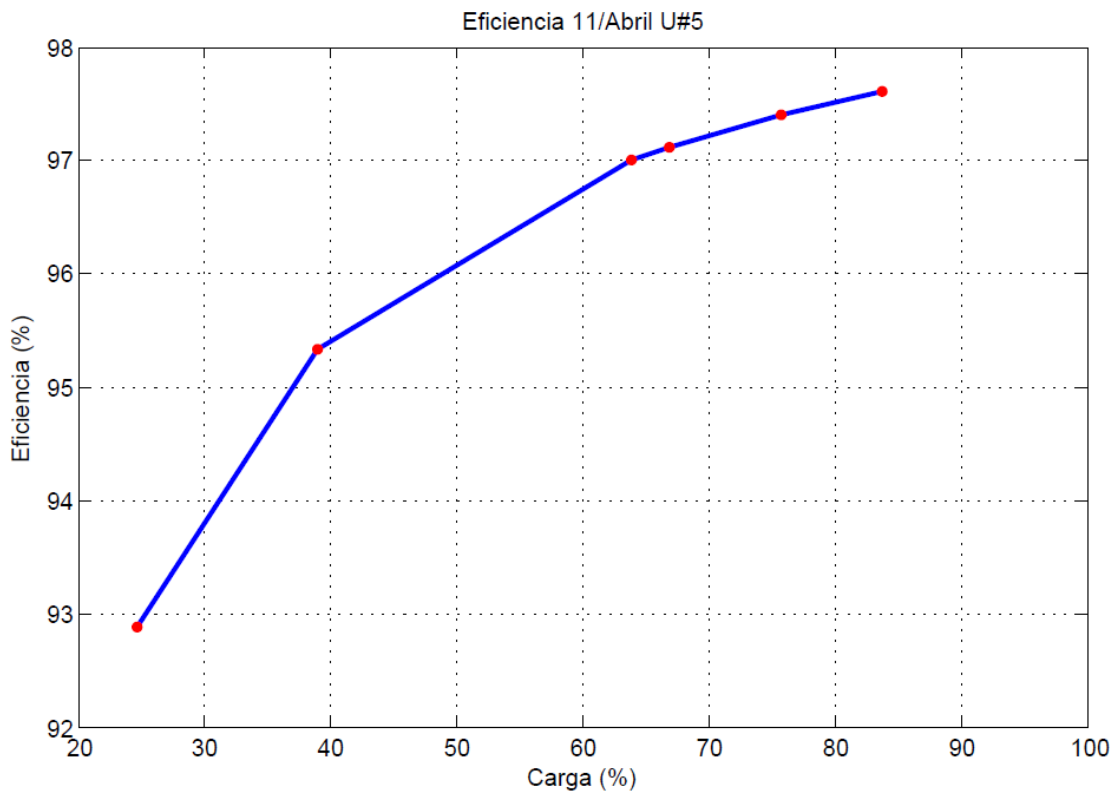
Día 28. 10 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
44,5	95,87	16,02
68,3	97,18	24,57
76,8	97,45	27,63
85,0	97,66	30,59
55,2	96,59	19,86
61,0	96,88	21,97



