

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.
Facultad de Ingeniería.
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA).

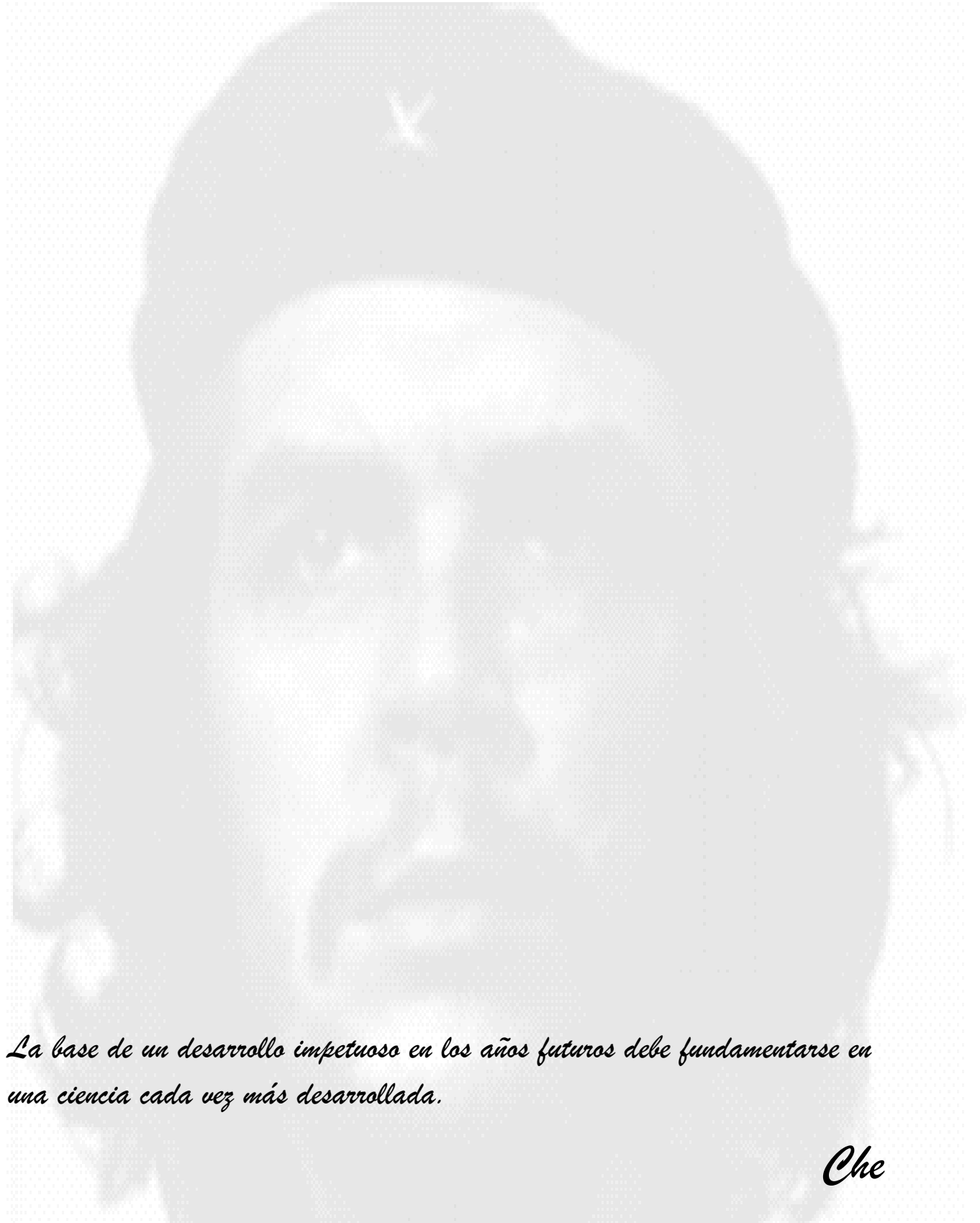
TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Determinación de los parámetros de mayor impacto en el consumo de energía para la toma de decisiones en los ventiladores de tiro forzado y bombas de circulación en la Central Termoeléctrica “Carlos M de Céspedes”.

Autor: Osmel Francisco Mencía Viota

Tutores: MSc. Marcos M. Consuegra Urquiza.
Dr. José P. Monteagudo Yanes.

Junio 2015



La base de un desarrollo impetuoso en los años futuros debe fundamentarse en una ciencia cada vez más desarrollada.

Che

Dedico este trabajo de diploma a mi familia por todo su apoyo incondicional y a todas las personas que me ayudaron en su confección en la Central Termoeléctrica Carlos M. de Céspedes.

Agradecimientos:

- A mi familia por apoyarme incondicionalmente en todo desde el principio.
- A técnicos y especialistas del departamento de producción de la E.T.E Carlos M. de Céspedes por toda la información brindada para la realización de este trabajo.
- A todos los que de una forma u otra me han ayudado en el transcurso de esta tesis.
- A mis tutores Dr. José P. Monteagudo Yanes y especialmente a Marcos Consuegra Urquiza quien estuvo siempre para orientarme y responder todas mis dudas.

Resumen:

Un estudio de las características de los equipos que inciden en el insumo de energía de la centrales térmicas muestra que después de las bombas de agua alimentación (B.A.A) con alrededor de un 48% del insumo de energía total, los ventiladores de tiro forzado (V.T.F) y las bombas de circulación (B.C) son los equipos de mayor insumo eléctrico con un 33 %. El estudio del comportamiento del consumo de energía y del factor de insumo de energía de estos equipos en la unidad 4 de la Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” durante los últimos cinco años de explotación ha permitido detectar anomalías en dicho comportamiento.

Se usa el método de estadística multivariada de componentes principales para determinar los parámetros más influyentes en el consumo de energía del sistema de aire - combustión y sistema de circulación. Los resultados principales del trabajo pueden resumirse en una reducción al 47% el número de variables a estudiar.

Las variables más influyentes son: presión de descarga de los VTF; presión de aire de entrada y salida al calentador de aire regenerativo; presión del aire en la caja a quemadores y el flujo de aire para la combustión; por ciento de apertura de las compuertas de regulación de los ventiladores, las temperaturas de las chumaceras del motor y del ventilador de tiro forzado y las presiones diferenciales de las secciones del condensador.

El conocimiento de estas variables permite conocer su influencia en las variaciones del consumo de energía y tomar medidas para su reducción.

Abstract:

A study of the characteristics of the equipment that impact in the input of energy of the thermal centers shows that after the bombs of water feeding (B.A.A) with around 48% of the input of total energy, the fans of forced shot (V.T.F) and the circulation bombs (B.C) are the equipment of more electric input with 32%. The study of the behavior of the energy consumption and of the factor of input of energy of these equipment's in the 4th unit of the Thermoelectric Company "Carlos Manuel de Céspedes" during the last five years of exploitation has allowed to detect anomalies in the behavior of the input factor and of the energy consumption.

The multi variability method of main components of statistical analysis is used to determine the most influential parameters in the consumption of energy of the system of air - combustion and circulation system. The main results of the research can be summarized in a reduction to a 47% of the number of variables to be studied.

The most influential variables are: discharge pressure of the VTF; entrance and exit air pressure to the heater of regenerative air; the air pressure in the box to burners and the flow of air for the combustion; percent of opening of the floodgates of regulation of the fans and temperatures of the smokestack of the motor and the fan of forced shot.

The knowledge of these variables allows to know its influence in the energy overconsumption and to assume measures for its reduction.

Listado de sigla:

Siglas: Descripción

ACP: Análisis de componentes principales.

BAA: Bomba de agua de alimentar.

BC: Bomba de circulación.

CAR: Calentador de aire regenerativo

CMC: Carlos Manuel de Céspedes.

CP: Carga promedio.

CTE: Central termoeléctrica

CTR: Línea central.

ETE: Empresa Termoeléctrica.

FI: Factor de insumo de energía.

LCI: Línea de control inferior.

LCS: Línea de control superior.

SC: Soplado caliente.

VEDLL: Ventilador enfriador del detector de la llama.

VRG: Ventilador recirculación de gases

VTF: Ventilador de tiro forzado.

Listado de Símbolos:

$\bar{x}$: Media de una muestra.

μ : Media de una población.

k: Distancia de los límites de control.

n: Tamaño de una muestra.

rpm: Frecuencia de rotación.

s: Desviación estándar de una muestra.

w : Muestra estadística.

η : Eficiencia.

σ : Desviación estándar.

Q: Flujo

p: Presión

N: Potencia.

H: Carga de la bomba.

Índice:

Introducción:.....	1
Capítulo 1. Generalidades de la Investigación.	3
1.1 Plantas termoeléctricas.	3
1.2 Características del insumo de energía en las plantas térmicas de Cuba y el mundo.	4
1.3 Equipos que mas inciden en el consumo de energía en plantas térmicas de Cuba y el mundo.....	6
1.4 Características técnicas de los ventiladores de tiro forzado y bombas de circulación de Cuba y el mundo.	7
1.5 Características técnicas del sistema de aire de la CTE Carlos Manuel de Céspedes.	11
1.6 Características técnicas de las bombas de circulación de Cuba y el mundo. ..	12
1.7 Características técnicas del sistema de circulación de la CTE Carlos Manuel de Céspedes.	15
1.8 Componentes Principales.....	16
Conclusiones parciales del capítulo:	19
Capítulo 2.Comportamiento del consumo de energía eléctrica de los ventiladores de tiro forzado y bomba de circulación de la unidad 4 ETE CMC.	20
2.1 Monitoreo de procesos.....	20
2.2 Comportamiento de la carga promedio (CP) y el factor de insumo (FI) de energía generales de la planta desde (enero 2010-diciembre2014).	22
2.3 Equipos mayores consumidores de energía de la unidad 4.....	24
2.4Comportamiento histórico del consumo de energía de los VTF de la unidad 4.	25
2.5Comportamiento histórico de las bombas de circulación U-4 en el período.	27
Conclusiones parciales del capítulo:	29

Capítulo 3: Estudio de los factores del sistema que inciden en las variaciones del consumo de los VTF y B.C con el uso de estadística multivariada (componentes principales), tomando como caso de estudio la unidad 4.	31
3.1 Variables del Sistema de Suministro de Aire a Caldera que inciden en las variaciones del consumo de los VTF unidad 4 e influencia de las mismas en el período de tiempo estudiado.	31
3.2 Análisis de Componentes Principales del Sistema de aire.	33
3.2.1 Gráficos de control para los 7 componentes principales (PCOMP).	39
3.2.2 Comportamiento real de las variables más influyentes en las variaciones del consumo de energía de los VTF U - 4.	44
3.3 Variables del sistema de circulación que más inciden en las variaciones del consumo de energía de las bombas de circulación de la unidad 4 e influencia de las mismas en el período de tiempo estudiado.	50
3.3.1 Gráficos de control para los 2 PCOMP.	52
3.3.2 Comportamiento real de las variables más influyentes en las variaciones del consumo de energía de las bombas de agua de circulación.	53
3.4 Medidas a tomar en función de los resultados obtenidos.	55
Conclusiones parciales del capítulo:	56
Recomendaciones:	60
Bibliografía.	61

Introducción:

En la actualidad en la producción de energía eléctrica, las plantas térmicas siguen ocupando un papel predominante a pesar del desarrollo de fuentes renovables y otras formas de energía. Un aspecto poco tratado en la literatura actual es el consumo de los equipos auxiliares asociados a la generación de dichas plantas, llamado insumo de energía eléctrica o consumo propio de una planta térmica.

Los equipos auxiliares en una central térmica convencional consumen entre el 4 y el 7% de la generación bruta total. Las bombas de agua de alimentar (BAA), los ventiladores de tiro forzado (VTF) y las bombas de circulación (BC) consumen aproximadamente el 80 % de la energía empleada en dicho proceso tecnológico por lo que constituyen los equipos asociados a sus sistemas que requieren un mayor control. Los ventiladores de tiro forzado pueden llegar a consumir alrededor del 1,5% y las bombas de circulación hasta un 1% de dicho consumo. En la actualidad se viene presentando una tendencia lineal al aumento de estos indicadores en estos equipos de la E.T.E “Carlos Manuel de Céspedes” en las unidades 3 y 4 de fabricación Hitachi producto del desgaste por más de 30 años de explotación.

