

### 5.9.2. Relación entre eficiencia y entalpía D del punto D.

En este caso se analiza la entalpía del punto D que se obtuvo con la medida de la temperatura promedio del arreglo de termocuplas en la entrada de la Turbina LPT (ver sección 5.5.3). En el caso de la entalpía  $h_D$ , la diferencia en los coeficientes entre la Turbina A y la Turbina B es considerable. A su vez el  $R^2$  de la regresión es mejor en ambos casos para la regresión cuadrática.

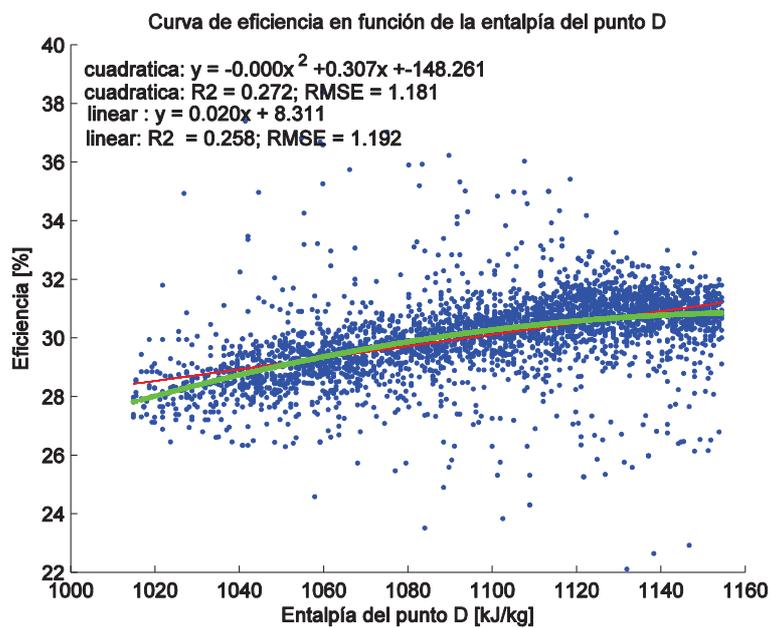
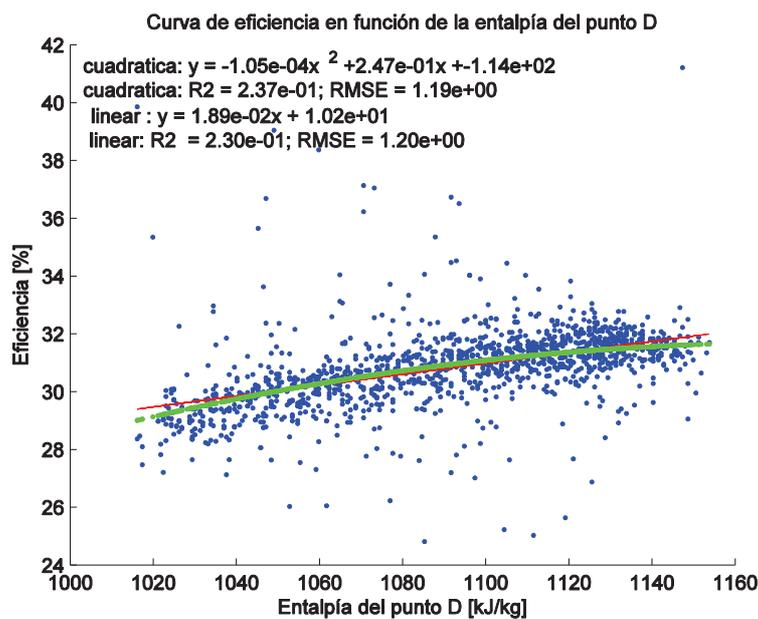


Figura 46. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto D de la Turbina "A".

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013



*Figura 47. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto D de la Turbina “B”.*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

### 5.9.3. Relación entre eficiencia y entalpía del punto 1.

En este caso se analiza la entalpía del punto 1 que se obtuvo con la medida de la temperatura de entrada al compresor (ver sección 5.5.1). En el caso de la entalpía  $h_1$ , la diferencia en los coeficientes entre la Turbina A y la Turbina B es considerable. En el caso de esta regresión la relación entre la eficiencia y la entalpía del punto 1 es prácticamente una línea horizontal por lo tanto, la eficiencia no tienen relación fuerte con la entalpía  $h_1$ . Así mismo, no existe una relación fuerte entre la eficiencia y la temperatura de entrada al compresor que viene a ser la temperatura ambiente. Los coeficientes solamente conservan el mismo orden de magnitud. El  $R^2$  de las regresiones lineales y cuadráticas es muy bajo por lo tanto no se pudo hacer una buena aproximación de estas variables con funciones lineales y cuadráticas.

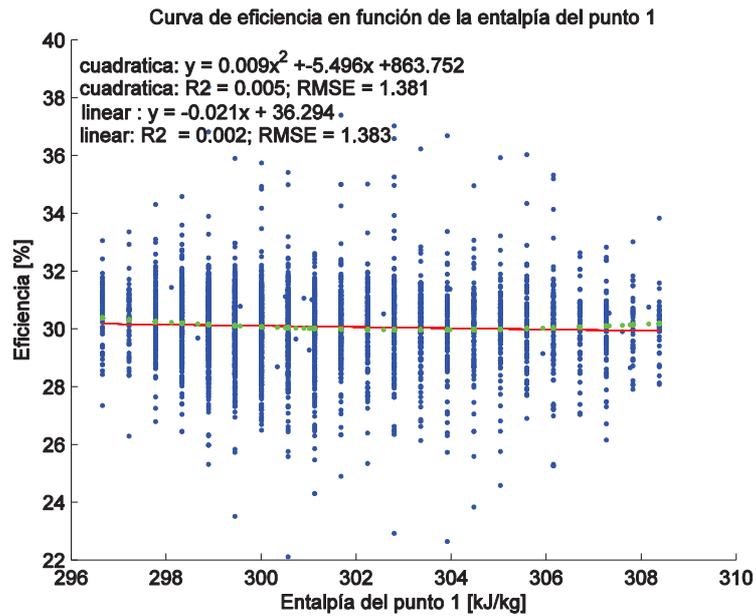


Figura 48. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 1 de la Turbina “A”.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

