

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Análisis de la eficiencia energética de la turbina de generación GE-
LM2500 en el Bloque 16 de Repsol**

Juan Fernando Vera Molina

Jesús Portilla, Ph.D, Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, Marzo 2014

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Análisis de eficiencia energética de la turbina de generación GE-
LM2500 en el Bloque 16 de Repsol.**

Juan Fernando Vera Molina

Jesús Portilla, Ph.D.
Director de Tesis

.....

Luis Narváez, Ingeniero
Miembro del Comité de Tesis

.....

Edgar Delgado, Ingeniero
Miembro del Comité de Tesis

.....

Alfredo Valarezo, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D
Decano de la Escuela de Ingeniería

.....

Quito, Marzo 2014

©DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Juan Fernando Vera Molina

C.I.: 1717555526

Fecha: Marzo 2014

DEDICATORIA

Quisiera dedicar el presente trabajo a mi familia que me ha ayudado en todo lo posible para poder culminar con mis estudios. Sobre todo a mi madre, padre y tía por siempre apoyarme en cualquier momento que los necesite, a mi hermana que siempre fue un ejemplo a seguir. Finalmente quiero dedicar este trabajo a mi abuelo que sin él nunca hubiese empezado esta carrera, muchas gracias por tus bendiciones.

Juan Fernando.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa REPSOL por toda su colaboración en el desarrollo de esta tesis en especial al Ing. Edgar Delgado por recibirnos siempre con los brazos abiertos. A la empresa E-INPSA, en especial a Andrés Carrasco, Luis Narváez y Vicente Granda por la ayuda en la guía y experiencia que pudieron aportar en este proyecto. A mi director de tesis por guiarme en el transcurso de este camino y su paciencia para lograr este trabajo. A mi amiga Clara Orellana por estar siempre trabajando en este trabajo y siempre dispuesta. Agradezco también a mis amigos que me han ayudado a seguir adelante y hacer de esta experiencia algo inolvidable. A mi familia solamente tengo que decir que sin ustedes esto no hubiese sido posible.

Juan Fernando.

RESUMEN

La generación eléctrica es un eje fundamental en cualquier tipo de industria pero es de especial importancia en un campo petrolero dadas las condiciones de operación. Como un objetivo de la norma ISO 50001, Repsol busca mejorar sus sistemas de generación eléctrica a través del aumento de la eficiencia energética de sus procesos. Para mejorar cualquier proceso energético industrial se debe prestar atención a cada uno de los siguientes aspectos: generación eléctrica, consumo de energía y transmisión de energía. Este estudio se enfoca en la generación eléctrica. El alcance de esta tesis es en un subsistema de generación de energía que es la turbina de diesel de 25 MW de la facilidad de producción NPF en el Bloque16 de Repsol. Se busca determinar la eficiencia energética de este sistema para que se pueda introducir dentro del modelo de manejo de energía contemplado en el plan de aplicación de la norma ISO 50001. Además se puede determinar de los criterios anteriormente mencionados cual es el diagnóstico para el proceso de generación eléctrica. Por lo tanto se efectúa un análisis termodinámico del sistema de turbinas, este análisis se efectúa en varias etapas. Primeramente con el fin de obtener un diagnóstico confiable se realiza un análisis estadístico de los datos y un control de datos del registro. La segunda etapa consiste en crear una metodología de cálculo para el ciclo termodinámico basándose en un ciclo de Brayton para ciclos de potencia. Finalmente se hace un análisis de correlación entre las variables medidas puntuales y la eficiencia calculada en base al ciclo termodinámico. En base a los resultados obtenidos se plantean recomendaciones sobre las condiciones de operación ideales de la turbina y el control que se debería prestar al equipo para un futuro monitoreo continuo de la eficiencia energética.

