

4. ANALISIS DE DATOS

4.1. Presentación de variables

El registro de datos de operación de Repsol es el punto de partida para la generación de la base de datos para el posterior cálculo del ciclo termodinámico. El registro de datos tiene un formato original en Excel que se divide por año, mes, día y hora para cada una de las variables. Cada variable se presenta de la siguiente manera: 6 datos diarios cada cuatro horas comenzando a las 2:00 am desde el 2010 al 2013. El registro consta de los datos para las Turbinas A y B.

En el registro diario de operación se toman muchas variables relacionadas con los componentes de la turbina. Sin embargo, no todas las variables son relevantes para el presente estudio. Para efecto de documentación, el listado completo de las variables se encuentra en Anexo B. Las variables pertinentes para el presente estudio son:

- 1) Presión de Descarga del Compresor
- 2) Flujo de Combustible
- 3) Potencia Activa del Generador
- 4) Velocidad de la Turbina
- 5) Temperatura del Combustible
- 6) Temperatura de Ingreso del Compresor
- 7) Temperatura promedio de salida de Turbina de alta presión

En el Registro Diario de Operación turbina LM2500NPF, se toman los valores con las siguientes cifras significativas definidas en la Tabla 3 :

Tabla 3. Número de cifras significativas de variables.

Variable registrada	Unidades	Número de cifras significativas
Presión de Descarga Compresor	Pa	3
Velocidad de Compresor	rpm	4
Temperatura promedio Turbina	°C	4
Temperatura entrada al Compresor	°C	2
Flujo de suministro de combustible	m ³ /s	2-3
Potencia activa del Generador	MW	4-3
Temperatura de suministro de combustible	°C	2

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Las cifras significativas permiten tener un indicador de la precisión de la variable y están dadas por la precisión del instrumento (Tsoutsanis, 2010). El número de cifras significativas del resultado de un cálculo es igual al menor número de cifras significativas de las variables usadas en la ecuación.

4.2. Control de calidad de datos

Los datos registrados presentan errores sistemáticos que se pueden resolver con un control de calidad definido por los siguientes criterios:

- 1) Eliminación de valores nulos.

Originalmente en el registro de datos existen muchos valores igual a cero o incluso negativos que probablemente corresponden a una para del equipo por mantenimiento, por alguna emergencia o una falla del medidor de la variable. El proceso de eliminación de los valores menores o iguales a cero se aplica para todo el registro.

2) Valores atípicos

El segundo paso es eliminar los datos atípicos del análisis para esto se descartan los datos mayores al percentil 97.5% de la variable correspondientes a los valores demasiado altos y los datos menores al percentil 2.5% de la variable correspondientes a los valores demasiado bajos. Con este criterio es posible eliminar todos los valores extremos en las variables del registro (Montgomery, 2005).

3) Valores repetidos en una serie de datos

Existen varias razones que pueden explicar esto, una de ellas puede ser la precisión del instrumento que no permite medir más decimales y redondea los valores medidos. Se puede dar el caso también de que las mismas condiciones de operación se hayan repetido. Por otro lado es posible que un valor haya sido repetido por el operario en la elaboración del registro.

La repetición de datos se observa principalmente para el flujo de combustible. Se observa que los valores repetidos coinciden con los números enteros de la variable, en este caso puede ser que sea un valor mal registrado en la toma de datos o un redondeo excesivo hacia el número entero más cercano.

4) Tendencias anormales

Finalmente, se analiza la presencia de tendencias anormales en la serie de datos. Por tendencia anormal se entiende un comportamiento que claramente no es coherente con el funcionamiento de la turbina ya que esta no pudo haber operado bajo estas condiciones. Una vez que se han hecho las debidas correcciones con los métodos anteriormente mencionados existe la posibilidad de que aún se halle un comportamiento atípico que pueda afectar al cálculo.

Para identificar estas tendencias anormales, se hizo una revisión de todas las series de tiempo como en el caso del flujo de combustible de la Turbina B (Figura 13). Aquí se ve que se deben eliminar los valores incoherentes con el resto de las variables.