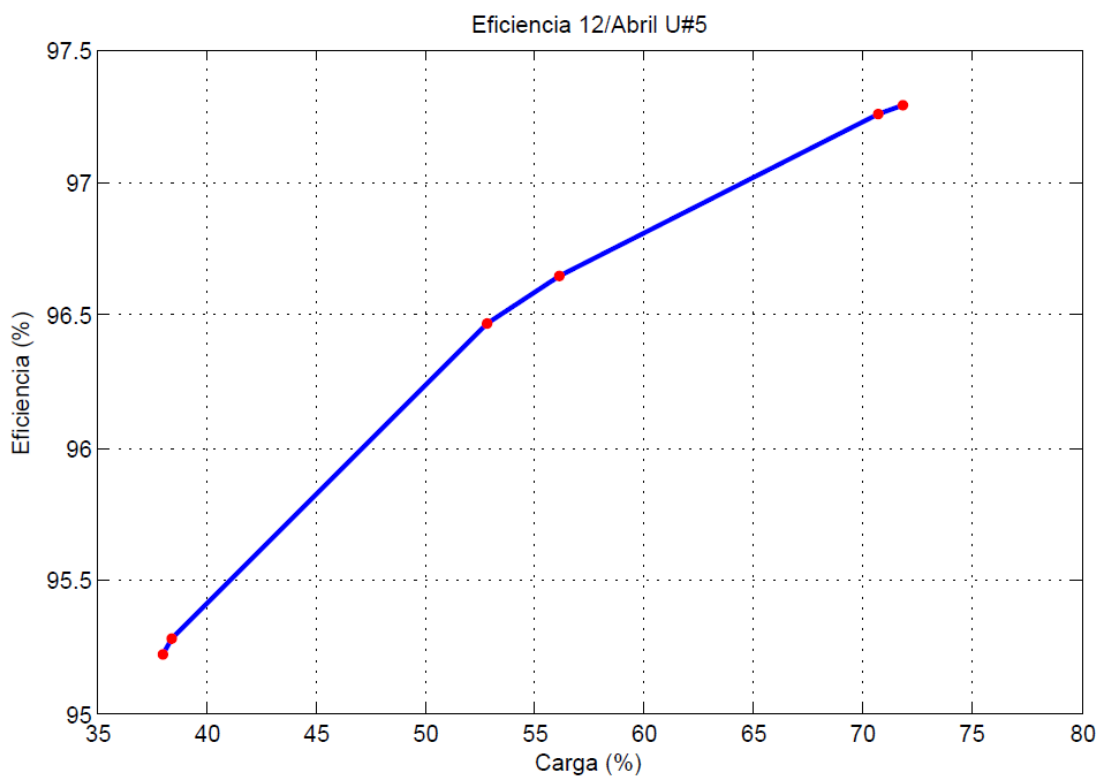
Día 29. 11 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
63,8	97,00	22,96
39,0	95,33	14,03
24,7	92,89	8,89
75,8	97,41	27,29
66,9	97,12	24,10
83,8	97,61	30,18



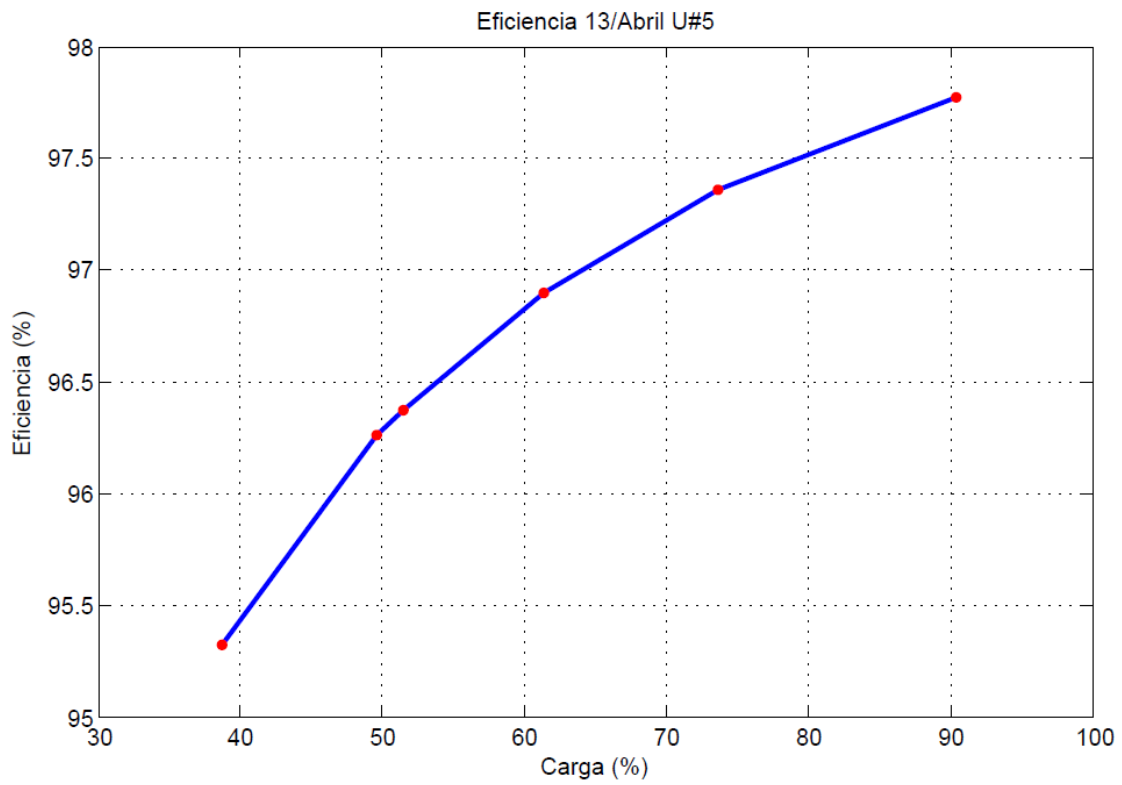
Día 30. 12 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
52,8	96,47	19,02
70,7	97,26	25,44
38,4	95,28	13,82
71,8	97,29	25,84
56,1	96,65	20,20
38,0	95,22	13,67