En la Termoeléctrica Carlos M. de Céspedes las BAA trasiegan 325,8 m³/h a 15 MPa con una demanda de potencia de 1 850 kW, los VTF transportan 8 940 m³/min de aire, con una presión de descarga de 0,008 MPa y una demanda de potencia de 1 100 kW y las BC 13 300 m³/h de agua de mar a una carga de 0,08 MPa y una potencia de 450 kW, según los datos de chapa de los equipos.

El consumo de energía de estos equipos es significativo y por su peso incide directamente en el cumplimiento de los indicadores de eficiencia de la planta. Un incremento en el consumo de energía de estos equipos, para una producción dada, hace que se eleve el factor de insumo (FI) de la planta y un ligero crecimiento de este indicador es representativo, baste señalar por ejemplo, que si el FI crece en 1,5 % representa dejar de entregar a la red una energía equivalente al consumo de 5 315 viviendas.

El uso de técnicas estadísticas permite detectar con rapidez cuales son los parámetros que más influyen en las variaciones del consumo de energía con el objetivo de realizar mantenimientos efectivos según el estado técnico del equipo y disminuir los

sobreconsumos y el impacto medio ambiental asociado a la quema de combustible fósiles. Además permite realizar un pronóstico a corto y mediano plazo del comportamiento del consumo en estos equipos.

Problema: El consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado y las bombas de circulación de la unidad 4 de la central termoeléctrica Carlos M. de Céspedes presenta variaciones por causa no determinadas en el período de análisis.

Hipótesis: El uso de herramientas de estadística multivariada permitirá determinar que parámetros de los sistemas de aire y de circulación en la unidad 4 cambian su comportamiento cuando varía el consumo de energía eléctrica en los mismos.

Objetivo general: Determinar los parámetros más influyentes en el consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado y de las bombas de circulación de la unidad 4 con el uso de estadística multivariada para la toma de decisiones.

Objetivos específicos:

1. Estudiar los sistemas de suministro de aire y de agua de circulación de las plantas térmicas y las características técnicas de estos equipos según diferentes tipos de fabricantes.
2. Estudiar el comportamiento en los últimos cinco años del consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado y de las bombas de circulación de la unidad 4 Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”
3. Determinar los parámetros más influyentes en las variaciones del consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado y las bombas de circulación de la unidad 4 con el uso de la técnica componentes principales de estadística multivariada.

Capítulo 1. Generalidades de la Investigación.

1.1 Plantas termoeléctricas.

Se denominan plantas termoeléctricas clásicas o convencionales aquellas plantas que producen energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, fuel-oíl o gas en una caldera diseñada al efecto. El apelativo de "clásicas" o "convencionales" sirve para diferenciarlas de otros tipos de plantas termoeléctricas (nucleares y solares, por ejemplo), las cuales generan electricidad a partir de un ciclo termodinámico, pero mediante fuentes energéticas distintas de los combustibles fósiles empleados en la producción de energía eléctrica desde hace décadas y, sobre todo, con tecnologías diferentes y mucho más recientes que las de las plantas termoeléctricas clásicas. Independientemente de cuál sea el combustible fósil que utilicen (fuel-oíl, carbón o gas), el esquema de funcionamiento de todas las plantas termoeléctricas clásicas es prácticamente el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varían según sea el tipo de combustible empleado. Una planta termoeléctrica clásica posee, dentro del propio recinto de la planta, sistemas de almacenamiento del combustible que utiliza (parque de carbón, depósitos de fuel-oíl) para asegurar que se dispone permanentemente de una adecuada cantidad de éste. Si se trata de una planta termoeléctrica de carbón (hulla, antracita, lignito,...) es previamente triturado en molinos pulverizadores hasta quedar convertido en un polvo muy fino para facilitar su combustión. De los molinos es enviado a la caldera de la planta mediante chorro de aire precalentado. Si es una planta termoeléctrica de fuel-oíl, éste es precalentado para que alcance mayor fluidez siendo inyectado posteriormente en quemadores adecuados a este tipo de combustible. Si es una planta termoeléctrica de gas los quemadores están asimismo concebidos especialmente para quemar dicho combustible. Hay, por último, plantas termoeléctricas clásicas cuyo diseño les permite quemar indistintamente combustibles fósiles diferentes (gas y fuel-oíl) (Rizhkin, 1987).

En la figura 1.1 se muestra el esquema elemental de una planta termoeléctrica convencional.

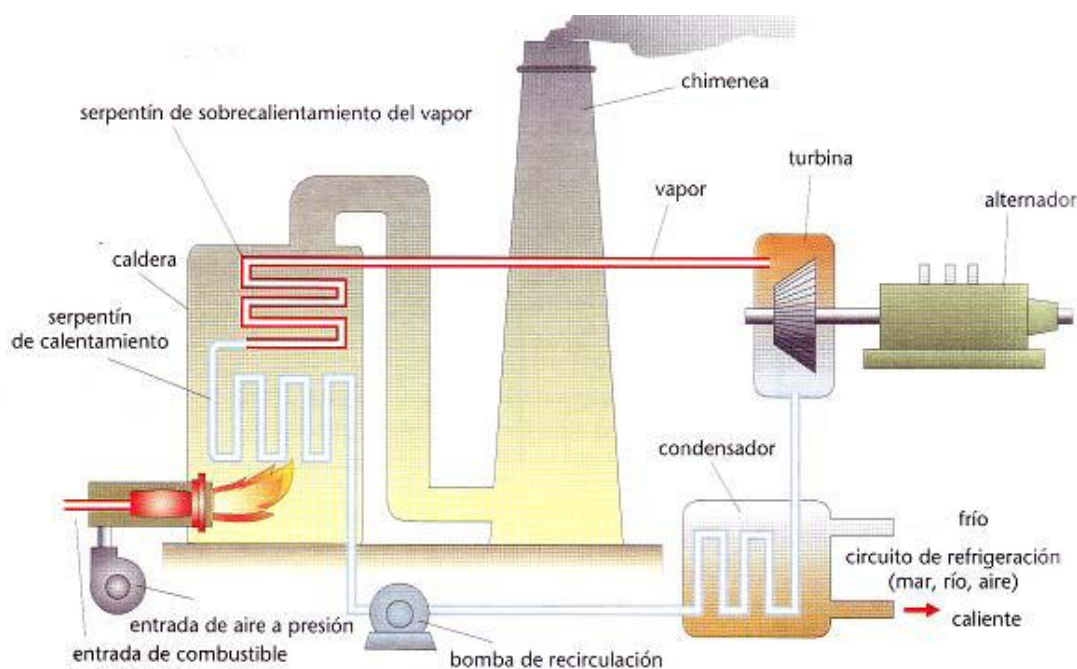


Figura 1.1. Esquema elemental de una Central Térmica(González, 2011).

1.2 Características del insumo de energía en las plantas térmicas de Cuba y el mundo.

Un aspecto de estas plantas menos tratado ha sido el uso eficiente de la energía eléctrica utilizada como insumo en sus sistemas auxiliares, aspecto del cual no hay reportes en la literatura especializada en los últimos años.

Parte de la energía eléctrica producida en la central eléctrica se consume en la realización del proceso tecnológico de transformación de la energía dentro de la propia central (preparación del combustible, suministro de aire, evacuaciones de los gases de combustión, suministro de agua de alimentación y de refrigeración, etc.), esta parte constituye del 4 al 6 % de la energía producida, o cerca de un 1,5 al 2,5 % del valor gastado (Rizhkin, 1987).

En las plantas de energía que utilizan carbón como materia prima el consumo de energía auxiliar es aproximadamente de un 5 a un 8%, mientras que en un ciclo combinado el consumo auxiliar de energía está en el rango de un 2 a un 5% de la capacidad de generación real(Ravaf, 2012).

Otros reportes recientes, como por ejemplo el de la empresa Iberdrola, muestran que el consumo de energía en porcentaje para producir un GWh es variable en función de la

tecnología y para el caso de las plantas térmicas convencionales está en el orden del 7,15%, ver figura 1.2.

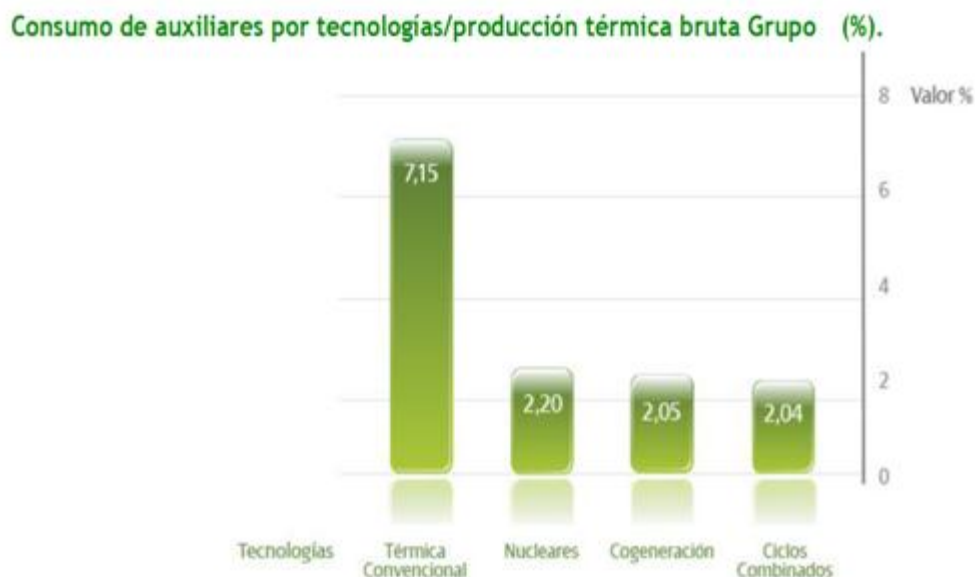


Fig. 1.2 Porcentaje de electricidad en auxiliares de plantas de generación por tecnologías(Iberdrola, 2012).

En la figura 1.3 se muestran la CP (carga promedio) actual y el FI (consumo de energía/MWh generado) asociado de algunas de las plantas que en estos momentos se encuentran generando en Cuba.

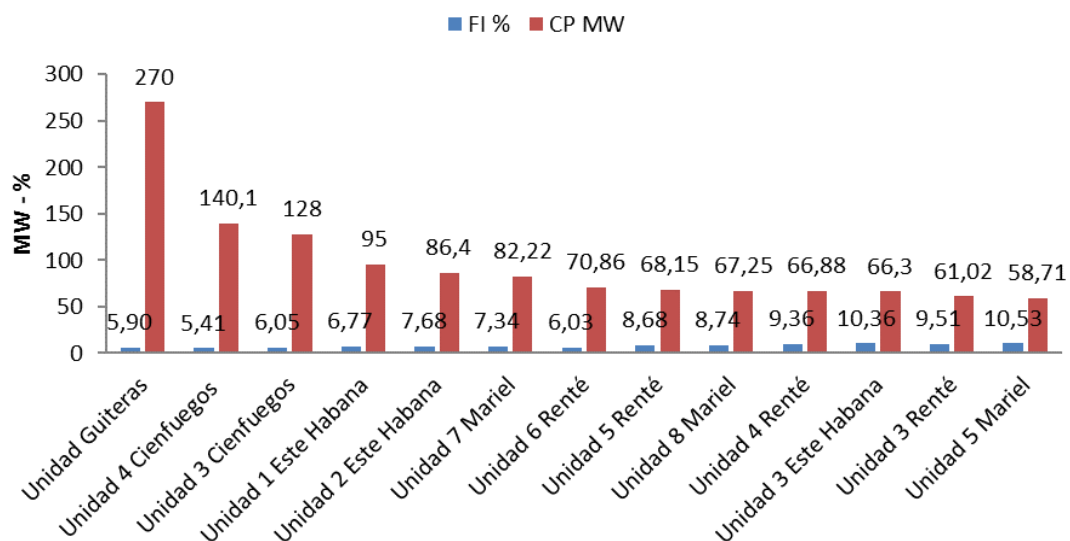


Fig. 1.3 Características de las carga promedio y del factor de insumo de energía asociado de las ETE de Cuba (García, 2013).