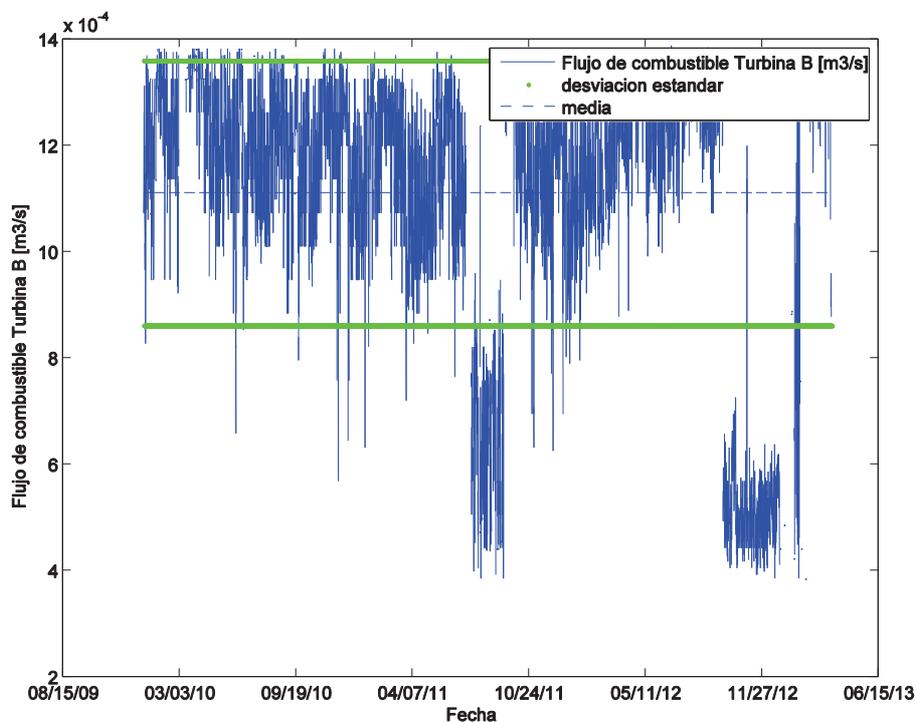


Figura 13. Ejemplo de las tendencias anormales en las variables de medición.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

A su vez para la velocidad de la Turbina B (Figura 14) tenemos una tendencia anormal que indica que la velocidad aumenta con el tiempo. Desde un punto de vista operacional y observando el comportamiento del resto de variables este comportamiento es inconsistente por lo cual para los fines de esta tesis se realiza un recorte de los datos antes de que esta tendencia aparezca.

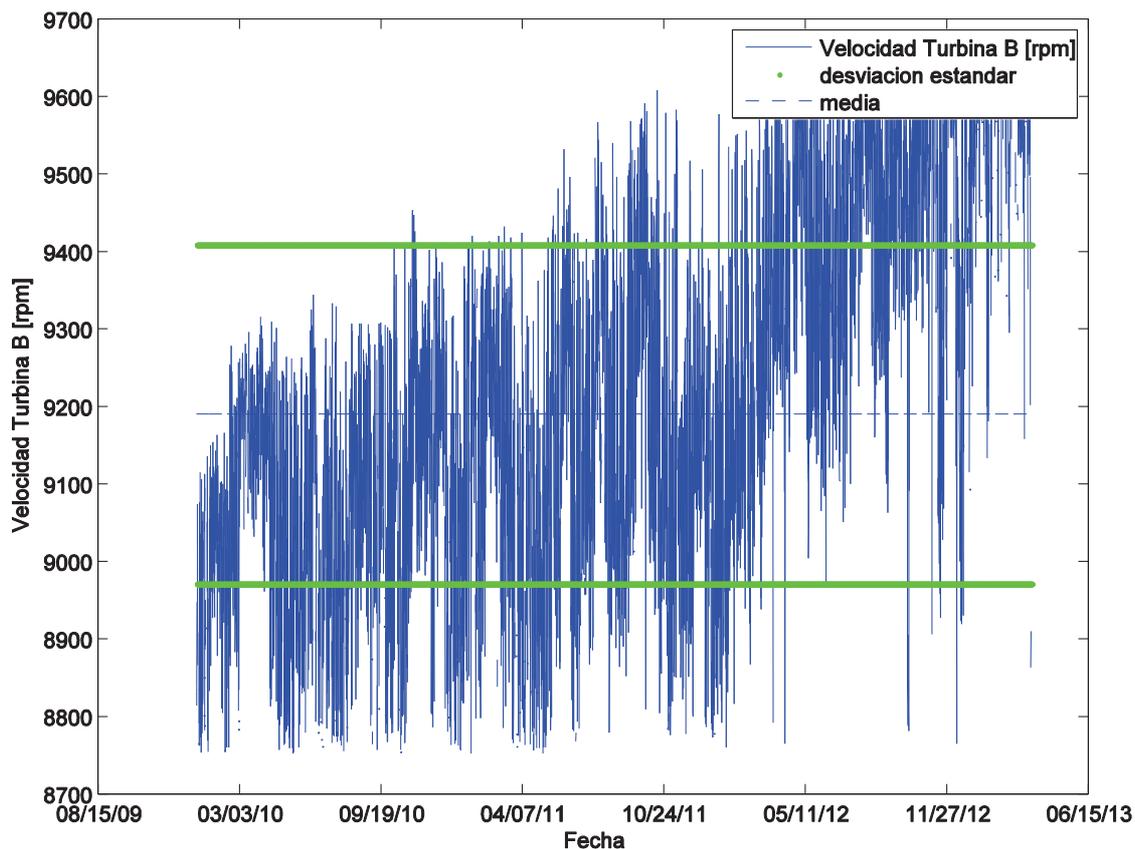


Figura 14. Ejemplo de tendencia irregular en una variable de medición.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

El estudio se limita a un comportamiento normal de operación por lo que no se toma las tendencias anormales y se define el intervalo de tiempo para el análisis para el conjunto A y B de la manera siguiente:

Tabla 4. Definición del intervalo de tiempo.