ABSTRACT

Power generation is a key process in any type of industry. The oil industry is especially critical in terms of power generation due to its extreme conditions. The ISO 50001 standard looks for the development of an energy efficient industry, therefore Repsol is constantly searching for improvements in the efficiency of their facilities. In order to get to an energy efficient model, it is recommended to start with the study of the following: power generation, energy consumers and electric distribution. This study is limited to power generation. Therefore the focus of the present thesis is set on the diesel turbine of power generation in the NPF (North Production Facility) in the block 16 of Repsol. The goal is to determine the energy efficiency of this system, keeping in mind that the power generation is just a piece of the energy system of the oil production industry, thus it is necessary to introduce a model of energy management. The following model is a part of the scope of the ISO 50001 standard. Additionally we can obtain a diagnosis of the turbine system. The mentioned procedure is done in several steps. First of all, in order to get a reliable set of data, the collection of data is analyzed using statistical tools. The second step is to develop the methodology and calculation required to compute the Brayton cycle for a gas turbine using thermodynamic theory. The third and final step is an correlation analysis between the measured values of several critical points of the cycle and the computed efficiency based on the method. These results will help to give a general recommendation of the operational conditions that are more likely to have a high efficiency. Finally a discussion about a recommended control procedure for the turbine system is made.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
LISTADO DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABLAS	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Introducción	15
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo general.....	16
1.2.2. Objetivos específicos.....	16
1.3. Metodología	16
1.4. Justificación	18
2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE TURBINAS	20
2.1. Componentes mecánicos del sistema de generación eléctrica	20
2.1.1. Sistema de generación eléctrica.....	20
2.1.2. Turbina.....	20
2.1.3. Compresor.....	21
2.1.4. Generador	22
2.2. Ciclo de potencia de gas.....	22
2.3. Variables termodinámicas.....	23
2.3.1. Entalpía.....	23
2.3.2. Entropía	23
2.3.3. Eficiencia de la primera ley de la termodinámica	24
2.3.4. Eficiencia de la segunda ley de la termodinámica	24
2.4. Instrumentación y Control Estadístico	25
2.4.1. Medición de variables termodinámicas	25
2.4.2. Introducción de control de calidad de los datos	25
2.5. Revisión de la Literatura	26
3. SISTEMA DE GENERACIÓN DE REPSOL	28
3.1. Descripción de generación eléctrica en el Bloque 16	28
3.1.1. Sistemas de Generación	28
3.1.2. Equipos de Consumo	29
3.1.3. Distribución de la red eléctrica.....	30
3.2. Sistema de Generación en Turbinas.....	31
3.2.1. Presentación del Equipo.....	31
3.2.2. Descripción de Componentes de Turbinas LM2500.....	31
3.2.3. Control e Instrumentación de las Turbinas	38

4.	ANÁLISIS DE DATOS	42
4.1.	Presentación de variables	42
4.2.	Control de calidad de datos	43
4.3.	Presentación de variables.	47
4.3.1.	Resumen estadístico de Base de datos	57
5.	MODELO DE ANÁLISIS DEL CICLO TERMODINÁMICO	60
5.1.	Ciclo teórico Brayton.....	60
5.2.	Aproximaciones entre los procesos reales y el Ciclo Brayton.....	62
5.3.	Descripción del ciclo de la Turbina LM2500.....	64
5.4.	Modelización del ciclo real.....	66
5.5.	Metodología de cálculo del ciclo real.....	69
5.5.1.	Modelo del Compresor	69
5.5.2.	Modelo de la Cámara de Combustión.....	70
5.5.3.	Modelo de la Turbina:	72
5.6.	Evaluación de la sensibilidad del cálculo.....	73
5.7.	Resultados de Trabajo de Turbina y Compresor	75
5.8.	Evaluación de la eficiencia por la primera ley.....	78
5.9.	Análisis de la eficiencia según variables medidas de la Turbina	81
5.9.1.	Relación entre eficiencia y entalpía 2 del punto 2.	81
5.9.2.	Relación entre eficiencia y entalpía D del punto D.	83
5.9.3.	Relación entre eficiencia y entalpía del punto 1.....	84
5.9.4.	Relación entre eficiencia y velocidad de la Turbina.	86
5.9.5.	Definición del máximo de la regresión cuadrática.....	88
5.9.6.	Relación entre eficiencia y la hora del día.....	89
5.10.	Condiciones operativas de Turbina A y Turbina B.....	99
5.11.	Discusiones.....	102
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
6.1.	Conclusiones.....	104
6.2.	Recomendaciones	106
	REFERENCIAS	109
	ANEXOS.....	111
	Anexo A: Reporte de SGS Oil, Water&Chemicals acerca del diesel producido en Repsol....	111
	Anexo B: Listado de las variables registradas de las turbinas.....	112
	Anexo C. Datasheet de Turbina LM2500 General Electric.	114