Como se puede observar la de mayor carga promedio es Guiteras (tecnología francesa) dicha unidad es la más grande que tiene el país en estos momentos y de 330 MW que es su capacidad máxima está generando 270 MW como promedio para un FI de 5,9 de 5,2 normado según diseño. La de menor carga promedio es la unidad 5 de Mariel con 58,71 MW para el mayor factor de insumo con 10,53. Las unidades 5 del Mariel, 3 de Renté, 3 de Este Habana, 4 de Renté, 8 del Mariel, 5 de Renté, 7 del Mariel y 2 de Este Habana presentan valores de FI fuera del rango considerado como bueno en la literatura de un 4 a un 7 %. La unidad 4 de Cienfuegos es la de menor factor de insumo con 5,41% luego de la modernización efectuada en el 2009 y es una de las que controla la frecuencia del sistema electro-energético nacional.

1.3 Equipos que mas inciden en el consumo de energía en plantas térmicas de Cuba y el mundo.

Las bombas de agua de alimentar (BAA), los ventiladores de tiro forzado (VTF) y las bombas de circulación (BC) consumen aproximadamente el 80 % de la energía empleada en dicho proceso tecnológico por lo que constituyen los equipos asociados a sus sistemas que requieren un mayor control. Teniendo en cuenta que $FI = \text{Consumo de energía (MWh)} / \text{Generación Bruta (MWh)}$, aumentos del FI denotan aumento del consumo de energía de los equipos que más influyen en el FI.

Un incremento en el consumo de energía de estos equipos, para una producción dada, hace que se eleve el factor de insumo (FI) de la planta y un ligero crecimiento de este indicador es representativo.

Los parámetros de trabajo de las BAA de los generadores de vapor en dependencia de la capacidad de generación se encuentran entre los límites de: 65...900 m³/h de flujo; 3,9...29,4 MPa de carga; 108...6 360 kW de potencia y eficiencias en el orden del 65...82 %. Los VTF manejan caudales de 4,5...900 mil m³/h y unas presiones de más de 9,8 MPa, con eficiencias en el orden del 88 %. Las BC bombean grandes flujos con bajas presiones: de 1 700 a 16 300 m³/h y de 0,039 a 0,27 MPa, con potencias en el rango de 71 a 10 000 kW, velocidades de 250 a 960 rpm y eficiencias del 80 al 88%.

En la Termoeléctrica Carlos M. de Céspedes las BAA bombean 325,8 m³/h a 15 MPa con una potencia de 1 850 kW, los VTF 8 940 m³/min con una presión de descarga de

0,008 MPa a 1 100 kW y las BC 13 300 m³/h a 0,08 MPa de altura con 450 kW, según los datos de chapa de los equipos.

1.4 Características técnicas de los ventiladores de tiro forzado y bombas de circulación de Cuba y el mundo.

Para las calderas de las centrales termoeléctricas se fabrican cerca de 50 dimensiones tipo de ventiladores y aspiradores de humo con caudales de 4,5...900 mil m³/h y unas presiones de más de 9 810 Pa (1 000 mmH₂O) (Cherkasski, 1986).

Los ventiladores de las CTE, según su destinación, se dividen en los siguientes números(Rizhkin, 1987):

- 1) ventiladores sopladores.
- 2) ventiladores de molino.
- 3) ventiladores de soplado caliente.
- 4) aspiradores de humo principales.
- 5) aspiradores de humo de recirculación.

Los ventiladores sopladores (VS) funcionan con un aire con $T \leq 293$ K, suministrándolo por un sistema de tuberías a través de un calentador de aire a la cámara de combustión del hogar. Este aire se llama primario a diferencia del secundario, que se suministra junto con el combustible(Rizhkin, 1987).

Los ventiladores de soplado caliente (SC) funcionan con aire calentado hasta 473...673K. Los ventiladores de molino (M) se emplean en los sistemas de preparación del polvo y se suministra una mezcla de aire secundario caliente con polvo de carbón a través de quemadores a la cámara de combustión del hogar. Los aspiradores de aire transportan los gases con hollín por los gasoductos de la caldera y la chimenea y junto con esta última vencen la resistencia de esta vía y del sistema de separación de cenizas(Rizhkin, 1987).

Los aspiradores de humo de recirculación (VRG) se emplean para la toma de una parte de gases con hollín de los conductos de gas de la caldera y su suministro a la cámara de combustión del hogar con el fin de disminuir la formación de escoria, regular la temperatura de recalentamiento del vapor y de elevar la economía general del grupo.

Los ventiladores sopladores, que funcionan con aire frío, se hacen con paletas volumétricas perfiladas, dobladas hacia atrás, es decir, $\beta_{2p} < 90^\circ$. El rendimiento de estos ventiladores alcanza un 88%(Cherkasski, 1986).

Las condiciones de funcionamiento de los ventiladores de soplado, y particularmente de los ventiladores de molino y los aspiradores de humo están complicadas por la influencia de alta temperatura del medio que se desplaza y por la presencia de polvo de carbón o arrastre (cenizas, partículas de escoria de distinto tamaño) en él. La alta temperatura del gas que se desplaza provoca el calentamiento del rotor y del árbol de la máquina(Rizhkin, 1987).

Esto conduce al recalentamiento de los cojinetes y a la disminución de su plazo de servicio. Por esta razón los ventiladores de soplado caliente y los aspiradores de humo se hacen con cojinetes refrigerados. El método más simple de refrigeración de los cojinetes consiste en que en el baño de aceite del cuerpo del cojinete se introduce un serpentín tubular, que deja pasar el agua fría. El aceite que se calienta en el cojinete escurre al baño, extrayendo de este modo el calor del cojinete y refrigerándolo(Rizhkin, 1987).

En los ventiladores de soplado caliente y aspiradores de aire de gran potencia este método de refrigeración resulta insuficiente, y en estos casos se emplea el enfriamiento separado: el aceite lubricante se vierte ininterrumpidamente de los cuerpos de los cojinetes a un tanque, que sirve para recoger y sedimentar el aceite; del tanque de aceite se toma con ayuda de bombas de engranajes o de otro tipo y se suministra, a través de un filtro y un enfriador tubular, a presión a los cojinetes de la máquina. Los elementos principales del sistema de refrigeración (bombas, filtros y enfriadores) se duplican con el fin de una fiabilidad completa(Rizhkin, 1987).

En los aspiradores de aire, que suministran gas que contiene pequeñas partículas abrasivas de ceniza y escoria, y en los ventiladores de molino, que suministran una mezcla de aire con polvo de carbón, tiene lugar un desgaste intensivo de las superficies interiores del cuerpo y del rotor. En este caso, a consecuencia de la simetría del suministro de rotores se desequilibran y pierden su resistencia, se reducen los plazos entre las reparaciones y disminuye la economía del funcionamiento de la instalación. Las medidas contra el desgaste abrasivo se prevén en la estructura de la máquina y en

su composición con los conductos de gas empleando chapas protectoras reemplazables de metal duro(Rizhkin, 1987).

El desgaste de los aspiradores de humo y de los ventiladores de molino depende esencialmente de la frecuencia de rotación. Para el funcionamiento con el caudal y la presión dados es deseable emplear menor frecuencia de rotación. En este caso se aumentarán las dimensiones de la máquina. El trabajo de rozamiento de las partículas abrasivas se distribuirá sobre una superficie mayor y el desgaste será menos intensivo(Rizhkin, 1987).

Al pasar gas polvoriento a través del rotor el flujo cambia de dirección de la axial a la radial y las partículas sólidas, bajo la influencia de las fuerzas centrífugas, se precipitan sobre el casquillo y el disco principal, desgastándolos poco a poco.

El rotor del ventilador con paletas de anchura variable, montado sobre la consola del árbol, se coloca en un cuerpo espiral soldado, que se fija sobre el cimiento, separadamente del motor eléctrico y del bloque de cojinetes. En el embudo de entrada, que asegura la variación gradual de la velocidad del flujo al suministrarlo al rotor, se fija la polea del aparato guía, que regula el caudal.

Los parámetros principales de los ventiladores de este tipo para los diámetros del rotor $D_2=600\ldots 2000$ mm son: $Q=4\ 400\ldots 200\ 000$ m³/h; $H=97\ldots 610$ mmH₂O; $N=173\ldots 590$ kW; $\eta=67\ldots 70\%$; $n=750\ldots 1430$ r.p.m.

Estructura de un aspirador de humo de aspiración bilateral. El rotor va encajado sobre el árbol hueco, que se apoya sobre los cojinetes, sacados del flujo de gas. El suministro de los gases con hollín al rotor se realiza a través de las bolsas laterales y los embudos cónicos de entrada, en los cuales van dispuestos los aparatos guías de tipo axial. Los diámetros de los rotores de los aspiradores de humo de este tipo $D_2=1\ 800\ldots 2600$ mm.

Los parámetros principales son: $Q=240\ 000\ldots 500\ 000$ m³/h; $H=150\ldots 350$ mmH₂O; $N=120\ldots 585$ kW; $n=735$ r.p.m.; $\eta=0,83$. (Cherkasski, V, M., 1986)

En la figura 1.4 se puede observar el rango de trabajo de los ventiladores industriales para plantas térmicas ofrecidos por la empresa FlaktWoods en la actualidad. Se destaca un incremento en la eficiencia comparado con los construidos por los soviéticos en el 1984.

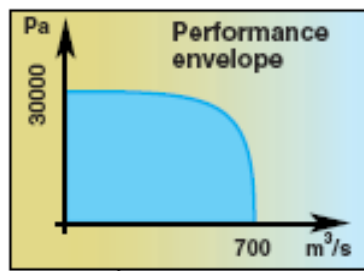


Fig. 1.4 Rango de trabajo de los ventiladores FlaktWoods para pantas térmicas con un 92 % de eficiencia(FlaktWoods, 2014)

Tabla 1.1 Ventiladores de Tiro Forzado de las CTE de Cuba. (Los datos espacios en blanco indican que los datos correspondientes no fueron encontrados) (García, 2013).

	ETE	Cfgos	Felton	Renté		Mariel	Guiteras	Santa Cruz del Norte	
		VTF	VTF	VTF	VTI	VTF	VTF	VTF	VTI
Año		1977		1967	1967	1977	1988	2003	2003
Potencia de la unidad de generación (MW)		158	250	100	100	100	330	100	100
País de Origen		Japón		URSS	URSS	URSS	Francia	URSS	URSS
Ventilador	Flujo x10 ³ (m ³ /h)	28,8	32,4	20,6	32,5	19	47,7	21	32,5
	Presión de descarga (mmH ₂ O)	1 029	850	684	331	684	830	684	331
	Potencia (kW)	1 100	1 825	630/320	630/320	630	1 544	630/320	630/320
	Eficiencia					0,856	0,9		
	rpm	1 200	1 193	900/720	900/720	900	1 180	900/720	900/720
Motor	Potencia (kW)	1 100	2 000	630/320	630/320	630	1 544	630/320	630/320
	Eficiencia			0,92	0,92		0,9		
	rpm	1 200	1 193	900/720	900/720	900	1194	900/720	900/720
	Amperaje (A)		232	76/46	76/46	74	305	76/46	76/46
	Voltaje (V)	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000

Los VTF instalados en las principales CTE de Cuba manejan caudales entre 193 000 y 486 720 m³/h con potencias entre los 630 y 1 544 kW, estos últimos no encontrados en

la literatura consultada. Problemas en el estado técnico de los mismos afectarían considerablemente el FI de una planta térmica.

1.5 Características técnicas del sistema de aire de la CTE Carlos Manuel de Céspedes.

Las calderas de las unidades 3 Y 4 de la termoeléctrica "CMC" son de fabricación japonesa, están encargadas de suministrar el vapor para alimentar los turbogeneradores de 158 MW; son de domo simple y de circulación natural de agua, diseñadas para usar petróleo como combustible. Estos generadores están diseñados para mantener una alta eficiencia con la menor pérdida de calor debido al bajo exceso de aire, una combustión total del petróleo, la hermeticidad en la construcción de las paredes de agua y un suficiente aislamiento térmico (Domenech, 1978).