Componente	Ubicación	Número de Variables	Intervalo de Tiempo
Turbina A	NPF	7	De 01/01/2010 a 25/03/2013
Turbina B	NPF	7	De 01/01/2010 a 15/04/2011

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

4.3. Presentación de variables.

Los métodos anteriormente descritos se aplicaron para las dos bases de datos de los componentes de Turbina A y Turbina B. Para describir las variables se hizo un histograma, un diagrama de caja y bigotes, una serie de tiempo en el intervalo definido y una tabla de resumen de los valores más importantes. A lo largo de esta tesis se utiliza el sistema internacional de unidades (SI) con el cual se mide temperatura en °C, presión en kPa , flujo volumétrico en m³/s, peso en kg y distancia en metros. La siguiente tabla de conversión entre el sistema Ingles y el SI se aplica para todas las variables termodinámicas:

Tabla 5. Conversión de unidades

Sistema Ingles	Sistema Internacional
1 psi	6.89 E 03 Pa
1 gpm	6.31 E -05 m ³ /s
1 °F	(°F-32) 5/9 °C
1 lb	0.454 kg
1 Btu	1. 055 E 03 J
1 ft	0.305 m

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Çengel et al., 2009

- Presión de Descarga del Compresor

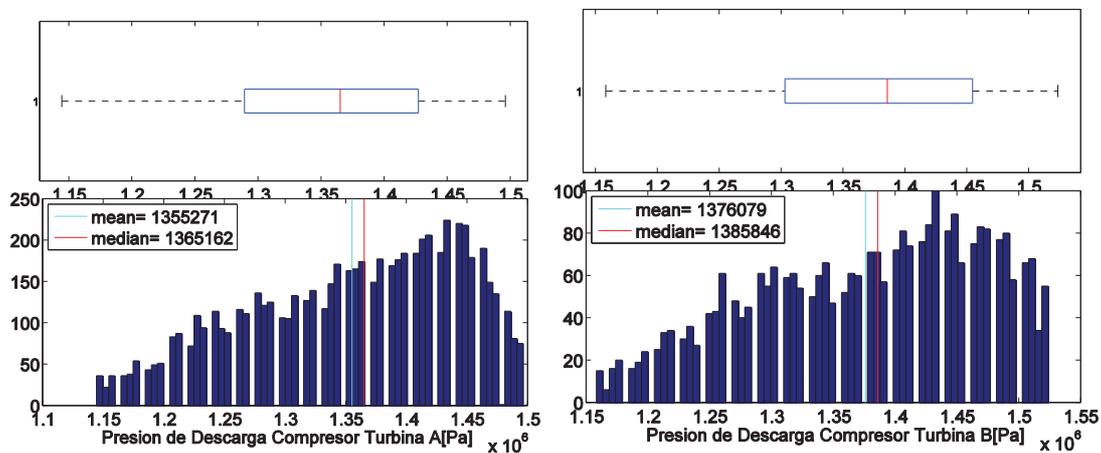


Figura 15. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Presión de Descarga del Compresor para Turbina A y Turbina B .

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

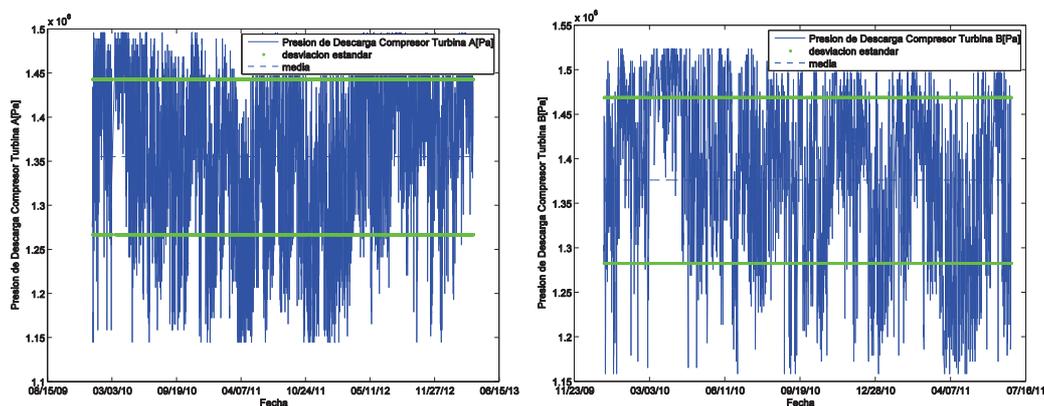


Figura 16. Serie de tiempo de Presión de Descarga del Compresor para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

En el histograma de la Presión de Descarga del Compresor de la Turbina A se observa una larga cola hacia la izquierda por lo que se diferencia de una distribución normal. Se observa esta tendencia para algunas variables y se aprecia que en el diagrama de caja y bigotes, los datos están distribuidos con mayor peso para los valores menores a la mediana. Esto indica una tendencia a subutilizar en el cálculo. Además se puede observar que los datos son discretos en el histograma, esto se ve por la presencia regular de vacíos.

El comportamiento de la Presión de Descarga del Compresor para la Turbina B es similar al comportamiento de la misma variable para la Turbina A. Sin embargo en el histograma se observa dos poblaciones de datos que se distinguen porque se observan

dos máximos locales en la distribución el primero en 1.3E06 Pa y el segundo en 1.4 E06 Pa.