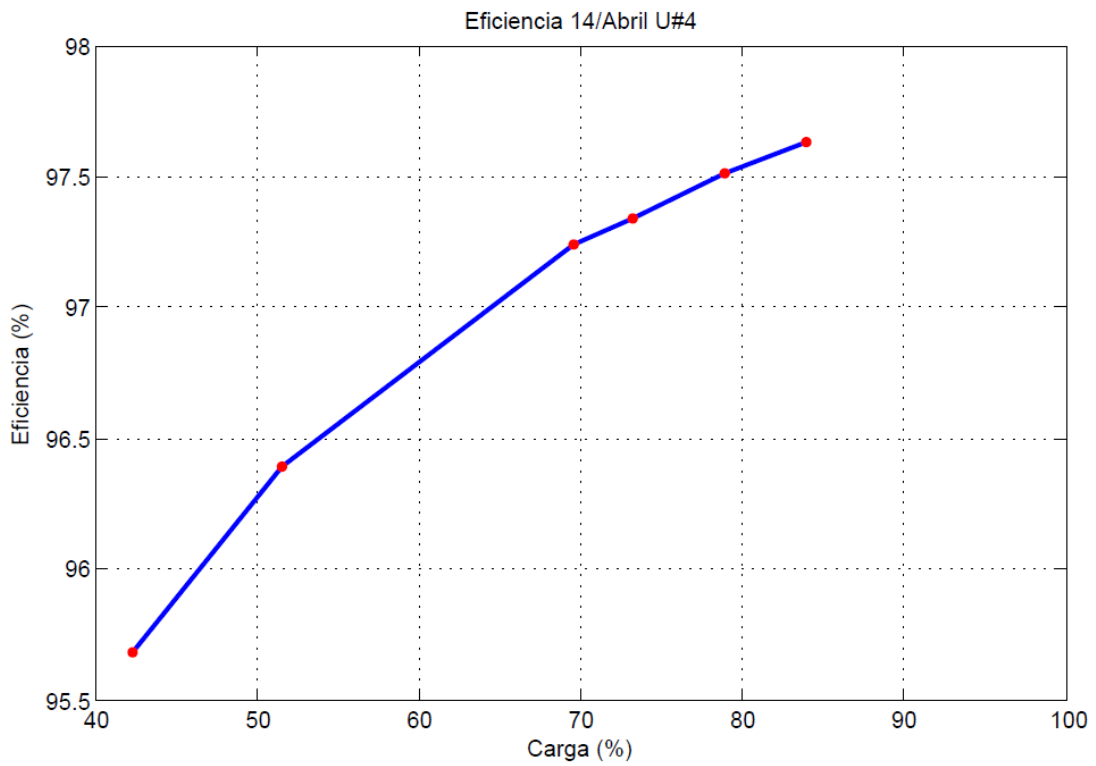
Día 31. 13 de Abril de 2016. Unidad #5

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
51,5	96,37	18,53
73,7	97,36	26,53
90,4	97,77	32,53
38,7	95,32	13,94
49,6	96,26	17,84
61,4	96,90	22,09



Día 32 14 de Abril de 2016. Unidad #4

Carga (%)	Eficiencia (%)	Potencia (MW)
42,3	95,68	15,24
78,9	97,51	28,39
69,6	97,24	25,04
51,5	96,39	18,55
73,2	97,34	26,34
84,0	97,63	30,24