El sistema de aire para la combustión consta de dos ventiladores de tiro forzado, encargados de suministrar el aire para la combustión garantizando siempre un exceso de aire que evite la combustión incompleta y asegurar además la circulación de los gases y su expulsión por la chimenea, teniendo en cuenta que esta es una caldera presurizada y por tanto no posee ventiladores de tiro inducido (Domenech, 1978).

El aire de la descarga de los ventiladores pasa por precalentadores de aire y los CAR donde adquiere la temperatura adecuada y de allí a la caja de aire para su distribución a cada quemador. Un conducto situado en la descarga de los VTF garantiza el aire a los diferentes consumidores de la caldera. Con el fin de proteger los metales de los calentadores de aire regenerativo de la corrosión a baja temperatura provocada por la presencia de ácido sulfúrico en los gases de la combustión, se equipa la caldera con 2 precalentadores de aire. El calentador de aire de tipo regenerativo, es un medio de calefacción indirecta, en el cual una masa adecuada (una estructura sirve de cuerpo intermedio de almacenamiento de calor), es térmicamente regenerada por el paso de los productos de la combustión calientes, después que ha sido enfriada por la corriente de aire (Domenech, 1978).

Debido a que el horno de la caldera es presurizado, o sea, trabaja a una presión mayor a la atmosférica es necesario evitar las fugas de gases contaminantes al exterior de la caldera. La presión de aire de sellaje es controlada por una compuerta de compensación ubicada en la descarga de los VTF (Domenech, 1978).

El aire de sellaje es llevado a los siguientes lugares(Domenech, 1978):

- Al piñón del eje de los CAR, motor de aire de los CAR, soplete de hollín de los CAR
- A los de inspección de la pared lateral izquierda y derecha.
- Al vestíbulo de la caldera.
- A los diez sopletes de la caldera.
- Al conducto de descarga del VRG para proteger la tolva del horno.
- Para sellar el eje del VRG.
- A la succión de los ventiladores de enfriamiento del detector de llama (VEDLL).



Figura 1.5 Ventilador de tiro forzado 4B ETE Carlos Manuel de Céspedes.

Las características técnicas de VTF de la ETE CMC se observan en la tabla 1.1.

1.6 Características técnicas de las bombas de circulación de Cuba y el mundo.

En los sistemas de abastecimientos de agua de refrigeración de los condensadores de la CTE se emplean bombas con gran caudal y una carga de presión relativamente baja de los tipos siguientes: verticales (axiales y centrífugas) y horizontales (Cherkasski, 1986).

Los parámetros de las bombas axiales que se producen son: $Q = 1\,700 \dots 16\,300 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 0,039 \dots 0,27 \text{ MPa}$; $N = 71 \dots 10\,000 \text{ kW}$; $\text{rpm} = 250 \dots 960$; $\eta = 80 \dots 88\%$ (Cherkasski, 1986).

Hitachi ha montado miles de unidades térmicas en Japón y el resto del mundo, las características técnicas de dos bombas de agua de circulación montadas en años recientes se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Características técnicas de 2 bombas de agua de circulación suministradas por Hitachi (Hitachi, 2014).

Ciente:	Unidad japonesa de 600 MW.	Planta Wangqu, 2 x 400 MW
Tipo:	Tipo: Álabes ajustables, árbol vertical, flujo mixto.	Árbol vertical, flujo mixto.
Velocidad de descarga (m^3/s):	28, 3	9,25
Carga Total (m) :	23	25
Velocidad (rpm):	273	375
Potencia del motor (kW)	3 950	2 850
Año de suministrada:	2004	2005

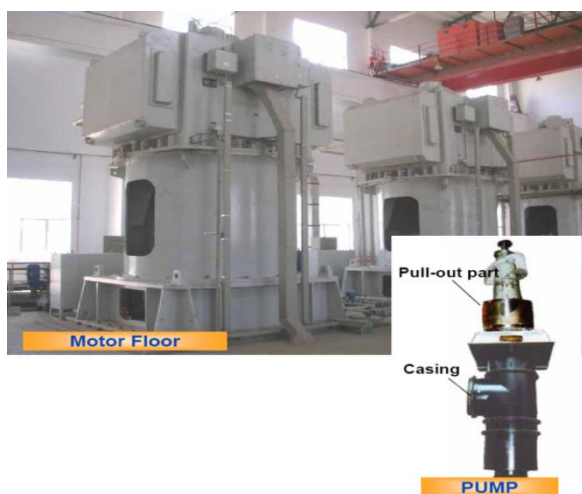


Fig. 1.6 Bombas de circulación suministradas por Hitachi para una planta térmica de 600 MW (Hitachi, 2012).

En la figura 1.7 se muestran bombas de agua de circulación propuestas por Hitachi para una planta térmica de 1 000 MW.



Fig. 1.7 Bombas de agua de circulación para una planta térmica de 1 000 MW propuesta por Hitachi (Hitachi, 2012).

Cada bomba está construida de acero inoxidable altamente resistente a la corrosión y la potencia del motor es de 3 800 kW.

Tabla1.3 Bombas de Circulación de las CTE de Cuba. (Los datos espacios en blanco indican que los datos correspondientes no fueron encontrados) (Pernús, 2013)

		ETE	Cienfuegos	Felton	Renté	Mariel	Guiteras	Santa Cruz del Norte
		Año	77			77	88	
		Potencia Unidad (MW)	158	250	100	100	330	100
		Nacionalidad	Japonesa			Rusa	Francia	Rusa
Bomba	Flujo (m ³ /h)		13 300	18 000	8 640 – 12 960	8 640 – 12 960	20 342	8 680-12 960
	Pr. de Descarga (MPa)		0,08	0,13	8	0,08	0,14	0,08
	Potencia (kW)		450	700	630	630	793	550
	Eficiencia		0.88			0.83	0.9	0.86
	rpm		440		600	585	385	585
Motor	Potencia (kW)		450	700	630	630	1000	630
	Eficiencia (%)		92.6				0.9	
	rpm		440	445	600	630	1789	600
	Amperaje (A)		62	91	64	83	111.5	78
	Voltaje (V)		6000	6 000	6 000	6 000	6000	6 000

Tabla 1.4 Características técnicas Bombas de circulación propuesta por TEAMS ENGINEERING (BEIJING) CO., LTD para modernización en ETE Cienfuegos Unidad 3(Vázquez, 2015).

Bomba	Modelo	SEZN1200-990/850
	Marca	KSB
	flujo(m ³ /h)	13300
	Altura(m)	9
	rpm	445
	Frecuencia(Hz)	60
	Eficiencia (%)	85,3
Motor	Modelo	YLKK630-16
	Marca	CNE nanyang
	Potencia	450KW
	Voltaje nominal(V)	6000
	rpm	445
	Frecuencia(Hz)	60

La bomba propuesta por TEAMS ENGINEERING (BEIJING) CO., LTD para modernización en ETE Cienfuegos Unidad 3 presenta características de diseño similares a la instalada en estos momentos pero con una menor eficiencia.

1.7 Características técnicas del sistema de circulación de la CTE Carlos Manuel de Céspedes.

La función del sistema de agua de circulación consiste en extraer el calor entregado por la turbina al condensador principal durante la operación a cualquier carga, desde la mínima a la máxima (Domenech, 1978).

Este sistema cuenta con dos bombas de circulación que impulsan el agua de mar a través de las dos mitades del condensador. Además existen ramificaciones desde las tuberías de agua de circulación hasta la parte de los tubos de los enfriadores de agua de enfriamiento y viceversa. O sea, el agua de circulación es también empleada para enfriar el agua del circuito de enfriamiento (Domenech, 1978).

Las bombas de circulación son del tipo vertical, de simple etapa y flujo mixto, con el impelente y el orificio de succión sumergido en el agua de la cámara de succión (Domenech, 1978).

El empuje axial de la bomba, así como el peso de la parte rotatoria, es soportado por la chumacera de empuje situada en la parte superior del motor(Domenech, 1978).

El condensador por la parte de agua de mar está formado por dos secciones divididas en dos partes que permiten la circulación organizada del agua de mar. Para garantizar su limpieza el condensador está dotado de un sistema de limpieza de bolas (Sistema technos en la unidad 3 y taprogge en la unidad 4) ambos de fabricación alemana(Domenech, 1978).



Figura 1.8.Bombas de agua de circulación E.T.E Carlos Manuel de Céspedes U#4.

1.8 Componentes Principales.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es ampliamente usado en la industria moderna de procesos para desarrollar modelos a partir de conjuntos de datos con un gran número de variables altamente correlacionadas, registradas en línea por medio de sensores situados en los procesos, ya sean continuos o por lotes(Hair,1999).

El procedimiento de ACP está diseñado para extraer k componentes principales de un conjunto de p variables cuantitativas X . Los componentes principales se definen como el conjunto de combinaciones lineales ortogonales de X que tienen la máxima varianza. El determinar los componentes principales se usa frecuentemente para reducir la

dimensionalidad de un conjunto de variables predictoras antes de utilizarlas en procedimientos tales como regresión múltiple o análisis de conglomerados. Cuando las variables están altamente correlacionadas, pocos de los primeros componentes pueden ser suficientes para describir la mayor parte de la variabilidad presente. Si el porcentaje de variabilidad explicado por dos componentes principales es alto (70%) se puede realizar una representación gráfica de las variables originales y de los individuos de la muestra que muestran algunas relaciones de correlación o semejanza entre ellos. Aunque todas las variables originales entran en la composición de cada componente principal, algunas son más importantes que otras. Estas, las más importantes, determinan la naturaleza de cada componente (STATGRAPHICS, 2007) (Shlens, 2005).

Para su aplicación no se requiere el establecimiento previo de jerarquías entre las variables ni de la comprobación de la normalidad de la distribución de las variables (Ing. M.Cs. De la Torre Silva, 2009).

Para arrojar luz sobre la estructura de análisis de componentes principales, consideremos una matriz de datos multivariantes X , con n filas y p columnas. Los elementos k de cada fila son las puntuaciones o mediciones sobre un tema como la altura, peso y edad (NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013).

A continuación, se estandariza la matriz X de modo que cada media de cada columna es 0 y la varianza de cada columna 1. Esta matriz es llamada Z . Cada columna es un vector variable, Z_i , $i = 1, \dots, p$. La idea principal detrás del análisis de componentes principales es derivar una función lineal y para cada uno de los vectores variables z_i . Esta función lineal posee una propiedad extremadamente importante, su varianza se maximiza (NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013).

Esta función lineal se conoce como un componente de z . Para ilustrar el cálculo de un único elemento para el vector j -ésimo de y , si se considera el producto $y = zv'$ donde v' es un vector columna de V y V es la matriz de coeficientes $p \times p$, que lleva el elemento p de la variable z dentro de la derivada del elemento n de la variable y . V es conocida como la matriz de autovalores. La dimensión de z es $1 \times p$, la dimensión de v' es $p \times 1$. El álgebra escalar para la puntuación del componente para el i -ésimo individual de y_j , $j = 1, \dots, p$ es (NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013).

$$y_{ji} = v'1z1i + v'2z2i + \dots + v'pzpi \quad 1.1$$

Esto se convierte en notación matricial para todos los y:

$$Y = ZV \quad 1.2$$

La media de y es $\bar{y} = V'\bar{x}\bar{z} = 0$, porque $\bar{x}\bar{z} = 0$.

La matriz de dispersión de y es:

$$Dy = V'DzV = V'RV \quad 1.3$$

Ahora, se puede demostrar que la matriz de dispersión Dz de una variable estandarizada es una matriz de correlación. Por lo tanto R es la matriz de correlación para z .

El número de parámetros a estimar para una variable p-elemento es

p medias

p varianzas

$(p^2 - p) / 2$ covarianzas

para un total de $2p + (p^2 - p) / 2$ parámetros.

Así:

Si $p = 2$, hay 5 parámetros

Si $p = 10$, hay 65 parámetros

Si $p = 30$, hay 495 parámetros

Todos estos parámetros deben ser estimados e interpretados. Esa es una tarea ardua. Ahora, si se pudiera transformar los datos de modo que se obtenga un vector de variables no correlacionadas, todo sería más fácil, ya que no hay covarianzas.

Los componentes principales tienen dos ventajas principales:

1. Las nuevas variables son no correlacionadas.
2. Frecuentemente 1 o 2 componentes capturan la mayor variabilidad de los datos así que no hay que utilizar todos los componentes para el control (NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013).