- Flujo de Combustible

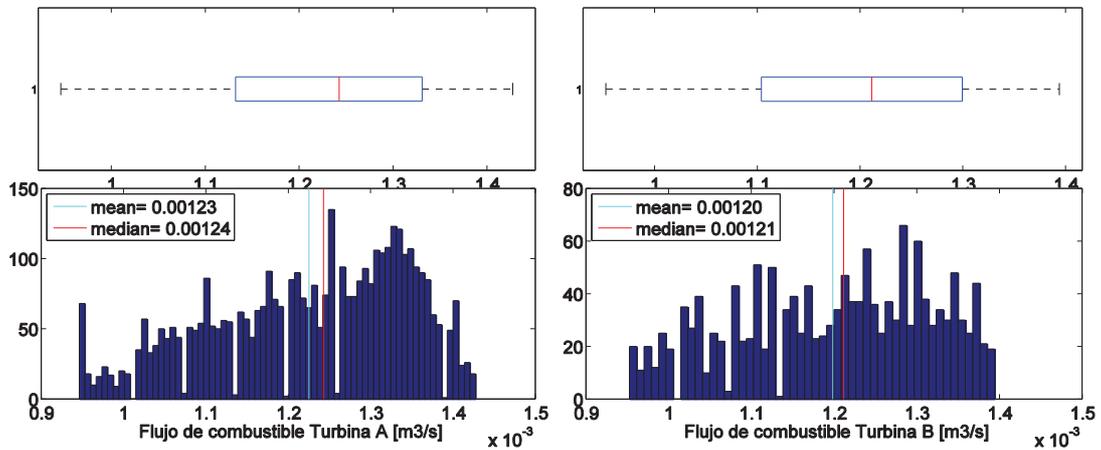


Figura 17. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Flujo de Combustible para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

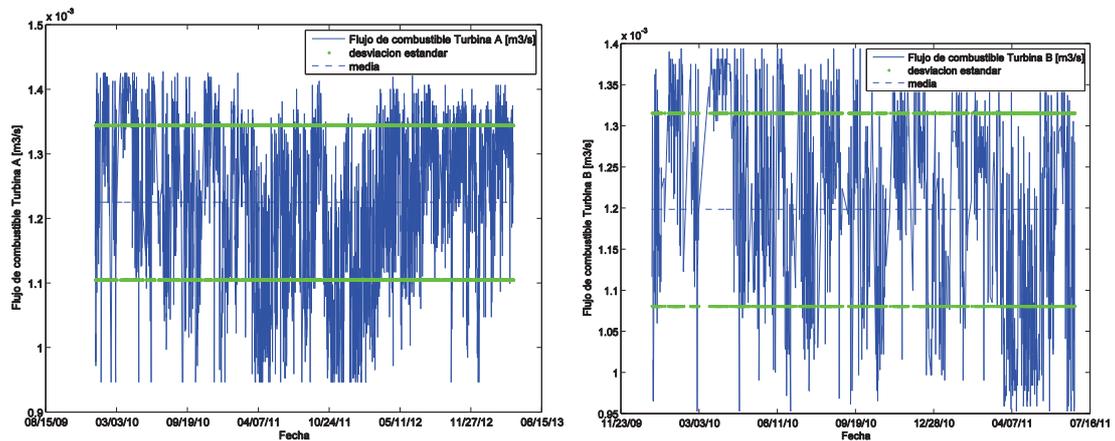


Figura 18. Serie de tiempo de Flujo de Combustible para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

En la variable de flujo de combustible de la Turbina A se observan huecos en el histograma que corresponden justamente a los valores repetidos que se eliminaron. Además se observa el mismo comportamiento para el histograma con una larga cola hacia la izquierda y para el diagrama de caja y bigotes.

El flujo de combustible de la Turbina B, tiene un histograma bastante irregular que presenta algunos datos discretos que son los valores repetidos eliminados de esta variable, en el diagrama de caja y bigotes se ve que la distribución es bastante uniforme pero en el histograma no se ve una distribución normal.

- Potencia Activa del Generador

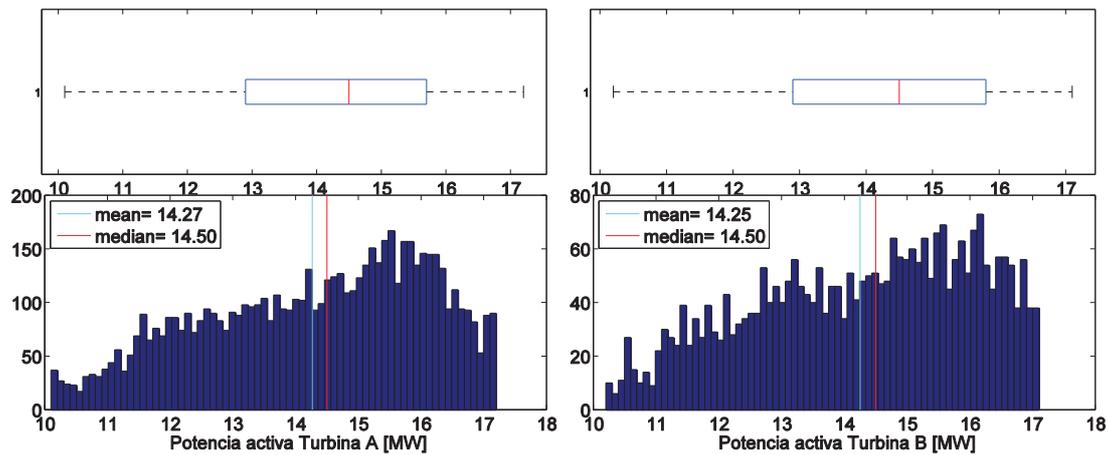


Figura 19. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Potencia Activa del Generador para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