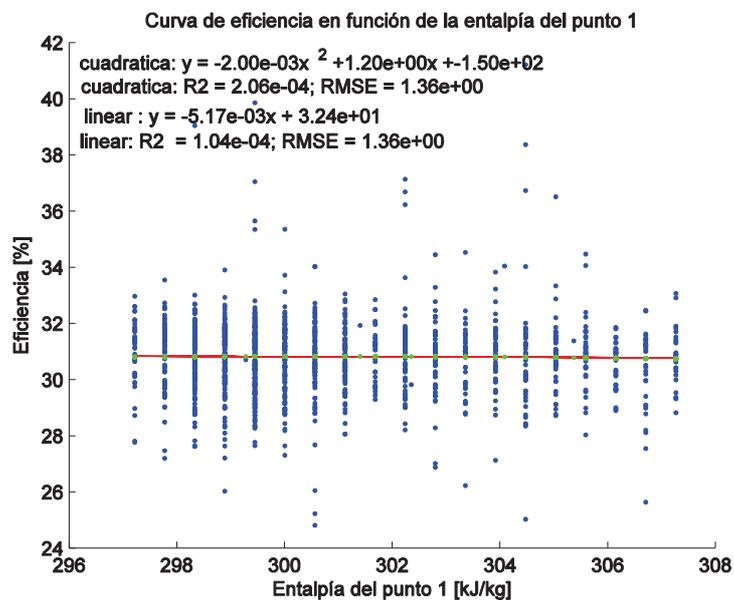


Figura 49. Curva de eficiencia en función de la entalpía del punto 1 de la Turbina “B”.

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

#### 5.9.4. Relación entre eficiencia y velocidad de la Turbina.

La velocidad de la turbina puede ser comparada con la eficiencia como en los demás casos. En este caso sí se encuentra una relación clara entre la velocidad de la turbina y la eficiencia del sistema. A su vez el  $R^2$  de la regresión es mejor en ambos casos para la regresión cuadrática.

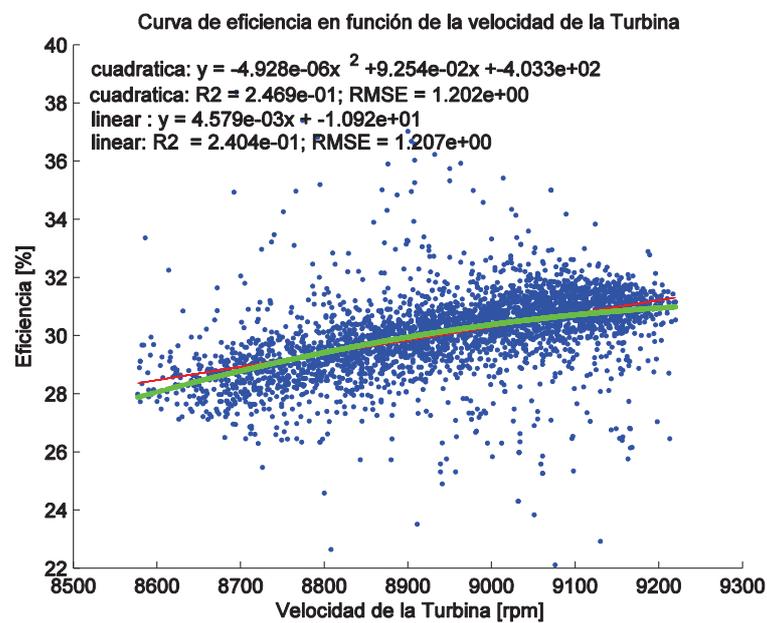
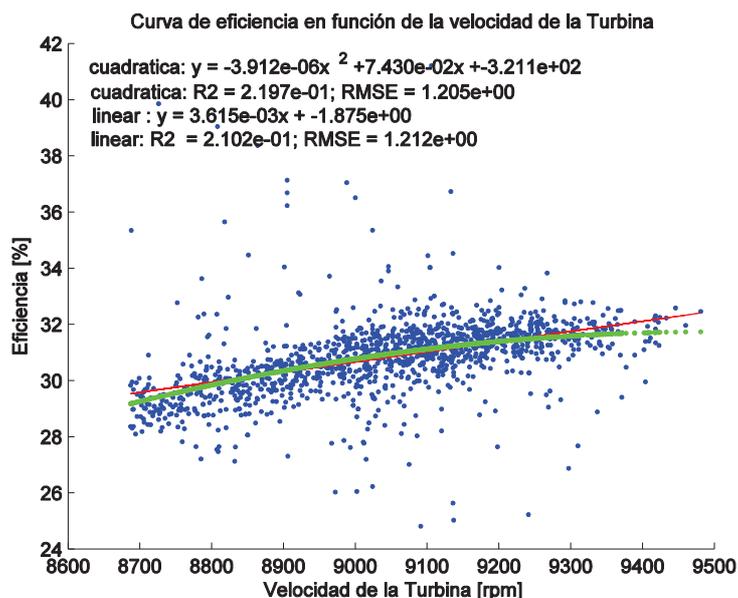


Figura 50. Curva de eficiencia en función de la velocidad de la Turbina "A".

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013



*Figura 51. Curva de eficiencia en función de la velocidad de la Turbina "B".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

En todas las regresiones de las curvas de eficiencia con excepción de la entalpía del punto 1, se encontró que el mejor ajuste de la regresión se da por la regresión cuadrática. La siguiente tabla recapitula los valores de las regresiones estudiadas en esta sección.

