

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En el presente estudio se hace un balance energético de dos turbinas de generación de energía eléctrica de 25 MW c/u, de la empresa REPSOL, las turbinas se encuentran instaladas en el bloque 16 y sirven a la provisión de electricidad de las facilidades de extracción de crudo. El sistema de generación completo del bloque consta de 3 turbinas, 21 motores a gas y 7 motores a crudo. El enfoque del presente estudio es el de realizar un análisis de eficiencia energética en el contexto de la norma 50001 que busca establecer una línea base para la eficiencia energética de un sistema y presentar un desarrollo hacia el incremento de esta eficiencia.

En el análisis previo de los datos, se han encontrado valores atípicos que pueden obedecer a picos de carga máxima, valores de parada o a un estado transitorio de la turbina por mantenimiento (Sección 4.2). Para asegurar la calidad y confiabilidad de datos, se eliminaron los valores extremos, atípicos de las series de datos. En general, la tendencia para los estados de las variables termodinámicas debería ser uniforme, sin embargo en el caso que una variable no presenta la tendencia general, se requiere primeramente revisar la toma de datos y el instrumento de medición antes de generar un estudio más detallado que determine cuál fue la causa del cambio de equilibrio del sistema.

Para tener una certeza de la confiabilidad de los cálculos realizados se efectuó una evaluación de la sensibilidad del cálculo (Sección 5.6), de lo cual se concluye que existen algunos parámetros que influyen en menor o mayor grado obteniéndose valores desde 5.6% a 15.66%. Por ejemplo como se analizó para el punto de referencia 2.

En la práctica se observa que es difícil obtener valores medidos para todos los estados deseados en el ciclo (Sección 5.4). Para la aplicación del ciclo teórico (Brayton), se deben hacer aproximaciones y simplificaciones del ciclo, el número de suposiciones debe mantenerse al mínimo para que el cálculo sea lo más fiel a la realidad. En este contexto, otra conclusión relevante es la gran importancia que tiene la variable de presión de descarga del compresor ya que de ésta dependen los siguientes valores calculados en el ciclo.

Dadas las variaciones de demanda de potencia a las turbinas, la eficiencia tiene un comportamiento variable. La eficiencia de mayor probabilidad de ocurrencia es de 31% (Sección 5.10), y se sitúa en una condición de operación que se encuentra dentro de un rango determinado por las curvas de la eficiencia en función de las variables del sistema y específicamente para valores aproximados de potencia de 14 MW (Sección 5.11). Cabe mencionar que si se llega a operar cerca de las condiciones del ciclo nominal (Tabla 9) se obtendrá una operación ideal desde un punto de vista de eficiencia energética, cuyo valor nominal es de 37%.

La información obtenida de la Eficiencia Global en función de la Potencia Activa del Generador (Figura 62), puede utilizarse para obtener un valor de eficiencia energética, dada una condición de carga para la turbina. Se recuerda que para la aplicación de la norma 50001, se requiere la eficiencia energética de los equipos. De esta manera, con un mínimo ingreso de condiciones de operación de la turbina que en este caso es la Potencia Activa del generador, se puede tener un estado de Eficiencia Energética aproximado. Es decir, dadas condiciones normales de operación se puede tener una herramienta bastante rápida para obtener la eficiencia energética del sistema sin tener que entrar en cálculos detallados (Sección 5.10). Constituyendo una

herramienta sencilla para establecer una línea base y monitorear como varía con el tiempo.

6.2.Recomendaciones

En cuanto al control de la operación del equipo, las variables monitoreadas del sistema no necesariamente corresponden con las variables críticas para el modelo del ciclo. Actualmente en el registro de datos se tiene una prioridad operacional pero se puede ampliar el uso de este registro para otros fines como es el cálculo de la eficiencia por lo que se sugiere tomar datos incorporando el criterio de su uso posterior no solo para su operación y mantenimiento sino también para el trabajo general de continuar monitoreando la eficiencia con el propósito de su mejora en el futuro. También se considera importante, con el fin de asegurar una medida confiable y de calidad, que se debería hacer un seguimiento para comparar el valor medido por el instrumento de la sala de control por un valor medido en los indicadores de campo.

Además se recomienda comparar periódicamente los valores de las variables entre las dos turbinas para tener un valor de referencia. Esta práctica ayudaría a garantizar la calidad de los datos. De especial atención es también la repetición de datos. En particular, el flujo de combustible tuvo muchos valores repetidos en la serie de datos. Esto se podría ratificar o mejorar, revisando el método de medición y los instrumentos de esta variable.

Como se vio en la sección 4, el número de cifras significativas de una variable influye directamente en la precisión del cálculo del ciclo. Puntualmente, los registros con dos cifras significativas fueron la temperatura ambiente y el flujo de combustible. Para elevar la precisión de la medición de la temperatura ambiente basta instalar un termómetro más preciso. Sin embargo cambiar el medidor de flujo de combustible es

más complejo pero el impacto en la precisión del cálculo sería mayor ya que el flujo de combustible se utiliza para calcular la potencia de todos los componentes de la turbina.