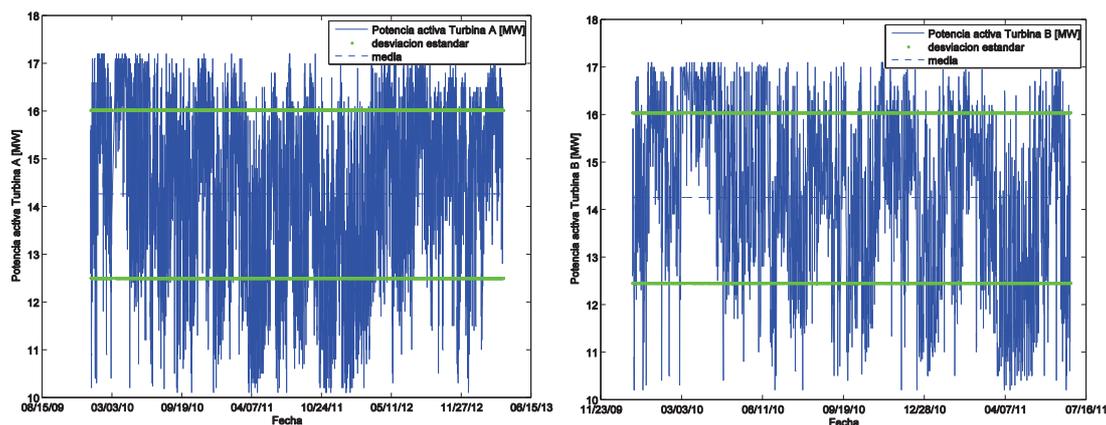


Figura 20. Serie de Tiempo de Potencia Activa del Generador para Turbina A.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

La potencia activa de la Turbina A tiene un comportamiento similar a las demás variables, el histograma muestra la misma forma anteriormente descrita. Esto anticipa una correlación de las variables y no se observan comportamientos especiales en la serie de tiempo.

La potencia activa de la Turbina B tiene también el mismo comportamiento de la misma variable de la Turbina A. Además se observa también la presencia de las dos poblaciones en el histograma tal como se vio para la Presión de Descarga de la Turbina B. En este caso los máximos locales se encuentran en 13 MW y 16MW.

- Velocidad de la Turbina

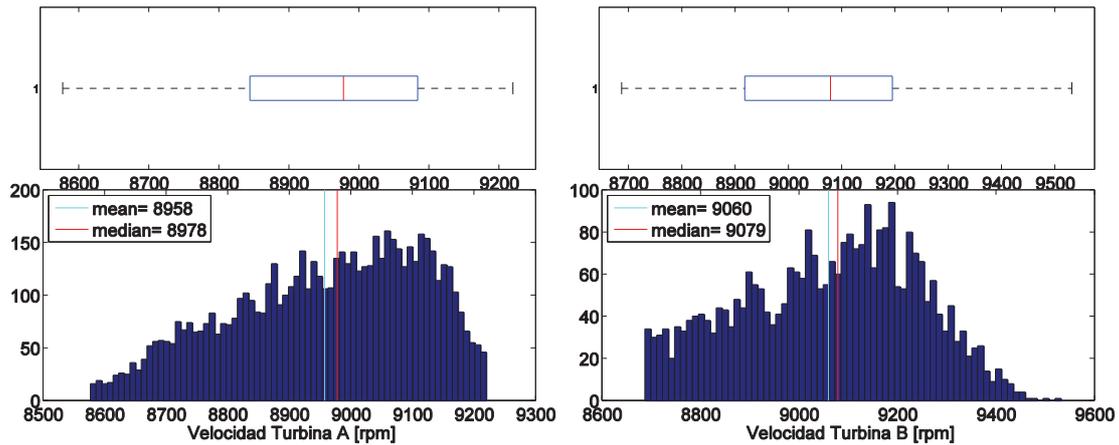


Figura 21. Histograma y Serie de Tiempo de Velocidad de Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

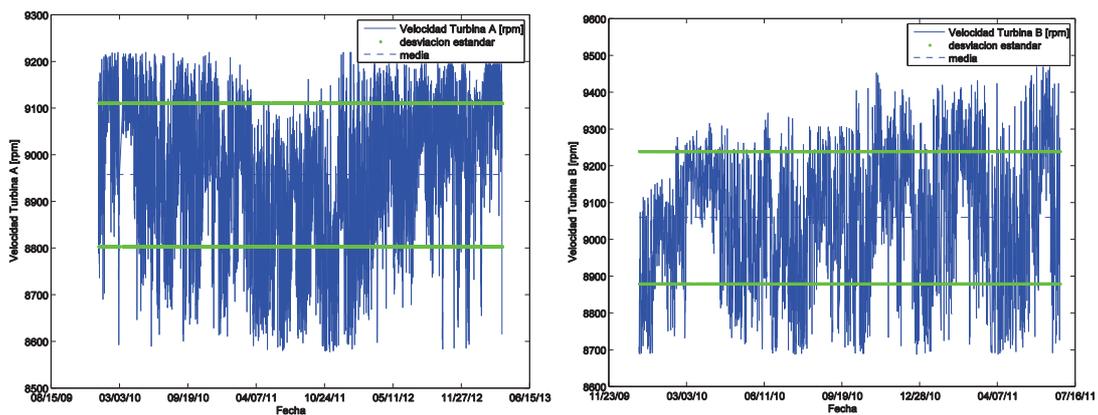


Figura 22. Serie de tiempo de Velocidad de Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

Como la velocidad es una medida muy precisa se tiene un histograma con un tamaño de intervalo más pequeño. La Velocidad de la Turbina A tiene también el mismo comportamiento de las demás variables desde el punto de vista del histograma pero en la serie de tiempo hay una ligera baja en el año 2011 de marzo a noviembre.