*Tabla 12. Resumen de las regresiones efectuadas sobre la eficiencia en la Turbina A.*

Regresión eficiencia vs X	Regresión cuadrática: $ax^2 + bx + c$				Regresión lineal: $ax + b$		
	a	b	c	$R^2$	a	b	$R^2$
entalpía del punto 2	-6.961E-04	0.928	-279.1	0.2521	0.0293	11.08	0.2079
entalpía del punto 1	-0.0091	-5.496	863.8	0.0047	-0.0206	36.29	0.0017
entalpía del punto D	-1.311E-04	0.3069	-148.3	0.272	0.0198	8.311	0.2585
Velocidad de turbina	-4.93E-06	0.0925	-403.3	0.2469	0.0046	-10.92	0.2404

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

*Tabla 13. Resumen de las regresiones efectuadas sobre la eficiencia en la Turbina B.*

Regresión eficiencia vs X	Regresión cuadrática: $ax^2 + bx + c$				Regresión lineal: $ax + b$		
	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
entalpía del punto 2	-6.90E-04	0.921	-276.2	0.218	0.0295	11.65	0.1795
entalpía del punto 1	-0.0020	1.20	-149.6	2.1E-04	-0.0052	32.37	1.0E-04
entalpía del punto D	-1.049E-04	0.246	-113.5	0.2373	0.0189	10.23	0.2297
Velocidad de turbina	-3.912E-06	0.074	-321.1	0.219	0.0036	-1.87	0.2102

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Se puede observar que las regresiones tienen un coeficiente R<sup>2</sup> bajo y los coeficientes de las regresiones cuadráticas son bastantes bajos.

### 5.9.5. Definición del máximo de la regresión cuadrática

La tendencia cuadrática de la curva de eficiencia es una curva cóncava hacia abajo que tiene un máximo que está en algunos dentro del rango de la variable y en otros casos se encuentran muy cerca del límite máximo del rango de la variable. Para determinar este máximo se toma la ecuación de la regresión cuadrática y se toma la derivada de la regresión y se iguala a cero para encontrar un valor  $x^*$  en este máximo.

$$\text{Regresión cuadrática: } y(x) = ax^2 + bx + c$$

$$\frac{dy}{dx} = 2ax + b$$

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad x^* = -\frac{b}{2a}$$

El valor de  $x^*$  se calcula para todas las curvas de eficiencia y se presenta en la Tabla 14. Se busca determinar la condición de operación que corresponde a esta eficiencia máxima. Sin embargo la eficiencia máxima que se obtiene corresponde más bien a la tendencia de la turbina en el tiempo de estudio. Esta eficiencia no corresponde a la eficiencia máxima absoluta que se puede obtener de la turbina. A través de esta maximización se puede ver que son pocos los puntos que tienen una eficiencia mayor al 32%. Una de las razones de la existencia de estos puntos es que obedecen a condiciones especiales que son favorables pero que no se repiten con frecuencia.

*Tabla 14. Punto máximo para las regresiones cuadráticas de Turbina A y B.*

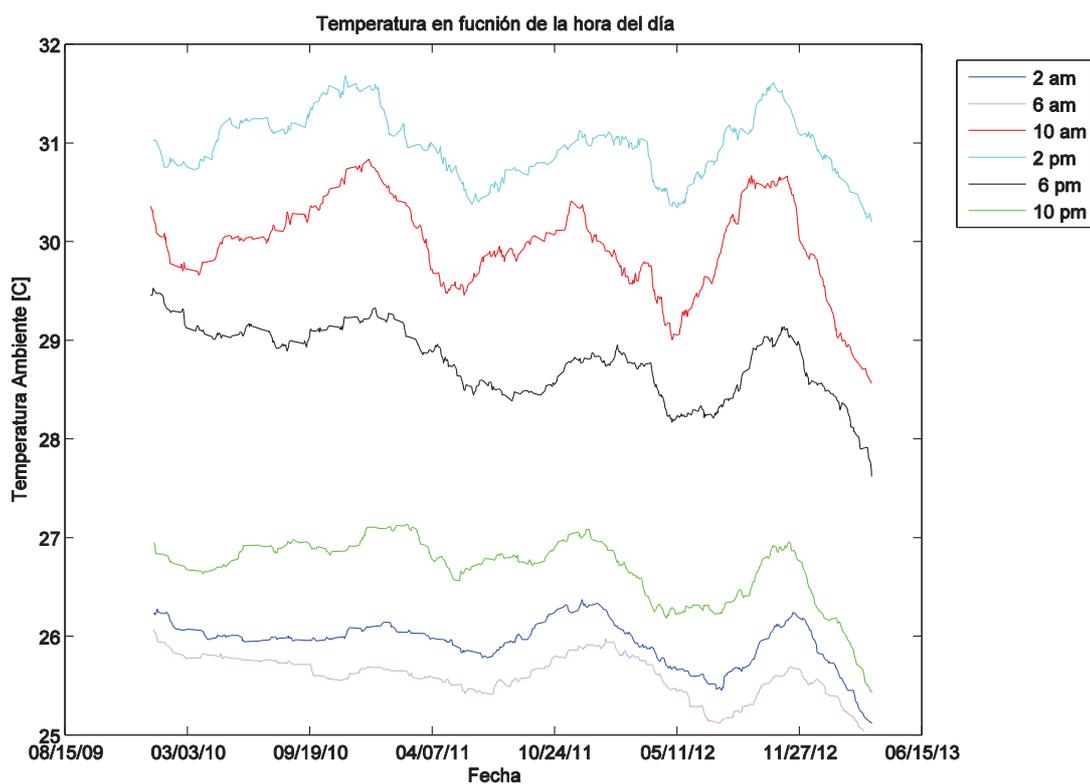
Variable medida Variable en la regresión	Turbina A		Turbina B	
	X para Eficiencia máxima	Ubicación en X De Y max En el rango operacional	X para Eficiencia máxima	Ubicación en X De Y max En el rango operacional
<b>Temperatura punto D</b> Entalpía $h_D$	1167.8 kJ/kg	Dentro del rango	1193 kJ/kg	Fuera del rango
<b>Presión punto 2</b> Entalpía $h_2$	667.4 kJ/kg	Fuera del rango	664.9 kJ/kg	Dentro del rango
<b>Temperatura punto 1</b> Entalpía $h_1$	408.2 kJ/kg	Fuera del rango	301.72 kJ/kg	Dentro del rango
<b>Velocidad de Turbina</b>	9388 rpm	Fuera del rango	9277 rpm	Dentro del rango

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

#### 5.9.6. Relación entre eficiencia y la hora del día.

En esta sección se estudia la relación entre la eficiencia, la temperatura ambiente y la hora del día. En un principio se puede hacer el análisis para ambas Turbinas, sin embargo se lo realiza solamente para la Turbina A ya que para esta turbina se tiene un registro disponible de más años. Para determinar estas relaciones se empieza por ver el comportamiento de la turbina en función de la hora del día:



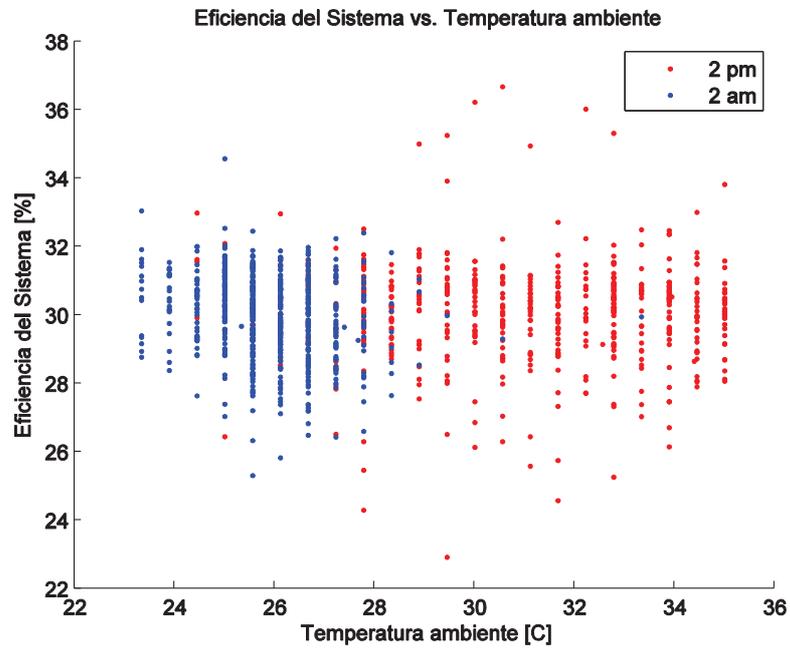
*Figura 52. Serie de tiempo de media móvil de la temperatura ambiente en función de la hora del día.*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Se puede observar como es de esperar que en la noche las temperaturas son inferiores a las temperaturas del día. La mayor temperatura se alcanza a las 2 pm y la menor temperatura se alcanza a las 6 am. Ahora se trata de analizar la relación del ciclo termodinámico con la hora del día. Para tener una relación más clara se trata de analizar

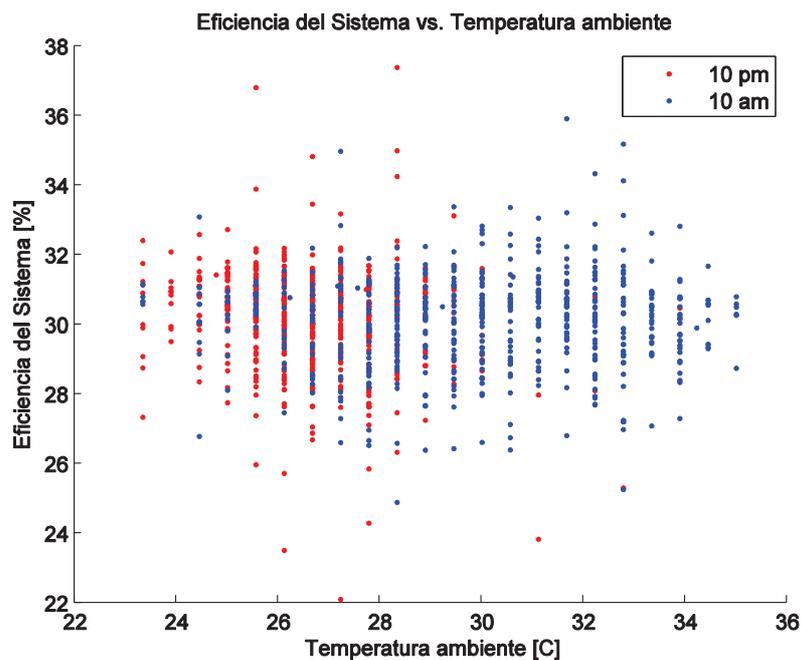
las condiciones extremas de acuerdo a la Figura 54, es decir la hora del día con la temperatura más alta y la hora del día con la temperatura más baja.



*Figura 53. Eficiencia Global del sistema vs Temperatura ambiente para 2 pm y 2 am , Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013



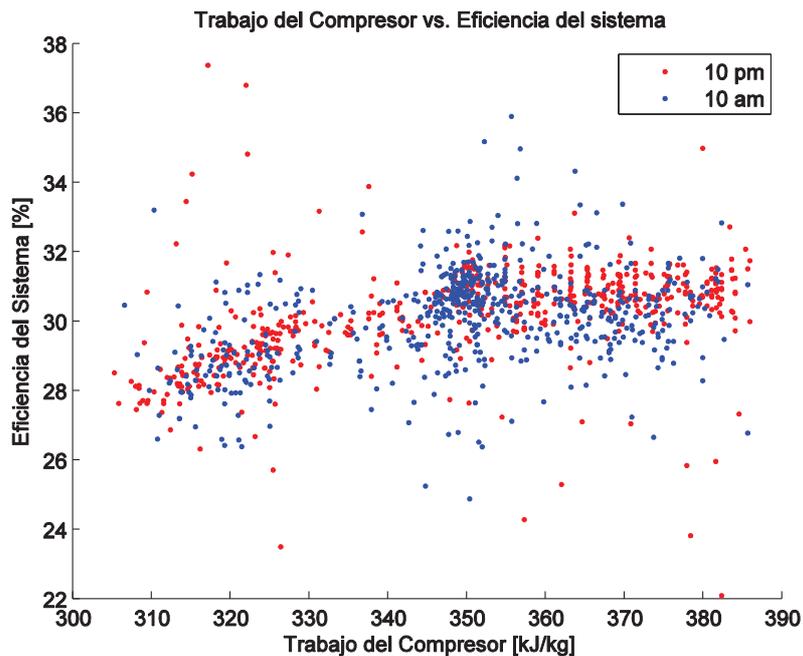
*Figura 54. Eficiencia global del sistema vs Temperatura ambiente par 10 pm y 10 am, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Para la variable de la temperatura ambiente, se observa como es de esperarse que la temperatura depende de la hora del día, sin embargo la eficiencia no presenta una clara relación con la hora del día. No se halla una relación entre la eficiencia global del sistema y la hora del día.