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Representación de una turbina entre los puntos 3 y 4 donde $P3 > P4$	21
Figura 2. Representación de un compresor entre el punto 1 y el punto 2 donde $P2 > P1$	21
Figura 3. Esquema del sistema de turbina.	32
Figura 4. Esquema de los componentes del compresor (General Electric-Manual de Operaciones Turbina LM2500).	33
Figura 5. Esquema de cámara de combustión de la turbina (General Electric-Manual de Operaciones Turbina LM2500).	34
Figura 6. Esquema de la turbina de baja presión ((General Electric-Manual de Operaciones Turbina LM2500).	35
Figura 7. Fotografía del conjunto de compresión de la Turbina B.	36
Figura 8. Fotografía del conjunto de turbina de la Turbina B.	36
Figura 9. . Fotografía del conjunto de cámara de combustión de la Turbina B.	37
Figura 10. Pantalla del panel de control de Turbina B.	39
Figura 11. Pantalla del sistema de control de combustible.	40
Figura 12. Pantalla del sistema de control de la Turbina B.	41
Figura 13. Ejemplo de las tendencias anormales en las variables de medición.	45
Figura 14. Ejemplo de tendencia irregular en una variable de medición.	46
Figura 15. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Presión de Descarga del Compresor para Turbina A y Turbina B	48
Figura 16. Serie de tiempo de Presión de Descarga del Compresor para Turbina A y Turbina B.	48
Figura 17. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Flujo de Combustible para Turbina	49
Figura 18. Serie de tiempo de Flujo de Combustible para Turbina A y Turbina B.	49
Figura 19. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Potencia Activa del Generador para Turbina A y Turbina B.	50
Figura 20. Serie de Tiempo de Potencia Activa del Generador para Turbina A.	51
Figura 21. Histograma y Serie de Tiempo de Velocidad de Turbina A y Turbina B.	52
Figura 22. Serie de tiempo de Velocidad de Turbina A y Turbina B.	52
Figura 23. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura de combustible de Turbina A y Turbina B.	53
Figura 24. Serie de tiempo de Temperatura de combustible para Turbina A y Turbina B.	53
Figura 25. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura de ingreso al compresor para Turbina A y Turbina B.	54
Figura 26. Serie de Tiempo de Temperatura de ingreso al compresor para Turbina A y Turbina B.	55

Figura 27. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura promedio de termocuplas de Turbina A y Turbina B.	55
Figura 28. Serie de Tiempo de Temperatura promedio de termocuplas de Turbina A y Turbina B.	56
Figura 29. Diagramas T-s y P-v de un ciclo Brayton ideal	61
Figura 30. Diagrama del trabajo isentrópico de un compresor y el trabajo real.....	62
Figura 31. Diagrama h-s para los procesos real e isentrópico de una turbina adiabática.	63
Figura 32. Diagrama T-s del ciclo completo de la Turbina: ciclo real y ciclo isentrópico.	64
Figura 33. Diagrama de la turbina con variables de estado en rojo de acuerdo al ciclo nominal y con variables medidas disponibles en azul.	65
Figura 34. Ciclo nominal e isentrópico de Turbinas con variables medidas en los puntos del ciclo.	66
Figura 35. Diagrama del compresor y valores termodinámicos correspondientes.....	70
Figura 36. Diagrama de la cámara de combustión de la turbina.	71
Figura 37. Diagrama de la turbina de baja presión (LPT) y alta presión (HPT) en serie.	73
Figura 38. Potencia Turbina vs. Potencias del Compresor Turbina "A".....	75
Figura 39. Potencia Turbina vs. Potencia del Compresor Turbina "B".	76
Figura 40. Serie de tiempo de trabajo total de Turbina y trabajo del Compresor, Turbina "A".....	77
Figura 41. Serie de tiempo de trabajo total de Turbina y trabajo del Compresor, Turbina "B".....	78
Figura 42. Serie de tiempo de la eficiencia global de la Turbina "A".....	80
Figura 43. Serie de tiempo de la eficiencia global de la Turbina "B".	80
Figura 44. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 2 de la Turbina "A".	82
Figura 45. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 2 de la Turbina "B".	82
Figura 46. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto D de la Turbina "A".	83
Figura 47. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto D de la Turbina "B".	84
Figura 48. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 1 de la Turbina "A".	85
Figura 49. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 1 de la Turbina "B".	85
Figura 50. Curva de eficiencia en función de la velocidad de la Turbina "A".....	86
Figura 51. Curva de eficiencia en función de la velocidad de la Turbina "B".....	87
Figura 52. Serie de tiempo de media móvil de la temperatura ambiente en función de la hora del día.	90