La velocidad de la Turbina B tiene un histograma con una cola más larga hacia la izquierda y menos valores por encima de la frecuencia más alta.

- Temperatura del Combustible

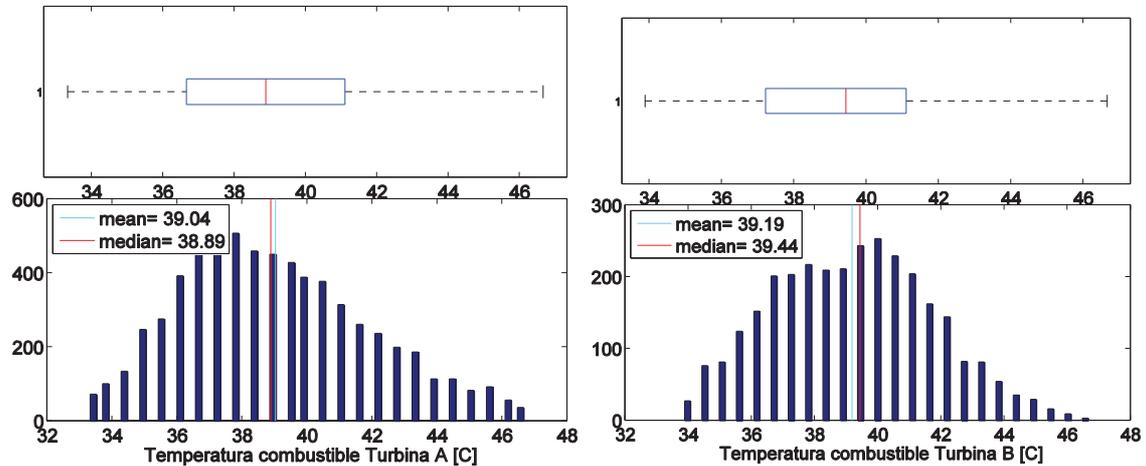


Figura 23. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura de combustible de Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

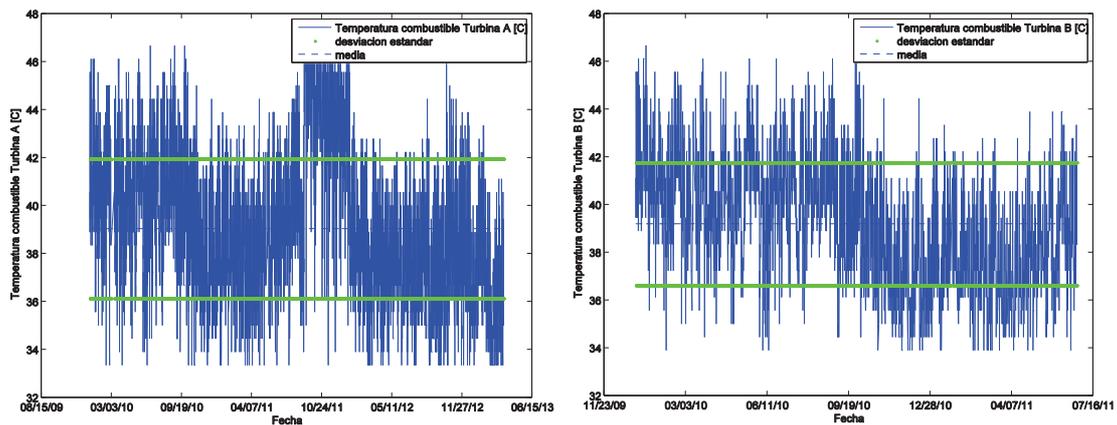


Figura 24. Serie de tiempo de Temperatura de combustible para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

La temperatura de combustible de la Turbina A presenta un histograma con una cola hacia la derecha que es la tendencia opuesta. Según este histograma se tiene datos discretos para esta variable que coinciden con la incertidumbre causada por el número de cifras significativas del instrumento de medición. Además se observa un aumento de la temperatura de combustible de la Turbina A en Octubre del 2011 y luego vuelve a bajar.

El histograma de la temperatura del combustible tiene un comportamiento casi normal con un ligero sesgo hacia la izquierda, sin embargo la serie de tiempo tiene un cambio de comportamiento en el mes de Octubre del 2010, aquí la temperatura baja y se estabiliza en un nuevo régimen. De nuevo como en la Turbina A hay valores discretos en la variable.