Se puede analizar las variables del ciclo como el trabajo del compresor y la temperatura del punto D para analizar si es que en verdad existe una relación entre eficiencia y la hora del día.

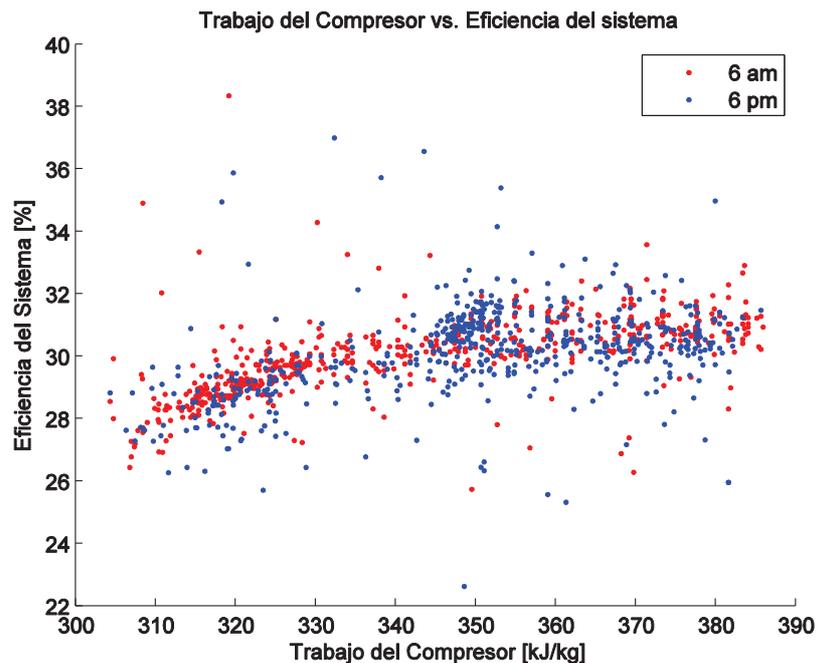


*Figura 55. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y el trabajo del compresor, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

En el caso del trabajo del compresor, se puede ver que los valores de eficiencia a las 10 de la noche son relativamente más altos que los valores de eficiencia a las 10 de la mañana para un valor de trabajo dado. La distribución del trabajo del compresor según la hora del día es bastante uniforme, se puede decir solamente que hay una tendencia a las 10 pm hacia valores por encima de los 350 kJ/kg, mientras que hay un mayor número de datos para las 10 am, en la zona de los 350 KJ/kg.



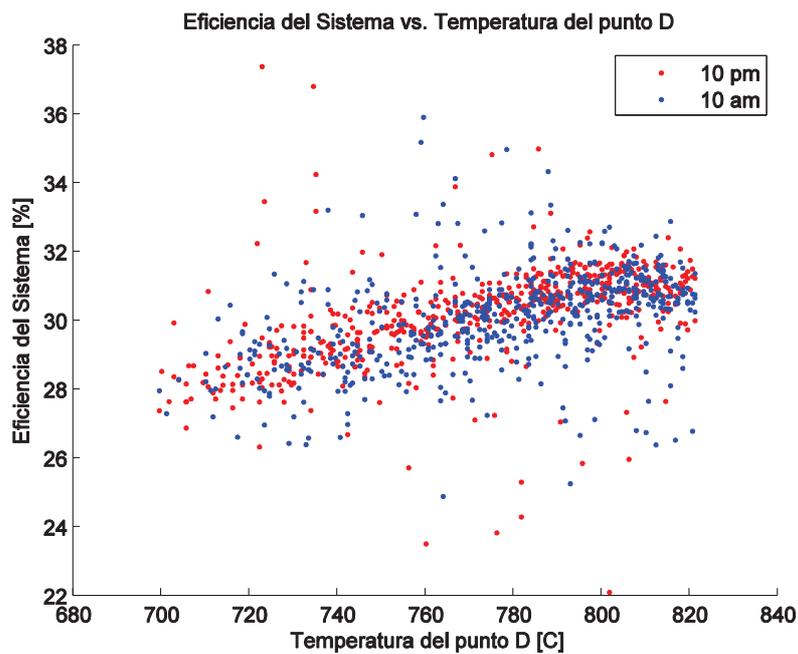
*Figura 56. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y del trabajo del compresor, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

En el caso de la 6 de la mañana y las 6 de la noche no se presenta una clara relación entre la hora del día y la eficiencia del sistema ni tampoco entre la hora del día y el trabajo del compresor. A estas horas la demanda de la turbina es similar. Por lo tanto la relación entre eficiencia y hora del día para el trabajo del compresor no se aplica para todas las horas del día.

Ahora analizamos el caso con la temperatura promedio de las termocuplas:

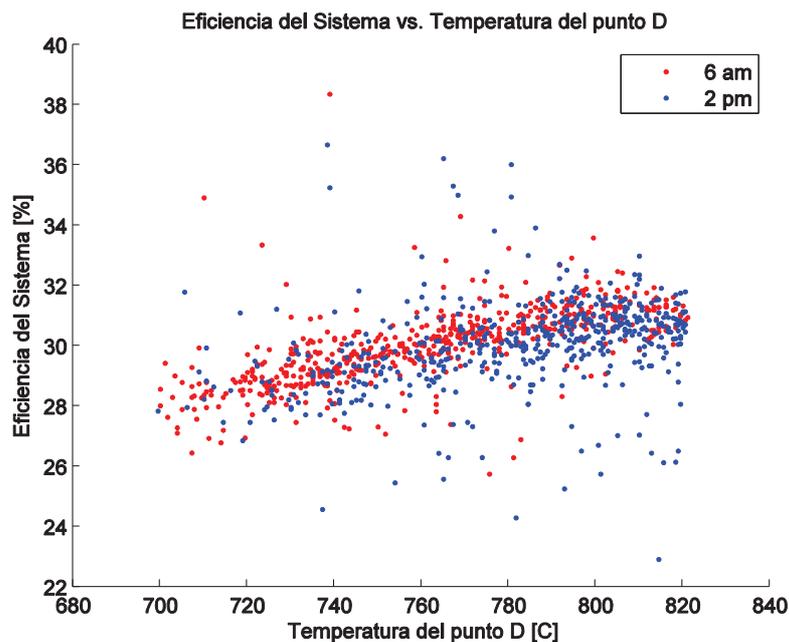


*Figura 57. Eficiencia global del sistema en función de la hora del día y de la temperatura del punto D, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

La relación entre la eficiencia del sistema y la hora del día no es clara para las 10 am y 10 pm. Se puede solamente hacer un análisis cualitativo en el cual a las 10 pm las temperaturas son un poco menores pero en cuestión de la eficiencia no hay una conclusión significativa, la tendencia parece ser la misma para las dos horas del día.