El cálculo de la eficiencia y el control de las turbinas en general puede mejorarse si se aumenta los instrumentos de medición. Si se dispone de mayor información acerca del ciclo de la turbina se puede llegar a un resultado más cercano a la realidad. A su vez si se conocen todos los valores del ciclo por medición se puede evitar las suposiciones que se hizo en el cálculo (Tabla 10). Si se puede utilizar equipos portátiles o temporales o de fácil instalación para la medición de variables adicionales se puede mejorar el método de cálculo. Estos equipos deben responder a los criterios mínimos de precisión que se mencionó respecto las cifras significativas. En la tabla mencionada se muestran los valores medidos y los valores que fueron aproximados, si se implementan mediciones adicionales en la turbina deben realizarse en los puntos en donde no se tiene medidas (Puntos A, B, C, 3, D).

Específicamente los instrumentos de medición que se aumentarían en el ciclo buscan eliminar el punto ciego que se tiene en el punto 3 del ciclo. Este punto se encuentra en la salida de la cámara de combustión. Se sugiere instalar una termocupla que soporte temperaturas de más de 1234°C (valor nominal) y un medidor de presión que opere a esta temperatura para medir presiones de 1717 kPa (valor nominal). Además se podría incluir un medidor de flujo de aire en la entrada a la turbina en m^3/s . Así se puede obtener la relación de flujo de combustible y flujo de aire real. Finalmente, se puede incluir una termocupla en la salida del compresor que corresponde al punto 2 que debe medir temperaturas de 430°C (valor nominal). Los instrumentos de medición que se instalen en el equipo deben responder a un criterio mínimo de precisión de 3 cifras significativas.

La eficiencia que se calculó para la turbina se compara con su modelo ideal que es el ciclo nominal, sin embargo las condiciones de operación están por debajo del valor nominal. Para repotenciar la turbina, en las condiciones actuales, el objetivo debe consistir en aproximar los valores del ciclo normal de operación a los valores del ciclo nominal; esto implica establecer una política y método para acercar las condiciones de operación a los valores nominales que son principalmente un valor de carga de 100% (25 MW) y una temperatura ambiente de 15 °C. La primera condición es alcanzable mientras que la segunda condición es prácticamente imposible dadas las condiciones climatológicas del bloque.

Con el fin de hacer un análisis energético más completo, se debe incluir el seguimiento del intercambiador de calor al registro de turbinas ya que si se incluye el recalentamiento del aceite térmico se incluye la energía que se recupera del escape de la turbina. La norma ISO 50001 no pone los límites del sistema de análisis al sistema por lo cual si se considera el proceso de recalentamiento del aceite térmico se puede tener una mejor eficiencia energética del equipo.

Se recomienda realizar un análisis estadístico de diseño de experimentos para analizar la relación que existe entre las variables de la turbina. Con esto se puede analizar aún más a profundidad los diferentes estados del sistema y realizar cambios más acertados para su mejor desempeño.

REFERENCIAS

- Badeer, G. H. (n.d.). *GE Aeroderivative Gas Turbines - Design and Operating Features*. GE Power Systems, GE IAD. Evendale, OH: GE Power Systems.
- Badeer, G. H. (n.d.). *GE's LM 2500+G4 Aeroderivative Gas Turbine for Marine and Industrial Applications*. GE Energy.
- Çengel, Y., Boles, & Michael. (2009). *Termodinámica*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Chang, R. (2010). *Química* (10ma. ed.). McGraw Hill.
- Dixon, S., & Hall, C. (2010). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery* (6th Edition ed.). United States of America: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- García, A. (n.d.). *Overhaul en la turbina LM2500*. Retrieved Agosto 28, 2013, from Renovetec: <http://www.renovetec.com/overhaul-lm2500.html>
- GE Energy. (n.d.). *Heavy duty gas turbine products*. GE.
- GE Industrial AeroDerivative Gas Turbines. (n.d.). *Operation and Maintenance Manual for GE LM 2500 G Series Gas Generators and LM 2500 P Series Gas Turbines*. Cincinnati: General Electric.
- Generación, D. (2010-2011-2012-2013). *Revisión Registro Diario de Operación turbina LM2500NPF*. Repsol. SGI Repsol.
- Graebel, W. P. (2007). *Advanced Fluid Mechanics*. Elsevier.
- Hambley, A. (2011). *Electrical Engineering: principles and applications* (5th ed.). Pearson Education.
- Integrated Renewable Energy. (n.d.). *IntegratedRenewableEnergy.com*. Retrieved 11 2012, from Integrated Renewable Energy: <http://www.IntegratedRenewableEnergy.com>
- Korpela, S. (2011). *Principles of Turbomachinery*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Milancej, M. (2005). *Advanced Gas Turbine Cycles: Thermodynamic Study on the Concept of Intercooled Compression Process*. Vienna: Vienna University of Technology, Technical University of Lodz.
- Miller, J. (2009, Agosto 14). IdealAir. Código para el cálculo de valores termodinámicos. MathWorks.com.
- Montgomery, D. (2005). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (2da ed.). México DF, México: Wiley.
- Moran, M., Shapiro, H., Boettner, D., & Bailey, M. (December 2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (7ma edición ed.). Wiley.
- Morgan, M., & Shapiro, H. (2005). *Fundamentos de termodinámica técnica* (Cuarta ed.). Barcelona, España: Reverté.
- Noroña, C. (Mayo 2012). *Estudio de factibilidad para la recuperación de calor residual de turbinas a diesel en la generación de energía eléctrica en la empresa repsol*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Rangwala, A. S. (2005). *Turbo-machinery dynamics Design and Operation*. United States of America: McGraw-Hill.