- Temperatura de Ingreso del Compresor

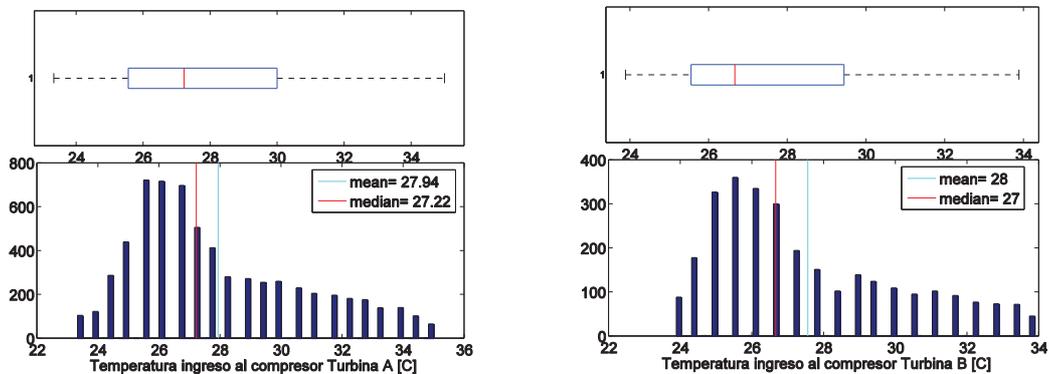


Figura 25. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura de ingreso al compresor para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

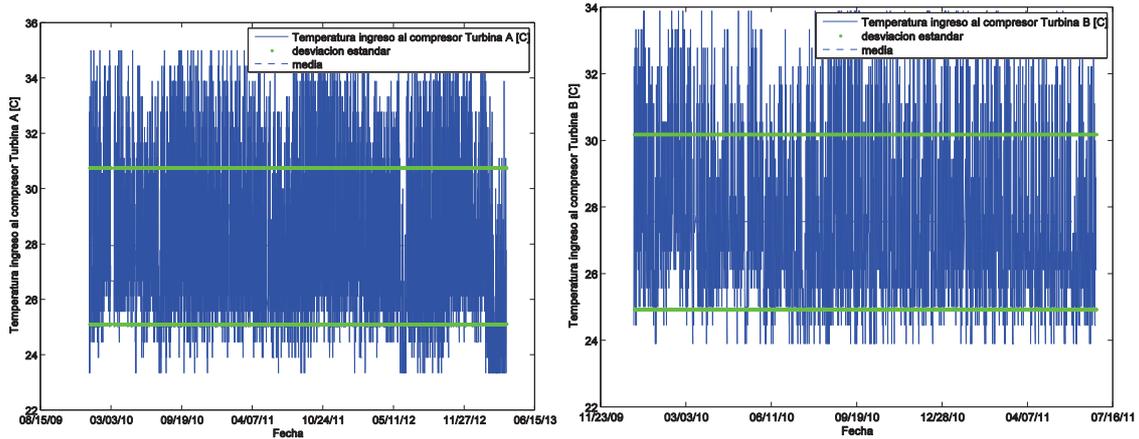


Figura 26. Serie de Tiempo de Temperatura de ingreso al compresor para Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

La temperatura de ingreso al compresor de la Turbina A tiene un histograma con una cola hacia la derecha como la temperatura del combustible de la Turbina A, los valores son bastante discretos y también corresponde a la precisión del instrumento.

Como se vio para las otras temperaturas, existen valores discretos para la temperatura de ingreso al compresor, en este caso también se observa un histograma con una cola hacia la derecha.

- Temperatura promedio de salida de turbina de alta presión

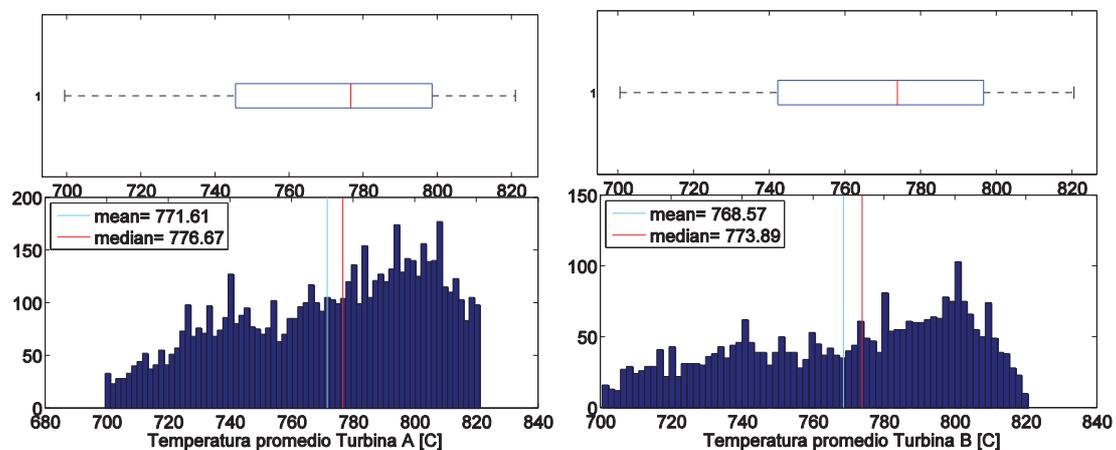


Figura 27. Histograma y Diagrama de Caja y Bigotes de Temperatura promedio de termocuplas de Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