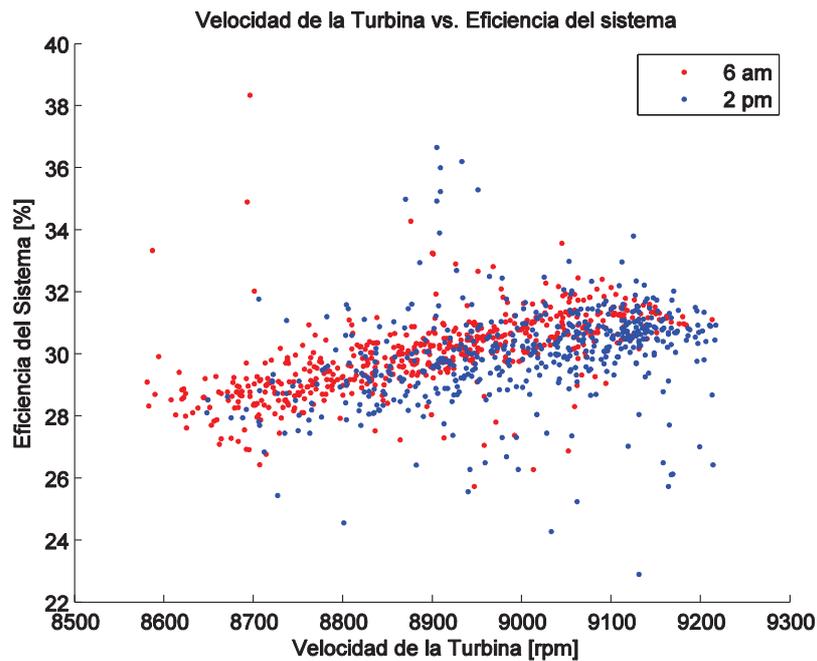
*Figura 58. Eficiencia global del sistema en función de la hora del día y de la temperatura del punto D, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Para verificar si existe o no una relación entre la hora del día y la temperatura del punto D analizamos también los casos de las 6 am y 2 pm. En el caso de las 6 am, la temperatura ambiente es más baja. Por otro lado, se observa una eficiencia superior a las 2 pm, que es la temperatura ambiente más alta. Además la temperatura del punto D es en general más baja a las 6 am. Por lo tanto sí hay una relación entre la temperatura del punto D y la eficiencia según la hora del día. Dadas las condiciones variantes de la demanda de energía del campo, podemos pensar que esta relación tiene que ver con la temperatura ambiente y no con la hora del día, es decir que a menor temperatura ambiente, menor es la temperatura de la Turbina y mayor es la eficiencia.

Repetimos el mismo análisis para la Velocidad de la Turbina:



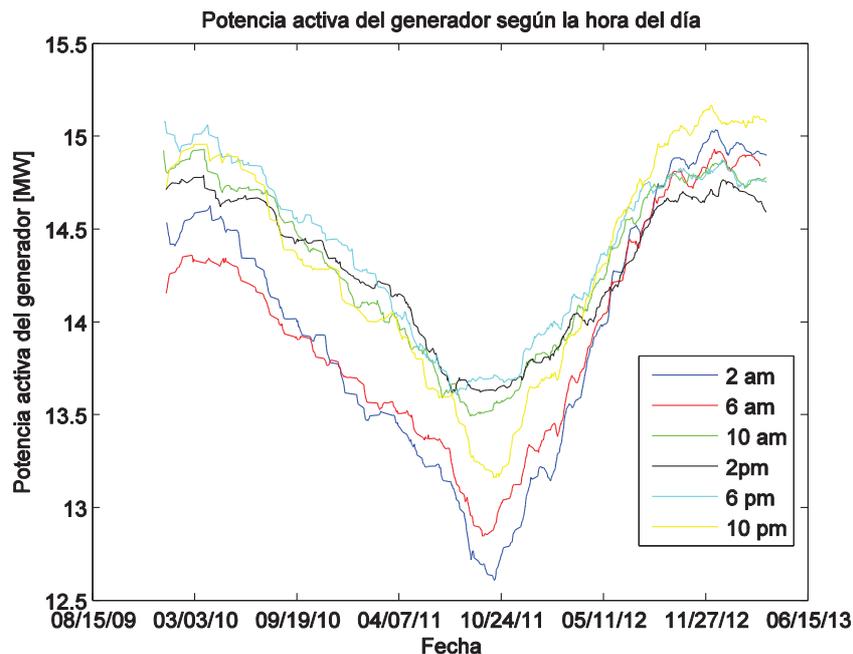
*Figura 59. Eficiencia Global del sistema en función de la hora del día y la velocidad de la Turbina, Turbina "A".*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Nuevamente se compara para las 6 am y 2 pm, se confirma que a las 6 am las eficiencias de los puntos parecen ser mayores para una velocidad dada. Además la turbina gira a una velocidad menor a las 6 am.