ANEXOS

Anexo 1. Tabla de Eficiencias Mínimas según NEMA MG1-2009

Table 12-10
EFFICIENCY LEVELS

Nominal Efficiency	Minimum Efficiency Based on 20% Loss Difference	Nominal Efficiency	Minimum Efficiency Based on 20% Loss Difference
99.0	98.8	91.0	89.5
98.9	98.7	90.2	88.5
98.8	98.6	89.5	87.5
98.7	98.5	88.5	86.5
98.6	98.4	87.5	85.5
98.5	98.2	86.5	84.0
98.4	98.0	85.5	82.5
98.2	97.8	84.0	81.5
98.0	97.6	82.5	80.0
97.8	97.4	81.5	78.5
97.6	97.1	80.0	77.0
97.4	96.8	78.5	75.5
97.1	96.5	77.0	74.0
96.8	96.2	75.5	72.0
96.5	95.8	74.0	70.0
96.2	95.4	72.0	68.0
95.8	95.0	70.0	66.0
95.4	94.5	68.0	64.0
95.0	94.1	66.0	62.0
94.5	93.6	64.0	59.5
94.1	93.0	62.0	57.5
93.6	92.4	59.5	55.0
93.0	91.7	57.5	52.5
92.4	91.0	55.0	50.5
91.7	90.2	52.5	48.0
		50.5	46.0

Anexo 2. Datos de Placa Generador U3.

Generador		
Potencia nominal para elevación de temperatura correspondiente a límite aislamiento clase B	MVA	42,2
Potencia máxima para elevación de temperatura correspondiente a límite aislamiento clase F	MVA	> 48,16
Eficiencia a condiciones nominales.		98,12
Razón de corto circuito,	p.u	1,0
Reactancia síncrona de eje directo saturada (x_d)	p.u	0,99
Reactancia transitoria de eje directo (x_d')	p.u	0,30 / 0,28
Reactancia subtransitoria de eje directo (x_d'')	p.u	0,24 / 0,16
Reactancia de secuencia cero: x_0	p.u	0,12
Reactancia de secuencia negativa: x_2	p.u	0,24
Constantes de tiempo en segundos:		
a- Transitorio de circuito abierto: $T'd_0$	seg.	7,139
b- Transitorio de corto circuito: $T'd$	seg.	1,804
c- Subtransitorio de corto circuito: $T''d$	seg.	0,084
d- Constante de tiempo de armadura: T_a	seg.	0,283
Nivel de ruido en condiciones nominales	dB	Igual al existente en la central
Capacidad de suministro de reactivos, a factor de potencia cero:		
a- Subexcitado:	MVA	32,8
b- Sobreexcitado:	MVA	35,6
Factor de desviación de la forma de onda	%	5 (THD) de acuerdo con CEI/IEC
Factor de influencia telefónica		de acuerdo con IEEE
a- Balanceado:	%	70
b- Residual:	%	50
Potencia máxima de salida en los terminales del generador	MVA	48,16
Voltaje nominal	kV	13,8
Corriente nominal	A	1766

Factor de potencia atrasado		0,8
Frecuencia	Hz	60
Velocidad nominal	rpm	450
Temperatura agua de enfriamiento	°C	20
Momento de inercia GD2 requerido	ton-m2	487
Presión del agua sistema de enfriamiento	kg/cm2	3,5
Disposición de cojinetes		
Pérdidas:		
a- Fricción y ventilación	kW	158
b- Núcleo	kW	169
c- Estator (I2R a 115°C)	kW	114
d- Rotor (I2R a 115°C)	kW	134
e- Corrientes parásitas a 115°C	kW	72
f- Pérdidas totales a 115°C	kW	647
Resistencias:		
a- Bobinas estator a 115°C (ohmios)	ohmios	0,0111
b- Bobinas rotor a 115°C (ohmios)	ohmios	0,0864
Temperaturas: Aumento bajo condiciones nominales, sobre los 40°C de temperatura ambiente		
a- Bobinas del estator	°C	82
b- Núcleo estático	°C	65
c- Anillos colectores rotor	°C	60
d- Bobinas rotor	°C	82

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho.