Desafortunadamente hay una gran desventaja: Se pierde la identidad de las variables originales (NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013)

Conclusiones parciales del capítulo:

1. En la literatura consultada se evidencian pocos estudios relacionados con el insumo en plantas de generación existiendo coincidencia de que representa alrededor del 7% de la capacidad de generación de la planta.
2. En varias plantas termoeléctricas de Cuba, el consumo de los equipos auxiliares con relación a la energía producida supera el valor reportado en la literatura consultada para este tipo de plantas.
3. En Cuba, los equipos auxiliares manejan grandes flujos con elevadas potencias y tienen más de 30 años de explotación en la mayoría de los casos, lo que debe repercutir considerablemente en el incremento del insumo de energía de las plantas térmicas.
4. Los modelos de ACP (Análisis de componentes principales) son aplicados en la actualidad para la resolución de problemas en los procesos industriales con gran aceptación.

Capítulo 2.Comportamiento del consumo de energía eléctrica de los ventiladores de tiro forzado y bomba de circulación de la unidad 4 ETE CMC.

En este capítulo se realiza un estudio del comportamiento del factor de insumo de energía y la carga promedio asociadas de la unidad 4, particularizando en los ventiladores de tiro forzado y las bombas de circulación en un período de 5 años (enero 2010- diciembre 2014), con el objetivo de encontrar problemas de crecimiento en dicho factor de suma importancia para la ETE.

2.1 Monitoreo de procesos.

El concepto subyacente de control estadístico de procesos se basa en una comparación de lo que sucede hoy en día con lo sucedido anteriormente. Si se toma una instantánea de cómo el proceso se realiza normalmente o se construye un modelo de cómo se piensa que el proceso se realice, se puede calcular los límites de control para las mediciones esperadas de salida del proceso. Luego se recopilan los datos desde el proceso y se comparan con los límites de control. La mayoría de las mediciones deben caer dentro de los límites de control. Las medidas que quedan fuera de los límites de control se examinan para ver si pertenecen a la misma población de la muestra instantánea inicial o modelo. Dicho de otra manera, se utilizan datos históricos para calcular los límites de control iniciales. A continuación, los datos se comparan con estos límites iniciales. Los puntos que queden fuera de los límites se investigan y, tal vez, algunos podrán ser descartados. Si es así, los límites se vuelven a calcular y se repite el proceso (NIST - SEMATECH, 2013).

Los gráficos de control son usados para rutinariamente monitorear la calidad. Dependiendo del número de características del proceso hay dos tipos básicos de gráficos de control. El gráfico univariado de control es usado para ver el comportamiento de una sola variable y el gráfico de control multivariado representa el comportamiento de más de una variable, las características básicas de un gráfico de control se muestran en la fig. 2.1.(NIST - SEMATECH, 2013).

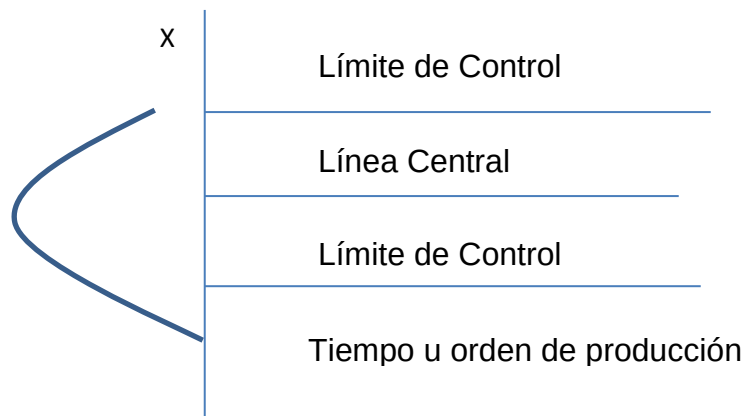


Fig. 2.1 Características básicas de un gráfico de control.(NIST - SEMATECH, 2013).

En el año 1920 el Dr. Walter A. Shewhart propuso un modelo general para los gráficos de control.(NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology, 2013).

Siendo w , una muestra estadística de mediciones que varían una característica determinada por ejemplo el espesor, y supongamos que la media de w es $\bar{x}$, con una desviación estándar de σ . Entonces, la línea central (CTR), límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (LCI) son:

$$\text{LCS} = \bar{x} + k \sigma \quad 2.1$$

$$\text{CTR} = \bar{x} \quad 2.2$$

$$\text{LCI} = \bar{x} - k \sigma \quad 2.3$$

Donde k es la distancia de los límites de control de la línea central, expresada en términos de unidades de desviación estándar. Cuando k se establece en 3, hablamos de los gráficos de control 3-sigma.

Históricamente, $k = 3$ se ha convertido en una norma aceptada en industria (NIST - SEMATECH, 2013).

Para el análisis de la CP y del FI asociado se construyeron gráficos de control para los que fue necesario probar la normalidad de las variables involucradas, los resultados de estas pruebas se muestran en el anexo 1.

2.2 Comportamiento de la carga promedio (CP) y el factor de insumo (FI) de energía generales de la planta desde (enero 2010-diciembre2014).

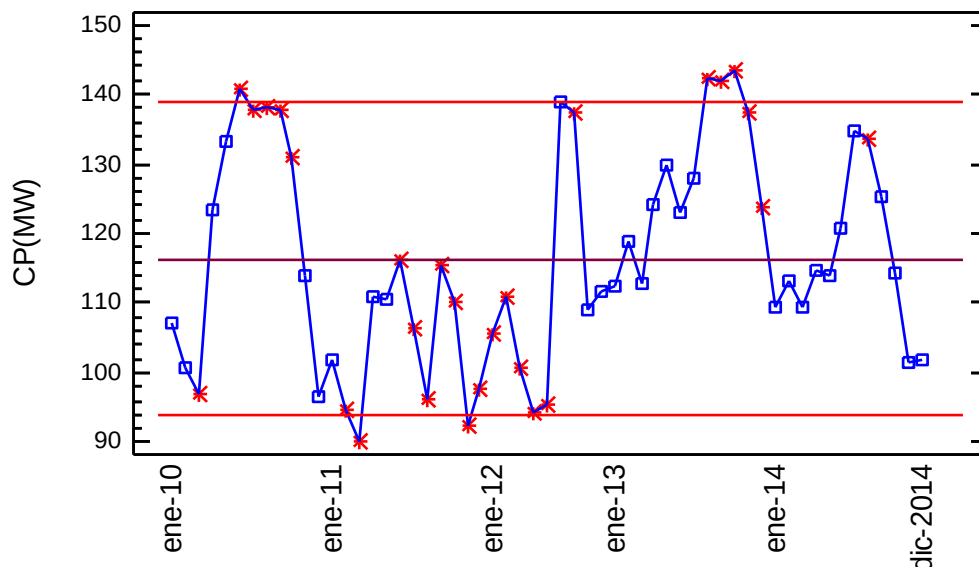


Fig. 2.2 Comportamiento de la carga promedio de la unidad 4 en el período 2010 - 2014. La LCS + 3,0 sigma = 138,96 MW, la CTR = 116,41 MW y la LIC - 3,0 sigma = 93,86 MW.

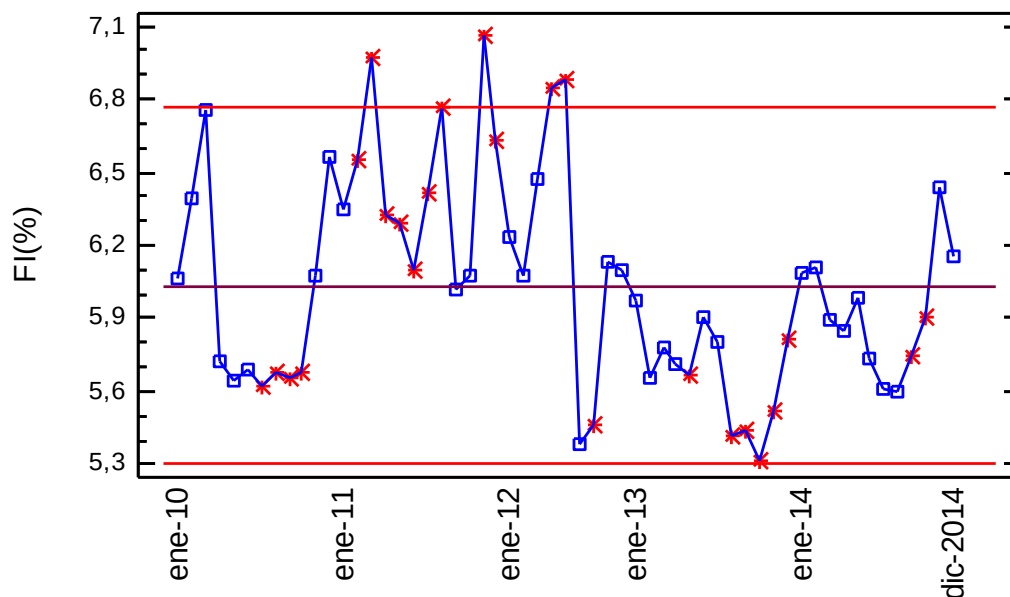


Fig. 2.3 Comportamiento del insumo de la unidad 4 en el período 2010 - 2014. La LSC +3,0 sigma = 6,76 %, la CTR = 6,03 % y la LIC -3.0 sigma= 5,30 %.

En las figuras 2.2 y 2.3 se muestra el comportamiento de la carga promedio y del factor de insumo de energía (consumo de energía/producción) de la unidad - 4 durante 5 años de explotación (enero 2010 – diciembre 2014). En la misma se observa que mientras

mayor es el valor de la carga promedio menor es el valor del factor de insumo y viceversa. En el 2014 la carga promedio disminuye al igual que el factor de insumo. Se puede observar que en el período analizado la carga promedio tuvo un valor medio de 116,41 MW para un valor medio de factor de insumo 6,03 %.

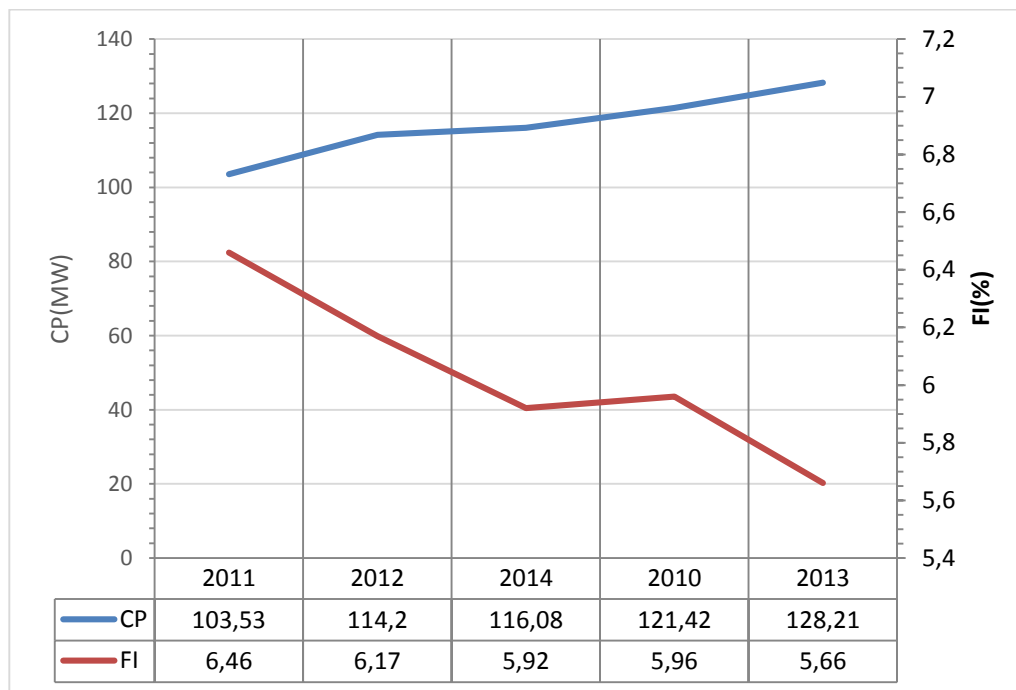


Fig. 2.4 CP y FI de la unidad 4 de la ETE CMC, ordenados por carga durante el período enero 2010-dicembre2014.