Finalmente tratamos de encontrar una relación entre la potencia activa del generador y la hora día y se analiza el caso de la potencia activa y la temperatura ambiente:



*Figura 60. Serie de tiempo de media móvil de Potencia activa del generador en función de la hora del día para la Turbina “A”.*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Primeramente el comportamiento general de la potencia activa desde la Turbina A, es decreciente ya que el promedio diario pasa de 14.5 MW a 13 MW en el 10/24/2011, luego el comportamiento cambia y la potencia activa aumenta con el tiempo para llegar a un promedio diario estable en el tiempo de 14.7 MW el 11/27/2012. En un análisis más detallado se quiere analizar la potencia activa en función de la hora del día. Existe una tendencia para las 6 am y 2 am, se observa que para este período la potencia activa del generador es menor. Para el resto de horas del día el comportamiento es variable, solamente es destacable que a las 6 pm parece que la potencia activa es mayor. Finalmente sobre el rango de la potencia activa en el día, para el 08/03/2010 el rango es de 0.7 MW, en el 10/24/2011 se aumenta a 1.2 MW y para el 11/27/2012 se

reduce a 0.5 MW. Conforme el rango es menor, la diferencia de generación entre una hora y otra es menor y de signo variable.

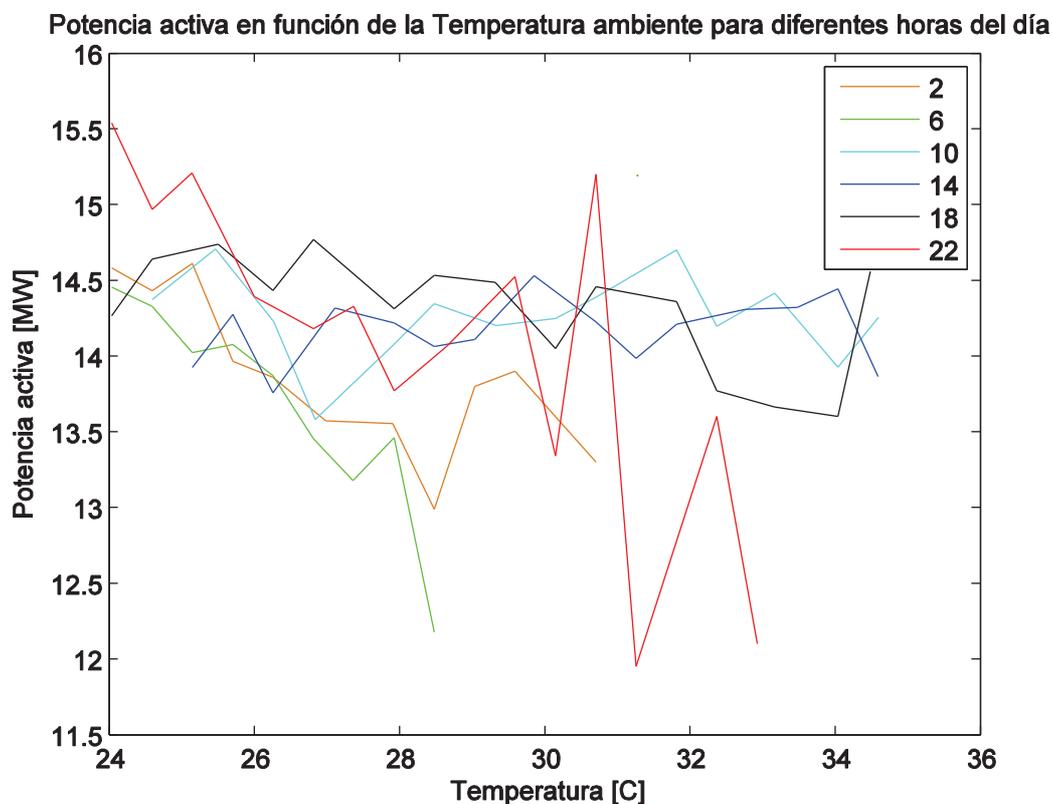


Figura 61. Potencia activa de la Turbina A en función de la temperatura ambiente para diferentes horas del día.

Realizado por: Juan Fernando Vera

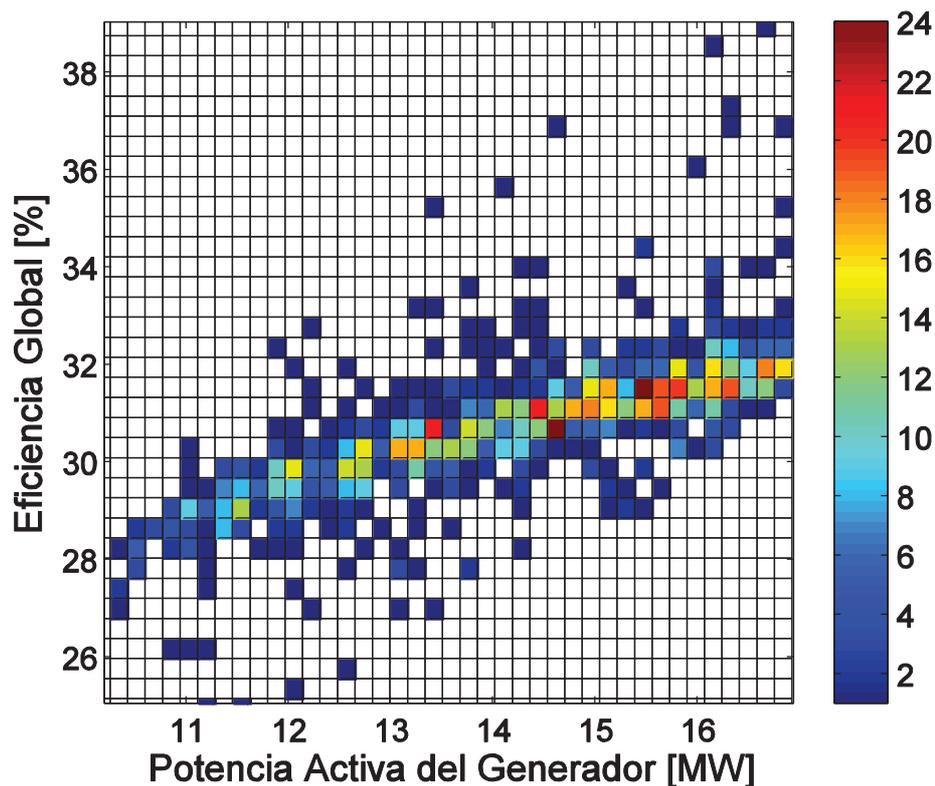
Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

De las relaciones encontradas se puede deducir que la temperatura ambiente no tiene una relación fuerte con la eficiencia de la Turbina. Esto lo podemos decir ya que se encuentra una relación aparente solamente para las 2 am y las 6 am, en estas horas la generación es menor porque son horas de la noche y mañana en las cuales no todos los equipos están prendidos.