Anexo 3. Pruebas de Aislamiento

Prueba Realizada el 07 de Junio de 2014

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD								
MEDICION DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL GENERADOR								
PLANTA : RIO MACHO								
UNIDAD N°1								
MEDICION DE FASE RESPECTO A MASA					MEDICION ENTRE FASES			
Lectura del instrumento corregida a 40°C (Megaohmios)					Lecturas en megaohmios, corregidas a 40 °C.			
TIEMPO (minutos)	(R-S-T)	(R)	(S)	(T)	ROTOR	R(S-T)	S(R-T)	T(R-S)
0.5	849	2546	2546	2546	NA	3960	3111	3394
1.0	1697	4809	4667	4526	NA	7071	7071	5657
2.0	2546	8344	8061	7071	NA	10041	9900	9334
3.0	3111	11314	11314	9193	NA	14143	12446	12021
4.0	3536	14143	13436	11314	NA	16264	14143	12729
5.0	4243	17678	15274	13436	NA	19234	16971	15557
6.0	4809	20507	17678	15557	NA	21214	18386	18386
7.0	5091	22628	19800	18386	NA	23053	21214	19800
8.0	5374	25316	21214	20507	NA	24750	22628	21214
9.0	5516	27296	23336	21921	NA	26871	24750	22628
10.0	5799	29134	24326	23760	NA	28568	25598	24043
VOLTIOS PRUEBA (KV)	5	5	5	5	NA	5	5	5
N° VECES MINIMO	115	325	315	306	NA	478	478	382
TEMPERATURA °C	45	45	45	45	NA	45	45	45
FACTOR TEMP.	1.41	1.41	1.41	1.41	NA	1.41	1.41	1.41
INDICE	2.00	1.89	1.83	1.78	NA	1.79	2.27	1.67
ABSORCION								
INDICE	3.42	6.06	5.21	5.25	NA	4.04	3.62	4.25
POLARIZACION								
EQUIPO DE MEDICION : MEGGUER (MIT 1020) 5kVDC					Midió: Marcos Araya Hidalgo			
Observaciones:								
EVALUO : Ing. MAURICIO ARAYA ARAYA								

Fuente: Centro de Documentación Río Macho

Prueba Realizada el 07 de Junio del 2015.

TABLA						fecha: 07-05-2014		
INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD UEN DE PRODUCCION								
MEDICION DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEL GENERADOR								
PLANTA : RIO MACHO								
UNIDAD N°1	Serie :1660477	MVA : 21.2				Aislamiento: F		
MEDICION DE FASE RESPECTO A MASA						MEDICION ENTRE FASES		
Lectura del instrumento corregida a 40°C (Megaohmios)						Lecturas en megaohmios, corregidas a 40 °C.		
TIEMPO (minutos)	(R-S-T)	(R)	(S)	(T)	ROTOR	R(S-T)	S(R-T)	T(R-S)
0.5	1000	2200	2100	2300	1000	2800	2470	2500
1.0	2200	4000	3850	3950	2000	5000	4500	4900
2.0	4000	6700	6600	6400	3000	8600	7300	7200
3.0	6000	9000	8200	8500	4000	11401	9600	9500
4.0	7000	10700	9800	10300	5000	14001	11701	11801
5.0	7900	12201	11401	11801	6000	16001	15001	14001
6.0	9000	13701	13001	12501	6000	18001	16001	15201
7.0	10000	15001	14001	14001	6000	19501	17001	17001
8.0	11001	16101	15501	15401	6000	21301	19001	18301
9.0	12001	17001	16201	17301	6000	23001	20501	20501
10.0	13001	18401	18801	18601	6000	24501	21501	21701
VOLTIOS PRUEBA (KV)	5	5	5	5	0.5	5	5	5
N° VECES MINIMO	149	270	260	267	1667	338	304	331
TEMPERATURA °C	40	40	40	40	40	40	40	40
FACTOR TEMP.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
INDICE	2.20	1.82	1.83	1.72	2.00	1.79	1.82	1.96
ABSORCION	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
INDICE	5.91	4.60	4.88	4.71	3.00	4.90	4.78	4.43
POLARIZACION	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	BUENO	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
ESTADO DEL AISLAMIENTO	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
EQUIPO DE MEDICION : MEGGUER (MIT 1020) 5000 VDC						Midió: Marcos Araya Hidalgo		
Observaciones:								
EVALUO : Ing. MAURICIO ARAYA ARAYA Centro de Servicio Técnico Región Central.								

Anexo 4. Datos del Generadores.

Unidad 1 y 2

Datos generador:	Andritz
Serie:	1660477
Potencia:	21.2 MVA
Voltaje:	13.8 kV
Factor de potencia	0.8
Aislamiento :	Clase F.
Velocidad :	450 r.p.m.
Frecuencia :	60 Hz
Año :	2012

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho.

Unidad 3,4 y5

Datos generador:	Andritz
Serie:	1660627
Potencia:	42.2 MVA
Voltaje:	13.8 kV
Factor de potencia	0.8
Aislamiento :	Clase F.
Velocidad :	450 r.p.m.
Frecuencia :	60 Hz
Año :	2012

Fuente: Fabricante por medio del Centro de Documentación de Río Macho.