- Renovable, M. d. (n.d.). *Plan de Normalización y Etiquetado*. Retrieved Septiembre 30, 2013, from <http://www.energia.gob.ec/plan-de-normalizacion-y-etiquetado/>
- Repsol. (2011, Septiembre 13). *Noticia de prensa: La Refinería de Repsol A Coruña es la primera del mundo en obtener la ISO 50001 de Gestión Energética*. Retrieved Septiembre 2013, 2013, from http://www.repsol.com/pe_es/corporacion/prensa/notas-de-prensa/ultimas-notas/13092011-refineria-a-coruna-gestion-energetica.aspx
- Repsol. (2013, Marzo 25). *Visita al Campo. NPF-Bloque 16, Orellana, Ecuador*.
- Soares, C. (2008). *Gas Turbines: A Handbook of Air, Land and Sea Applications*. Butterworth-Heinemann.
- Tsoutsanis, E. (2010). *Performance Adaptation of Gas Turbines for Power Generation Applications*. Cranfield, United Kingdom: Cranfield University.
- Wagner, J. R. (2003). *An Advanced Diagnostic and Prognostic System for Gas Turbine Generator Sets with Experimental Validation*. SCIES Clemson University.

ANEXOS

Anexo A: Reporte de SGS Oil, Water&Chemicals acerca del diesel producido en**Repsol.**

| | | | |
|--|--|--|---|
| <i>SGS Oil, Gas and Chemicals SGS del Ecuador S.A. Lago Agrio Via a Quito Km2.5 Barrio Pablo Alverca</i> | <i>Cliente: Repsol Ecuador S.A. Av. Republica del Salvador y NN UU</i> | <i>Reporte No: OGC-R-UIO-00230698- 0006 Fecha: 16 de agosto del 2012</i> | <i>Descripción del producto : Diesel</i> |
| ENSAYO | MÉTODO | RESULTADO | UNIDADES |
| Agua y Sedimentos | Cálculo | 0.081 | % (v/v) |
| Densidad Relativa (SG) a 60/60° F | ASTM D1298 | 0.8403 | ----- |
| Punto de Inflamación PMCC- Procedimiento A | ASTM D93 | 55.0 | °C |
| Viscosidad Cinmática a 40°C | ASTM D445 | 2.2 | cSt |
| Punto Final | ASTM D86 | 355 | °C |
| Poder Calórico Superior | ASTM D240 | 19425 | BTU/lb |
| Poder Calórico Inferior | ASTM D240 | 18286 | BTU/lb |

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: SGS Oil, Water&Chemicals, 2012

Anexo B: Listado de las variables registradas de las turbinas.

- Presión de succión bombas Booster
- Presión de combustible en manifold
- Presión de suministro de aceite Turbina
- Presión de aceite Scavenge
- Presión de aceite de generador eléctrico
- Presión de Descarga Compresor de aire
- Temperatura de aceite Caja de engranajes
- Temperatura sumidero A
- Temperatura sumidero B
- Temperatura sumidero C
- Temperatura sumidero D
- Temperatura de suministro de aceite
- Temperatura de suministro de combustible
- Temperatura en cabina
- Temperatura de salida de aire de cabina
- Temperatura aceite generador eléctrico
- Temperatura cojinete generador lado accionado
- Temperatura drenaje aceite cojinete generador lado accionado
- Temperatura cojinetes generador lado excitatriz
- Temperatura drenaje aceite cojinete generador lado excitatriz
- Temperatura bobinado estator generador fase A
- Temperatura bobinado estator generador fase B
- Temperatura bobinado estator generador fase C

- Temperatura bobinado estator generador fase A1
- Temperatura bobinado estator generador fase B1
- Temperatura bobinado estator generador fase C1
- Temperatura compartimiento generador
- Velocidad Generador de Gas
- Velocidad de Turbina de Potencia
- Temperatura promedio Turbina
- Temperatura de aire entrada al compresor
- Flujo de suministro de combustible
- Apertura de Válvula de Combustible
- Termocuplas de 01 a 11
- Vibración de Turbina
- Vibración de Generador
- Corriente de Excitación del Generador
- Voltaje de Excitación del Generador
- Amperaje del Generador
- Potencia activa del Generador
- Voltaje del Generador
- Frecuencia
- Potencia reactiva del Generador
- Factor de Potencia

Anexo C. Datasheet de Turbina LM2500 General Electric.

<https://www.dropbox.com/s/rs11as753axkxss/datasheet%20Turbina.pdf>