## 5.10. Condiciones operativas de Turbina A y Turbina B.

En esta sección se trata de discutir sobre las condiciones de operación actuales del sistema y cuáles son los regímenes que tienen mayor eficiencia.

Para obtener una mejor apreciación de la relación entre la Eficiencia Global y la Potencia Activa del Generador, se utiliza un gráfico de distribución de valores (Figura 62).



*Figura 62. Gráfico de distribución de valores para la Turbina B.*

Realizado por: Juan Fernando Vera

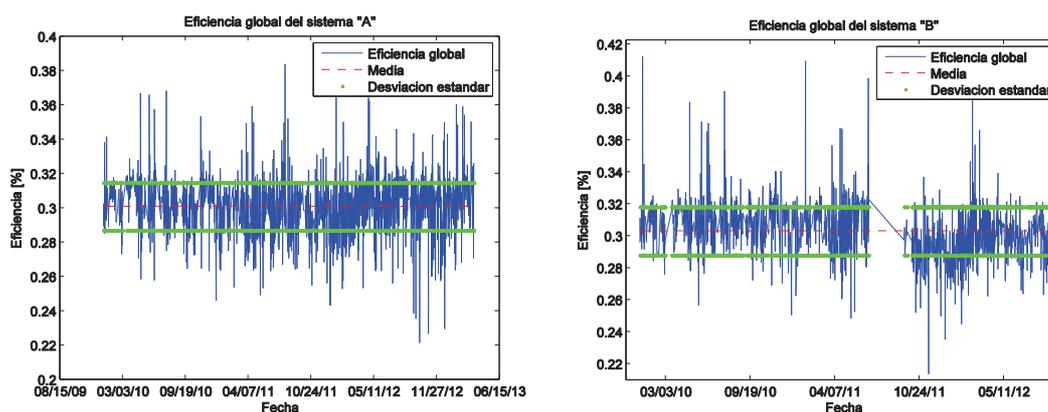
Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

De los gráficos de distribución podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La mayor concentración de datos se encuentra entre 12 y 17 MW para la Potencia Activa de la Turbina B. En el eje y el rango de mayor concentración es de 29 a 32%.

- Se tiene un campo de color en forma de elipse alargada con los puntos de concentración más importantes en el centro de la elipse. En el caso de la Turbina B, no se observa una concentración puntual más bien la distribución es uniforme, por lo que la zona de concentración máxima es 14 a 16 MW con una eficiencia del 31 al 32 %.

En términos de operación las zonas de trabajo de la turbina identificadas anteriormente tienen un valor de eficiencia bueno en comparación con la media aritmética 30% y el valor nominal de 37% (García, 2013). Por lo tanto ya que estas zonas corresponden a la concentración de la mayoría de casos de operación, la eficiencia de la turbina se ha mantenido dentro de un rango aceptable.



*Figura 63. Serie de tiempo de la eficiencia global de la Turbina “A” y Turbina “B”.*

Realizado por: Juan Fernando Vera

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

Además si se considera la serie de tiempo de la eficiencia global del sistema (Figura 63) se observa que los valores oscilan por sobre y por debajo de un valor constante que corresponde con la media aritmética de todo el intervalo de tiempo.

*Tabla 15. Rango de eficiencias globales y su probabilidad de ocurrencia*

<b>Eficiencia(%)</b>	<b>Ocurrencia(%)</b>
24-26	0.63
26-28	5.55
28-30	36.4
<b>30-32</b>	<b>53.2</b>
32-34	3.22
34-36	0.63
36-38	0.21

Realizado por: Clara Orellana

Fuente: Repsol (Registro de Operaciones), 2013

La mayor cantidad de datos de eficiencia se encuentran en el rango de 30-32% (Tabla 15).

### **5.11. Discusiones**

Antes que nada se debe verificar la similitud de la Turbina A y la Turbina B, como se puede apreciar en la Figura 42 y Figura 43, tienen prácticamente el mismo comportamiento de la eficiencia global en función del tiempo.

Si se desea aumentar la eficiencia global del sistema, la primera condición a cumplir es aumentar la carga de las turbinas es decir dedicar un porcentaje mayor de generación a las turbinas cuando las condiciones de operación lo permitan. De lo que se pudo apreciar en la operación del campo, este principio se aplicaría en los casos que se tengan un valor de generación total de la planta menor al máximo.

Para la operación de las turbinas en conjunto es ideal que se tengan estas condiciones de operación:

- Operar las turbinas con el mismo valor de carga para no exigir a un equipo más que otro. Así se evita desgaste prematuro de un equipo y se puede

realizar un control termodinámico, control operacional y mantenimiento más eficiente y programado.

- Desde un punto de vista energético, si se opera a una turbina con un valor mayor o igual a 14 MW se tiene una eficiencia de 30 a 32 % pero si se maneja un valor por debajo de 14 MW para la segunda turbina se tiene una eficiencia de 30 a 28 %. Se puede decir que una turbina va a trabajar con una eficiencia por encima del valor medio pero la otra turbina va a trabajar con una eficiencia por debajo del valor medio. Entonces, dentro de una lógica de aumentar la eficiencia de los equipos no se estaría actuando en favor un aumento de la eficiencia energética de los equipos. La recomendación es mantener el mismo valor de exigencia para los dos equipos.
- La temperatura ambiente, como se vio en la sección 5.6. puede influir ligeramente en la eficiencia, a menor temperatura ambiente mayor es la eficiencia de la turbina y menor es el trabajo requerido para generar una misma potencia. Por lo tanto se debe procurar exigir al máximo al equipo en las horas en las cuales la temperatura ambiente sea más baja para aprovechar la eficiencia alta que se puede obtener con estas temperaturas. Por el contrario se debe disminuir la carga en turbinas en las horas de mayor temperatura ambiente porque aquí la eficiencia del equipo es menor.