Figura 53. Eficiencia Global del sistema vs Temperatura ambiente para 2 pm y 2 am , Turbina “A”.....	91
Figura 54. Eficiencia global del sistema vs Temperatura ambiente par 10 pm y 10 am, Turbina “A”.....	92
Figura 55. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y el trabajo del compresor, Turbina “A”.....	93
Figura 56. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y del trabajo del compresor, Turbina “A”.....	94
Figura 57. Eficiencia global del sistema en función de la hora del día y de la temperatura del punto D, Turbina “A”.....	95
Figura 58. Eficiencia global del sistema en función de la hora del día y de la temperatura del punto D, Turbina “A”.....	96
Figura 59. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y la velocidad de la Turbina, Turbina “A”.....	97
Figura 60. Serie de tiempo de media móvil de Potencia activa del generador en función de la hora del día para la Turbina “A”.....	98
Figura 61. Potencia activa de la Turbina A en función de la temperatura ambiente para diferentes horas del día.....	99
Figura 62. Gráfico de distribución de valores para la Turbina B.....	100
Figura 63. Serie de tiempo de la eficiencia global de la Turbina “A” y Turbina “B”..	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen equipos de generación del bloque 16.....	30
Tabla 2. Resumen equipos de consumo del bloque 16.....	30
Tabla 3. Número de cifras significativas de variables.....	43
Tabla 4. Definición del intervalo de tiempo.....	46
Tabla 5. Conversión de unidades.....	47
Tabla 6. Resumen estadístico de variables para Turbina A.....	57
Tabla 7. Resumen estadístico de variables para Turbina B.....	58
Tabla 8. Comparación de los valores reales y valores nominales.....	58
Tabla 9. Valores termodinámicos del Ciclo nominal.....	64
Tabla 10. Definición de las variables termodinámicas para el modelo del ciclo.....	69
Tabla 11. Análisis de sensibilidad de suposición de valor nominal.....	74
Tabla 12. Resumen de las regresiones efectuadas sobre la eficiencia en la Turbina A..	87
Tabla 13. Resumen de las regresiones efectuadas sobre la eficiencia en la Turbina B..	88
Tabla 14. Punto máximo para las regresiones cuadráticas de Turbina A y B.....	89
Tabla 15. Rango de eficiencias globales y su probabilidad de ocurrencia.....	101

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad, debido a los efectos medio-ambientales y la excesiva presión sobre los recursos energéticos no renovables, el uso de metodologías para la cuantificación y evaluación del uso eficiente de estos recursos se vuelve cada vez más imperativo (García, 2013). Dentro de este contexto, la industria petrolera constituye un campo de aplicación muy interesante, ya que sus necesidades energéticas son en general de gran escala. Además, esta industria, por sus características de operación, está en la obligación de auto satisfacer sus necesidades energéticas, tanto en términos de electricidad, como de calor de proceso, capacidad de bombeo, compresión, etc (Milancej, 2005). En este contexto general, el Ecuador no es una excepción. Su industria, y en particular la industria petrolera, se enfrentan al reto de cumplir con estándares cada vez más exigentes (Repsol, 2013).

En el contexto mundial, con la firma de protocolos de reducción de la huella de carbono como el protocolo de Kyoto, del cual Ecuador ha ratificado su adhesión en Cancún, México en el 2010, se quiere reducir las emisiones e impacto ambiental de la industria (Ministerio de Energía Renovable, 2013). En el caso de la industria petrolera, también se incluye dentro del proceso de mejorar la producción para que sea más limpia y eficiente. Repsol busca aplicar la norma ISO 50001 (Repsol, 2011) que determina ciertos principios generales a seguir pero no dicta un procedimiento específico para aplicar en la industria petrolera (Integrated Renewable Energy, 2012). Esta norma está siendo impulsada por el ministerio del Ambiente para la industria nacional (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013).

Este proyecto de Tesis es complementario a la aplicación de la norma ISO 50001, la norma involucra el manejo eficiente de energía para Repsol como parte de un

plan global que busca reducir sus emisiones. Dentro del proyecto de Repsol, se contempla una evaluación técnica de cada uno de los procesos para determinar su eficiencia energética (Repsol, 2013). Además, la empresa E-INPSA trabaja como consultora de Repsol en un proyecto afín en cuyo contexto se hizo parte del trabajo. El proyecto de tesis consiste en generar un estudio técnico de un proceso del campo petrolero pero desde un punto de vista de componentes mecánicos y eléctricos. El estudio técnico se concentra en la evaluación termodinámica de las turbinas de generación del campo NPF de Repsol en el bloque 16. Basándose en un modelo simplificado de la turbina se pudo calcular la eficiencia de la turbina de acuerdo al registro operacional. El método consiste en aproximar el ciclo real de la Turbina haciendo suposiciones de las variables termodinámicas que se requieran.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaborar una evaluación termodinámica de turbinas de generación eléctrica de la industria petrolera, específicamente en Repsol.