En la figura 2.4 se muestra el comportamiento de la CP y del FI ordenados por carga durante 5 años de trabajos de la unidad 4, con el objetivo de identificar a que FI corresponde las menores cargas promedio y viceversa. Se puede observar que en el año 2011 fue el de menor CP y mayor FI y en el 2013 el de mayor CP y menor FI. En el año 2010 a pesar de tener mayor CP con respecto al 2014 el FI fue mayor en un 0,04% lo que no resulta lógico.

2.3 Equipos mayores consumidores de energía de la unidad 4.

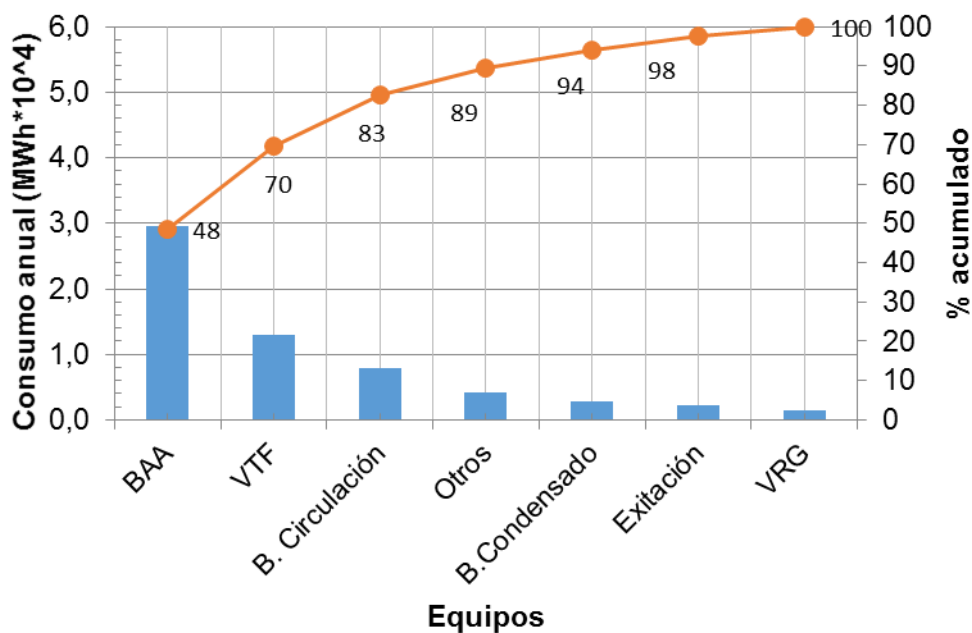


Fig. 2.5 Consumo por equipos año 2013 unidad – 4.

La figura 2.8 muestra el comportamiento del consumo total en el año 2013 de todos los equipos que intervienen en el insumo de la unidad 4. En la misma se destaca que las BAA, los VTF y las BC son los equipos más consumidores de toda la unidad, los mismos consumen el 80 % del total. La unidad 3 presenta un comportamiento similar. En estudios anteriores se ha trabajado en el comportamiento de las BAA por eso se dedicará el estudio a los VTF y a las BC. Los VTF y las BC consumen casi el 33% de insumo de energía total por lo que constituyen equipos con un considerable peso en el mismo después de las BAA.

2.4 Comportamiento histórico del consumo de energía de los VTF de la unidad 4.

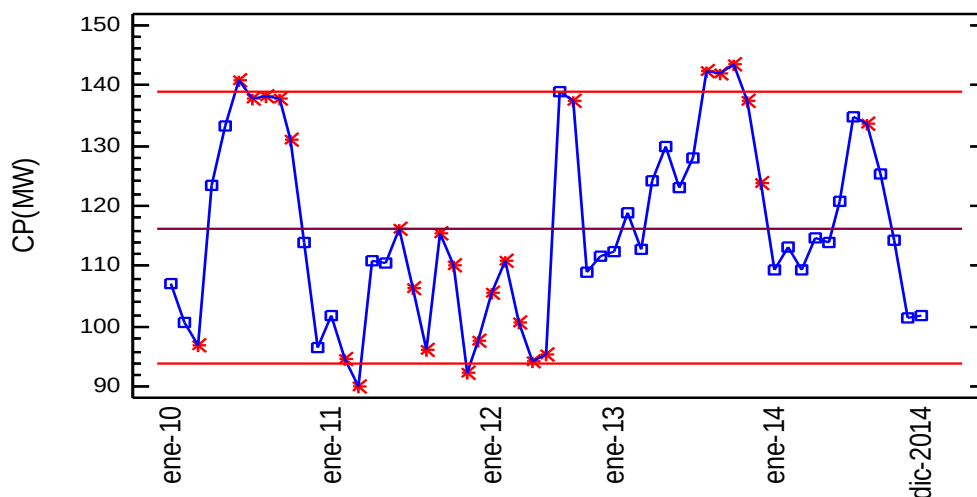


Fig. 2.6 Comportamiento de la carga promedio de la unidad 4 en el período 2012-2014

Anomalía en el comportamiento

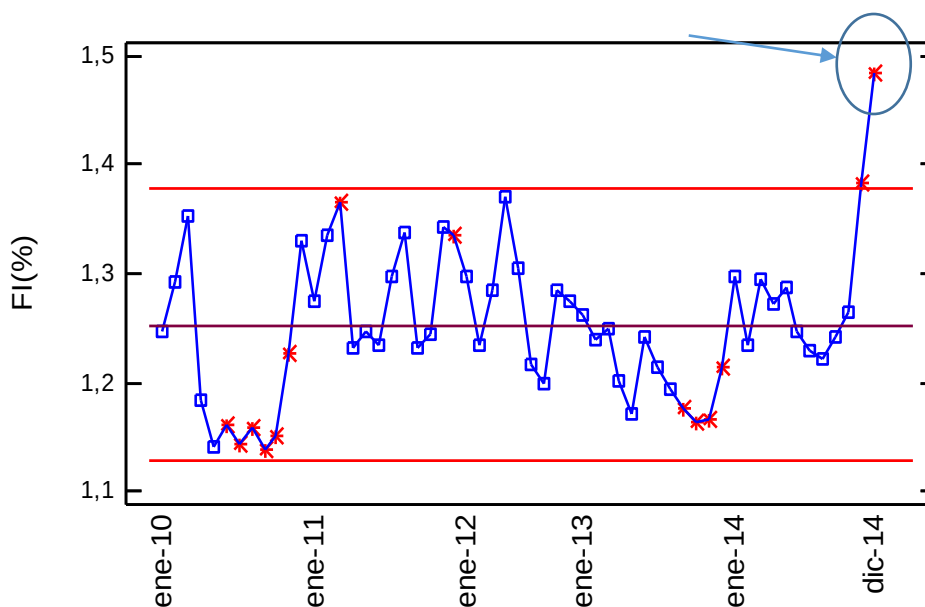


Fig. 2.7 Comportamiento de la carga promedio y del factor de insumo de los VTF

U - 4. La LSC + 3,0 sigma = 1,38, la CTR = 1,25 y la LIC - 3,0 sigma = 1,13.

En la figura 2.7 se observa el comportamiento del FI de los VTF de la U – 4 asociados a la CP que se muestra en la figura 2.6. Se destaca correspondencia entre el FI y la CP. A finales del 2014 se observan CP entre los 100 y 110 MW, cargas similares a estas se dieron también en años anteriores sin embargo el FI a finales del 2014 sobrepasó el LSC, algo que no había pasado en años anteriores.

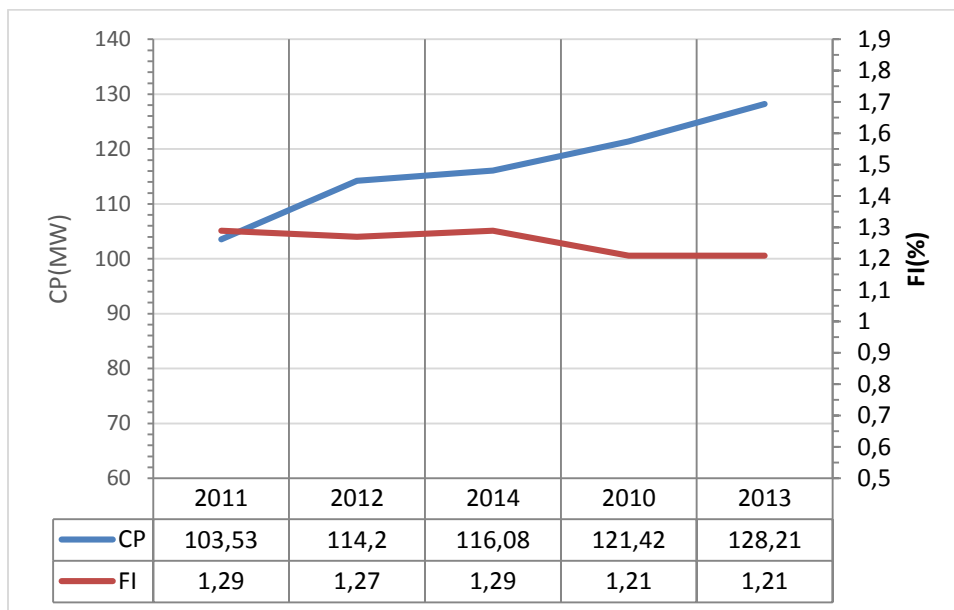


Fig. 2.8 CP y FI anuales, organizados por carga de los VTF de la U - 4.

En la figura 2.8 se muestra el FI promedio de un año de trabajo de los VTF de la U – 4 y la CP de la misma unidad asociado. Se observa en el año 2014 presenta una carga superior al 2011 en 12,55 MW sin embargo el FI se mantiene igual aun superior al 2012 con una CP inferior. El 2013 fue el año de mayor CP sin variación con respecto al 2010 en el FI con una CP inferior en 7,21MW.

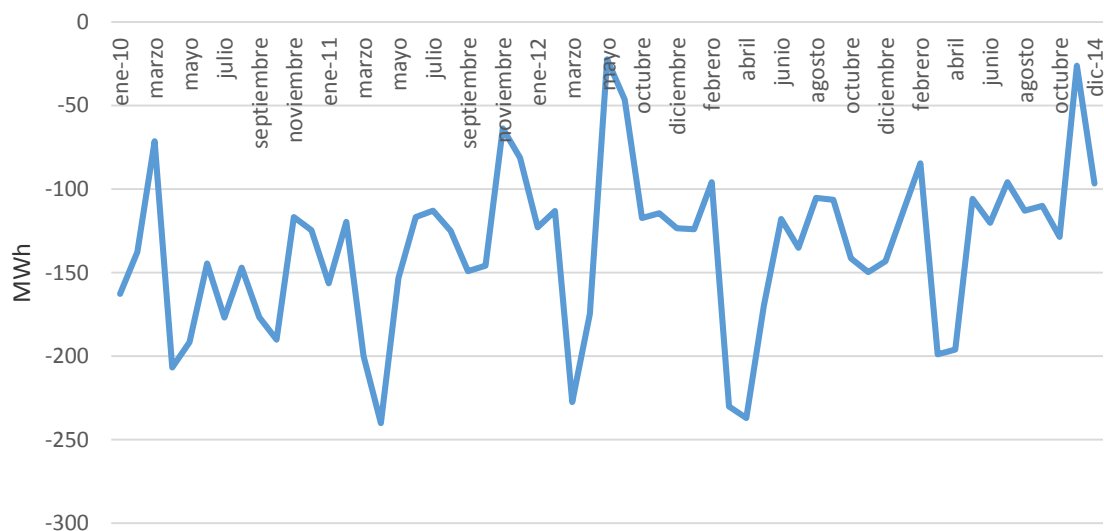


Fig. 2.9 Diferencia del consumo de energía real y el planificado de los VTF de la U - 4

En la figura 2.9 se muestra la diferencia entre el consumo de energía real y el planificado de los VTF de la unidad 4. Luego del mantenimiento capital con cambios de

equipos del sistema de aire-combustión, como los CAR, pre calentador, nuevo diseño en los quemadores con aire terciario, siempre se cumple con el consumo planificado. Sin embargo se observa que existe una tendencia lineal al aumento en el consumo de estos equipos. Lo más cercano al plan fue en el mes de mayo 2012 y noviembre 2014 con 22,3MWh y 26,3 MWh respectivamente.