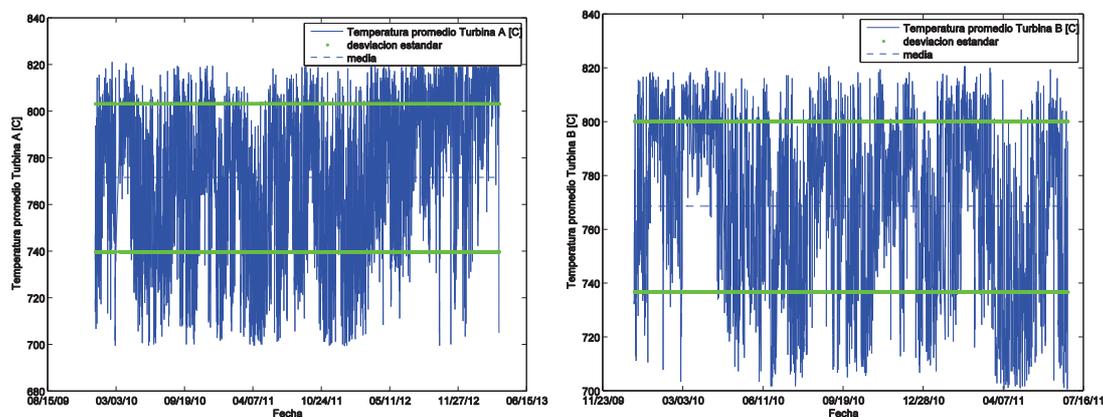


Figura 28. Serie de Tiempo de Temperatura promedio de termocuplas de Turbina A y Turbina B.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

La temperatura promedio de las termocuplas a la entrada de la turbina LPT de la Turbina A tiene un comportamiento parecido a la presión de descarga de la Turbina A, con un histograma con una cola hacia la izquierda y en la serie de tiempo hay un ligero aumento que empieza en el mes de mayo del 2012 sin embargo el cambio en la variable es menor que la desviación estándar por lo tanto se considera válida.

La temperatura promedio de la Turbina B presenta un histograma muy repartido, la variable se distribuye uniformemente pero hay una cola hacia la izquierda.

En las series de tiempo de las variables de la Turbina A y la Turbina B se observa que hay un corte bastante fuerte en los valores máximos, esto se debe al recorte por los percentiles que se hizo en el control de datos, en este caso se aplicó el mismo percentil de recorte para todas las variables por lo cual se sacrifican algunos datos para tener variables más uniformes con las cuales trabajar.

En relación al comportamiento de los datos, se puede apreciar que la variabilidad es alta como se aprecia en las gráficas de series de tiempo. Esta variabilidad nos permite analizar la turbina bajo varias condiciones de operación y nos presenta una gran combinación de estados posibles. En general se observa un sesgo hacia el extremo izquierdo de la campana de distribución.

4.3.1. Resumen estadístico de Base de datos

Para obtener una base de datos final se tomó en cuenta el estado para que en una fecha dada, esté totalmente cubierto por todas las variables. Los datos finales se redujeron de 7086 a 1322 datos para la Turbina B, esto representa un 18.7% de los datos originales y se pasó de 7086 a 4030 datos para la Turbina A, esto representa un 56.9% de los datos originales. A continuación se presenta un resumen estadístico de las variables utilizadas en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Resumen estadístico de variables para Turbina A.

Variable	Unidad	Media	Rango	Desviación Estándar
Presión de Descarga del Compresor	kPa	1.352E03	0.421E03	9.187E01
Flujo de Combustible	m ³ /s	0.0012	0.0017	1.356E-04
Potencia Activa Generador	MW	14.21	8.49	1.841
Velocidad Compresor	rpm	8950	788	160.1
Temperatura Combustible	°C	39.03	16.67	3.146
Temperatura Ingreso al Compresor	°C	27.96	12.78	2.918
Temperatura entrada Turbina de Potencia	°C	770.8	141.1	32.82

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

Tabla 7. Resumen estadístico de variables para Turbina B.

Variable	Unidad	Media	Rango	Desviación Estándar
Presión de Descarga del Compresor	kPa	1.367E03	0.4343E03	9.473E01
Flujo de Combustible	m ³ /s	0.0012	0.0005	1.217E-04
Potencia Activa Generador	MW	14.13	8.2	1.822
Velocidad Compresor	rpm	9130	1061	228.7
Temperatura Combustible	°C	39.23	16.1	3.157
Temperatura Ingreso al Compresor	°C	27.31	13.4	2.933
Temperatura entrada Turbina de Potencia	°C	765.2	133.3	31.94

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

Los valores medios de presión de descarga del compresor, de potencia activa del generador y temperatura de entrada a la turbina de potencia son comparados con los valores nominales:

Tabla 8. Comparación de los valores reales y valores nominales.

Variable	Unidad	Media Turbina A	Media Turbina B	Valor Nominal
Presión de Descarga del Compresor	kPa	1.37E03	1.35E03	1.72E03
Potencia Activa Generador	MW	14.1	14.2	25
Temperatura entrada Turbina de Potencia	°C	765	771	765

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operación), 2013

Los valores promedio de la presión de descarga del compresor y de la potencia activa de las Turbinas A y B son menores a sus respectivos valores nominales. El valor

nominal corresponde a una condición de operación al 100% por lo que es de esperar que sea mayor al valor promedio de operación. Los valores nominales y promedios de la temperatura de entrada a la Turbina de Potencia son prácticamente los mismos para la Turbina A y la Turbina B.