1.2.2. Objetivos específicos

- Aplicar los conceptos de la primera ley de la Termodinámica para determinar la eficiencia de conversión energética de turbinas de generación eléctrica.
- Realizar un método de cálculo del ciclo termodinámico de turbinas de generación.
- Elaborar recomendaciones operativas de las turbinas para obtener la mejor eficiencia de acuerdo al modelo generado.

1.3. Metodología

El sistema de generación de energía que se va a analizar es la turbina de generación del campo NPF del bloque 16, este sistema consiste en dos turbinas alimentadas con diesel. Las turbinas representan un 30% de la generación del bloque por lo tanto es un equipo vital para el funcionamiento del campo (Einpsa, 2013). Además este tipo de equipo tiene mucha información operacional disponible por lo que se puede obtener información medible en diferentes etapas de la turbina. Específicamente, en el sistema termodinámico de la turbina, se analizan las variables del flujo siguientes: el flujo másico m , la temperatura T , la presión P y la densidad ρ . Además de estas variables se añade la corriente I y el voltaje V de un sistema eléctrico ya que el propósito de la turbina es la generación de energía eléctrica. En el caso del generador se tienen datos adicionales de potencia eléctrica y para la turbina se mide las revoluciones por minuto (rpm) y el consumo de combustible. Las mediciones de las turbinas corresponden a condiciones de operación reales por lo cual se debe realizar un control de calidad de datos previo al desarrollo del modelo del ciclo de la turbina.

El modelo que se desarrollará en esta tesis quiere partir de principios básicos de manejo energético para aplicarlo a las instalaciones de un campo petrolero. Basado en la teoría de termodinámica se pretende evaluar el uso de los recursos energéticos como lo son turbinas de generación. A partir de las variables disponibles en el campo, presión, temperatura, caudal, velocidad de flujo y características de los equipos se aplican modelos teóricos que aproximan el ciclo termodinámico de gas real de la turbina. El punto de partida es el ciclo de turbina de potencia a gas que es el ciclo termodinámico de Brayton (Çengel et al., 2009).

Dentro del contexto de la eficiencia de turbinas, se prestará atención a las propiedades termodinámicas de entropía y entalpía. En un principio se utiliza la entropía para generar el ciclo nominal de la turbina que se compara con el ciclo teórico Brayton.

Para calcular la eficiencia del sistema de generación se calcula los trabajos de los componentes mecánicos con las entalpías de entrada y salida de los componentes (Çengel et al., 2009).

El método de aproximación desarrollado utiliza suposiciones sobre el ciclo real para obtener los puntos de evaluación del ciclo termodinámico a partir de las variables termodinámicas del ciclo nominal de la turbina proporcionado por el fabricante. Este reemplazo se da cuando la utilización de un valor nominal no afecta de manera significativa el resultado, para validar esta suposición se genera un análisis sobre la influencia de las suposiciones en el cálculo (Wagner, 2003). La metodología pretende generar una aproximación buena del ciclo real que sea suficientemente simple para utilizar el modelo en un registro de operación. Por lo tanto su aplicación es sencilla y se puede obtener un cálculo de los trabajos de los componentes. Sin embargo si se quiere tener una aproximación más fiel a la realidad se requiere analizar detenidamente las etapas del ciclo termodinámico con mediciones puntuales.

1.4. Justificación

Dada la presión nacional e internacional por alcanzar una industria más limpia y eficiente, la industria petrolera tiene la necesidad de mejorar los procesos de explotación y hacerlos más eficientes (Noroña, Mayo 2012). El estudio de esta tesis se enfoca en proponer un análisis termodinámico de los componentes de generación de una turbina a diesel usada en un campo petrolero para estudiar su eficiencia energética y que permita tener un modelo de referencia.

Afortunadamente, existen en la actualidad metodologías que permiten hacer una evaluación objetiva del uso eficiente de la energía, basadas generalmente en conceptos termodinámicos. Por un lado están, los métodos tradicionales de balance energético

basados en la primera ley de la termodinámica (Çengel et al., 2009). Estos permiten hacer la contabilidad energética de los procesos y dan cuenta general de la eficiencia de conversión. Sin embargo, el método que se aplica generalmente en los cálculos termodinámicos de una turbina asume que se conocen todos los estados del flujo de aire de la turbina, en la práctica no se conoce todos los estados del flujo por lo tanto en la metodología desarrollada se realizan varias suposiciones sobre el cálculo del ciclo termodinámico que permiten finalmente encontrar la eficiencia global del sistema y las relaciones entre los trabajos de los componentes y la eficiencia del sistema. A partir de estas relaciones podemos sacar un diagnóstico y encontrar los puntos de mayor eficiencia del sistema.