2.5 Comportamiento histórico de las bombas de circulación U-4 en el período.

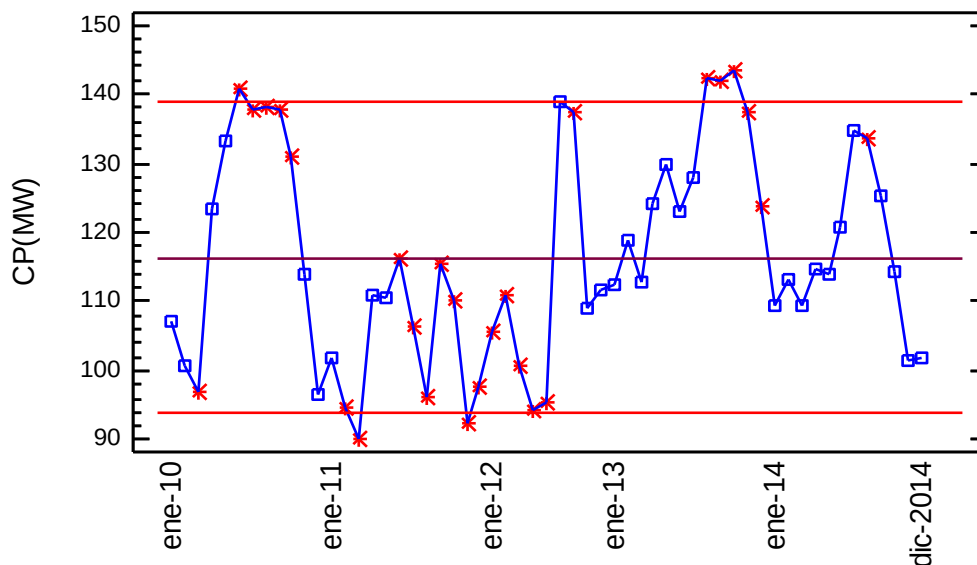


Fig. 2.10 Comportamiento de la carga promedio de la unidad 4 en el período 2010 – 2014.

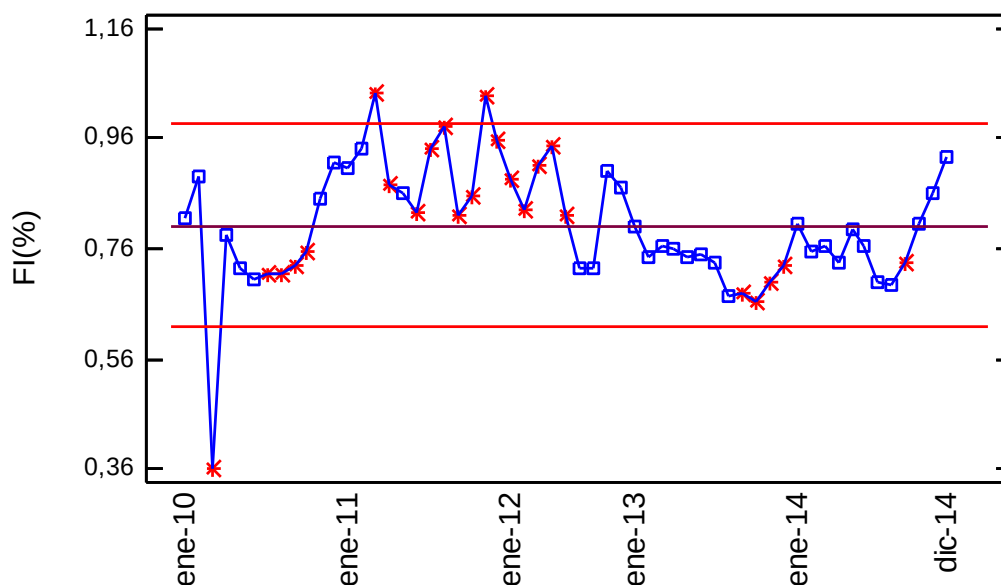


Fig. 2.11 Comportamiento del insumo de las BC-Unidad 4 en el período 2010 - 2014.

La LSC $+3,0$ sigma = 0,99 %, la CTR = 0,80 % y la LIC $-3,0$ sigma= 0,62 %.

En la figura 2.10 se muestra la CP de la unidad 4 al igual que en la figura 2.2 y en la figura 2.11 el FI de las BC de la unidad 4 asociado a esta CP. La media del FI para 5 años de operación es de 0,80 % para un CP medio de la unidad de 116,41 MW, determinado anteriormente. Se puede observar como en marzo del 2010 la CP tuvo tendencia a disminuir y el FI también. El resto del período analizado no presenta anomalías significativas, en el caso de las bombas de circulación el FI no se corresponde directamente con la CP, como el caso de los VTF, el FI de las BC tiene una mayor dependencia con el estado de limpieza del condensador afectando el vacío de la máquina lo que se refleja en los datos de temperaturas de entrada y salida del agua de mar en ambas secciones lo que trae como consecuencia un aumento de los parámetros de aire y combustible para una carga dada.

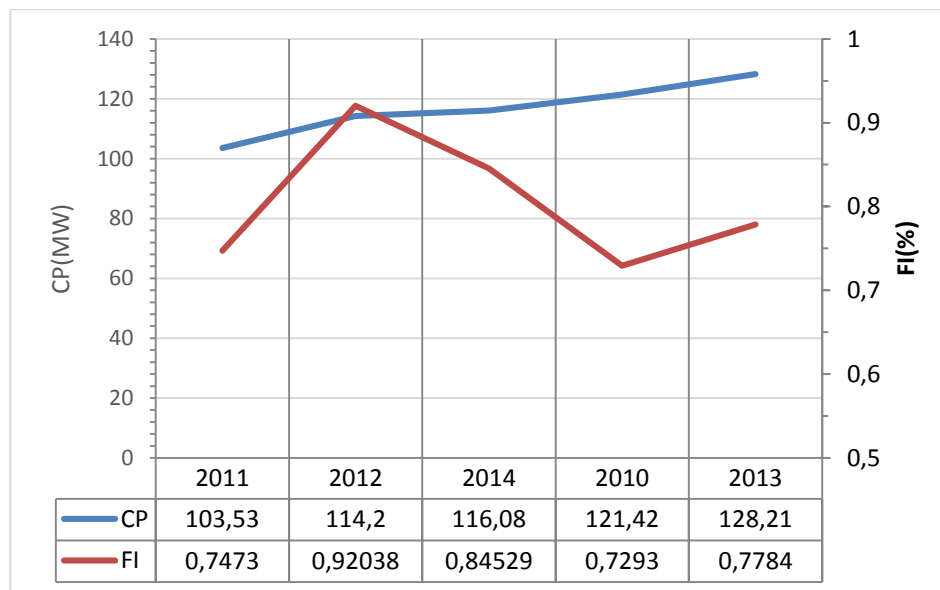


Fig. 2.12 CP y FI anuales, organizados por carga de las BC de la U - 4.

En la figura 2.12 se muestra el FI promedio de un año de trabajo de las bombas de circulación de la U-4 y la carga promedio de la misma unidad asociado, con el objetivo de identificar que FI corresponde a los años de menor CP y viceversa. Se observa que el año de mayor CP 2013 no correspondió el menor FI superando al 2010 en 0,05% y al 2011 en 0,03%. El año 2011 es el de menor CP y presenta valores de FI inferiores al 2012, 2013 y 2014 con CP superiores.

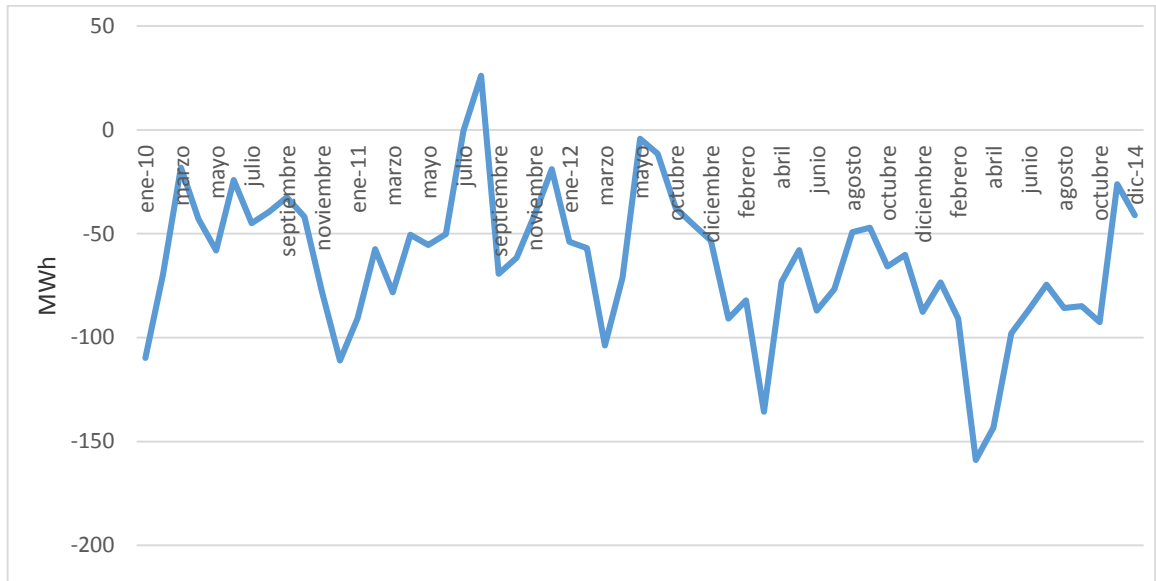


Fig. 2.13 Diferencia del consumo de energía real y el planificado de las BC de la U – 4.

En la figura 2.13 se muestra la diferencia entre el consumo de energía real y el planificado de las BC de la unidad 4. Se puede observar que solo en el mes de agosto del 2011 supera lo planificado en 26,03 MWh el resto del período se encuentra entre 4 y 158,89 MWh inferior al plan con una moderada disminución a partir del 2013.

Conclusiones parciales del capítulo:

1. La carga promedio media del período estudiado (2010 – 2014) en la unidad 4 fue de 116,40 MW para una factor de insumo de energía de 6,03 %, factor de insumo de energía que está dentro del rango aceptado a nivel internacional.
2. El menor valor de factor de insumo de energía de la unidad 4 se encuentra para cargas promedios por encima de los 110 MW con valores de factor de insumo de energía de 5,7 %.
3. Los segundos y terceros equipos mayores consumidores de la unidad 4 son los ventiladores de tiro forzado y las bombas de circulación. Estos equipos consumen un 33% del total de insumo de energía.
4. La media del factor de insumo de energía de los ventiladores de tiro forzado de la unidad 4 fue de 1,25% en el período estudiado, a finales del 2014 tuvo un aumento significativo, sobrepasó el 1.38 %, algo que no había pasado en años anteriores con cargas promedios inferiores.

5. La media del factor de insumo de energía las bombas de circulación de la unidad 4 fue de 0,80 % con tendencia lineal a crecer por encima del valor medio en los últimos meses.

Capítulo 3: Estudio de los factores del sistema que inciden en las variaciones del consumo de los VTF y B.C con el uso de estadística multivariada (componentes principales), tomando como caso de estudio la unidad 4.

En este capítulo se hace un estudio de las variables del sistema de aire y del sistema de circulación que más han cambiado su comportamiento en el período 2010 – 2014, haciendo mayor hincapié en el año 2014, a través de una técnica de estadística multivariada llamada componentes principales. Se toman decisiones según las variaciones existentes. Los datos fueron recopilados de los sumarios de puntos a carga máxima de la unidad, 158 MW.

3.1 Variables del Sistema de Suministro de Aire a Caldera que inciden en las variaciones del consumo de los VTF unidad 4 e influencia de las mismas en el período de tiempo estudiado.

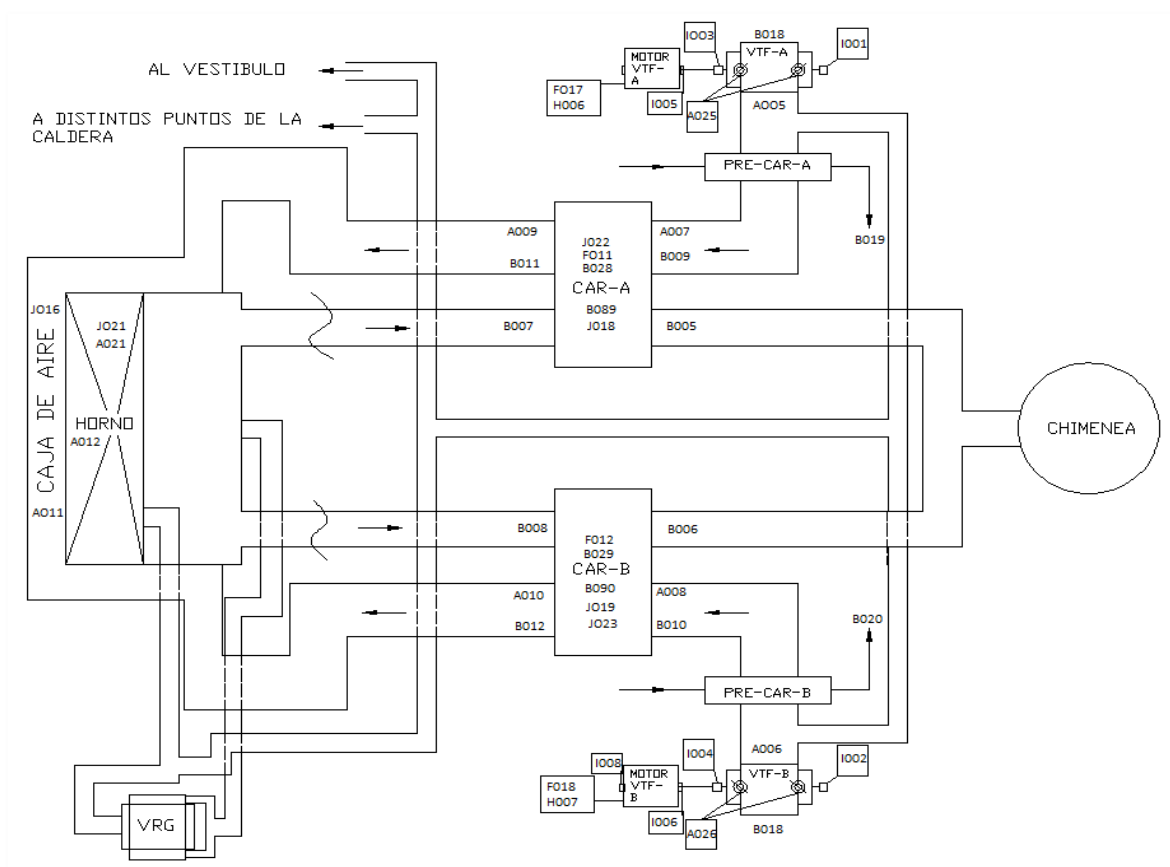


Fig.3.1 Esquema del suministro de aire a caldera y ubicación de los puntos de medición de las variables que se monitorean.

Tabla 3.1 Variables del sistema de aire que inciden en las variaciones del consumo de energía de los VTF Unidad 4.

<u>código</u>	<u>variable</u>	<u>unidad</u>	<u>código</u>	<u>variable</u>	<u>unidad</u>
A005	Pr descarga VTF A	mmH ₂ O	B089	CAR A A. Entrada/G. salida	°C
A006	Pr descarga VTF4	mmH ₂ O	B090	CAR B A. Entrada/G. salida	°C
A007	Pr aire ent. al CAR 4A	mmH ₂ O	F011	Amperaje CAR A	A
A008	Pr aire ent. al CAR 4B	mmH ₂ O	F012	Amperaje CAR B	A
A009	Pr aire salida CAR 4A	mmH ₂ O	F017	Amperaje VTF A	A
A010	Pr aire salida CAR 4B	mmH ₂ O	F018	Amperaje VTF B	A
A011	Pr caja de aire	mmH ₂ O	H006	Motor VTF A	MW H
A012	Pr gas horno	mmH ₂ O	H007	Motor VTF B	MW H
A021	Pr dif.horno-caja de aire	mmH ₂ O	I001	Temp. chumacera VTF A libre	°C
A025	Compuerta reg. succión VTF A(CD-31 A)	%	I002	Temp. chumacera VTF B libre	°C
A026	Compuerta reg. succión VTF B(CD-31 B)	%	I003	Temp. chumacera VTF A motor	°C
B005	Temp. CAR A sal. de gas	°C	I004	Temp. chumacera VTF B motor	°C
B006	Temp. CAR B sal. de gas	°C	I005	Temp. chumacera motor VTF A ventilador	°C
B007	Temp. CAR A ent. de gas	°C	I006	Temp. chumacera motor VTF B ventilador	°C
B008	Temp. CAR B ent. de gas	°C	I007	Temp. chumacera motor VTF A libre	°C
B009	Temp. CAR A ent. de aire	°C	I008	Temp. chumacera motor VTF B libre	°C
B010	Temp. CAR B ent. de aire	°C	J016	Flujo de aire para la combustión	
B011	Temp. CAR A sal. de aire	°C	J017	Temp promedio drenaje condensado PRE	°C
B012	Temp. CAR B sal.de aire	°C	J018	Temp promedio metal CAR A	°C
B018	Temp aire succión VTF(Ambiente)	°C	J019	Temp promedio metal CAR B	°C
B019	Temp. drenaje condensado PRE A	°C	J021	Dif. Tiro horno-caja de aire	mmH ₂ O
B020	Temp. drenaje condensado PRE B	°C	J022	Dif. Pr CAR A por aire	mmH ₂ O
B028	Temp. Chumacera superior CAR A	°C	J023	Dif. Pr CAR B por aire	mmH ₂ O
B029	Temp. Chumacera superior CAR B	°C			

Siguiendo criterios de ingenieros y técnicos con experiencia en explotación y mantenimiento de plantas térmicas se seleccionaron las variables del sistema de aire y gases que más pueden incidir en las variaciones del consumo de energía de los VTF y aquellas que se miden continuamente a través del sistema de monitoreo continuo instalado en planta, existen otras que se pudieron haber considerado pero no se contaba con el número de mediciones necesarias. Dichas variables se relacionan en la tabla 3.1.

En la fig. 3.1 se puede ver donde se miden cada una de estas variables en el sistema de aire y gases.

3.2 Análisis de Componentes Principales del Sistema de aire.

Todas las variables anteriormente seleccionadas fueron introducidas en el software de estadística statgraphics y se les aplicó el análisis de estadística multivariada de componentes principales obteniéndose los resultados que se muestran en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4.

Tabla 3.2 Cantidad de componentes que explican más del 85 % de la variabilidad de los datos.

<i>Componente</i>		<i>Porcentaje de</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Número</i>	<i>Autovalor</i>	<i>Varianza</i>	<i>Acumulado</i>
1	19,7765	44,946	44,946
2	8,92646	20,287	65,234
3	3,23499	7,352	72,586
4	2,38343	5,417	78,003
5	1,71754	3,904	81,907
6	1,39871	3,179	85,085
7	1,08554	2,467	87,553
8	0,869171	1,975	89,528
9	0,662392	1,505	91,033
10	0,576046	1,309	92,343
11	0,525642	1,195	93,537
12	0,379577	0,863	94,400
13	0,334758	0,761	95,161
14	0,309497	0,703	95,864
15	0,28421	0,646	96,510
16	0,254551	0,579	97,089
17	0,219735	0,499	97,588
18	0,165028	0,375	97,963
19	0,10959	0,249	98,212
20	0,106777	0,243	98,455
21	0,0949876	0,216	98,671
22	0,084094	0,191	98,862
23	0,0800187	0,182	99,044
24	0,0602854	0,137	99,181
25	0,0500738	0,114	99,294
26	0,0472357	0,107	99,402
27	0,0405221	0,092	99,494
28	0,0346974	0,079	99,573
29	0,0273948	0,062	99,635
30	0,0246166	0,056	99,691
31	0,0224861	0,051	99,742
32	0,0208901	0,047	99,790
33	0,0161745	0,037	99,826
34	0,0142208	0,032	99,859
35	0,0135482	0,031	99,889
36	0,0122176	0,028	99,917
37	0,0100435	0,023	99,940

38	0,0078856	0,018	99,958
39	0,00603884	0,014	99,972
40	0,00365138	0,008	99,980
41	0,00304155	0,007	99,987
42	0,00246158	0,006	99,992
43	0,00178958	0,004	99,997
44	0,00153064	0,003	100,000

El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 44 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 7 componentes se han extraído puesto que 7 componentes tuvieron autovalores mayores o iguales que 1,0. Los autovalores explican la cantidad de varianza en los datos, cada variable contribuye con un valor de 1 para el autovalor total, por eso se consideran solo las que tiene valores mayores a 1. En conjunto ellos explican 87,55% de la variabilidad en los datos originales, como se ve en la tabla 3.2.

Tabla3.3 Pesos de los Componentes

	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente
	1	2	3	4	5	6	7
A005	0,147233	0,24338	0,0251272	0,00450041	0,0480534	-0,00877057	0,0554263
A006	0,153559	0,234233	0,0185921	0,0215699	0,026578	-0,0274387	0,0272179
A007	0,145622	0,249173	0,025791	-0,00631984	0,0320445	-0,0150689	0,0545901
A008	0,151739	0,240595	0,0262294	0,00196105	0,0320399	-0,0200991	0,0305182
A009	0,141192	0,254017	0,00829153	0,0135958	0,0222771	-0,0249533	0,0772533
A010	0,0832908	0,191721	-0,00705153	-0,00968281	0,0546657	-0,015342	0,0122006
A011	0,140554	0,253674	-0,0101867	0,0333951	0,0147869	-0,0332783	0,0768274
A012	0,144134	0,0971749	0,210012	-0,135914	0,269527	-0,232815	0,256116
A021	0,0132607	0,215749	-0,255692	0,197586	-0,279427	0,230385	-0,180581
A025	0,16256	0,185146	-0,0685789	-0,134927	0,0730625	0,0360034	0,0989279
A026	0,16069	0,174597	-0,144089	0,117605	-0,0320102	-0,0009066	0,0000803
B005	0,1723	-0,0458194	0,00260661	0,307961	0,00943922	-0,236881	-0,134438
B006	0,182262	-0,073606	-0,0131692	0,22726	0,0180652	-0,211929	0,0184322
B007	0,160712	-0,0565503	0,292475	0,180064	-0,0757803	0,0679048	-0,016502
B008	0,16297	-0,0701168	0,273953	0,193032	-0,091528	0,0987976	-0,00602
B009	0,146104	-0,192605	0,0133483	-0,221116	-0,0180818	0,0177777	-0,180231
B010	0,16334	-0,181494	-0,0562529	-0,203305	0,00867574	-0,0152782	-0,0839628
B011	0,178971	-0,0547944	0,202362	0,240063	-0,0549873	0,0106835	0,00542275
B012	0,177377	-0,0632287	0,192628	0,259143	-0,0537621	0,0239115	0,0372213
B018	0,166274	-0,0905394	-0,282954	-0,0619109	-0,0118814	-0,109569	-0,044747
B019	-0,129573	0,120399	-0,140826	0,285211	0,0349399	-0,132712	0,0938553
B020	-0,00419166	0,0756396	-0,119467	0,0864652	-0,0384317	-0,126388	0,415389
B028	0,149189	-0,0973599	0,123709	0,0916674	-0,0585299	0,283158	0,343632
B029	0,166209	-0,10222	0,0691091	0,0425872	-0,0651663	0,222115	0,340084
B089	0,187282	-0,119739	0,0053133	0,0812449	0,00869701	-0,187242	-0,21651
B090	0,18525	-0,132602	-0,0523784	0,0675589	0,026536	-0,20488	-0,0340687
F011	0,0162874	0,010823	-0,105964	0,205567	0,568877	0,287491	-0,109103
F012	0,0053715	-0,036468	-0,143788	0,18246	0,566274	0,244884	-0,0216
F017	0,127891	0,204093	0,0152645	-0,183342	-0,103243	-0,0289817	0,0415818
F018	0,130134	0,202976	0,0468236	-0,175373	-0,0976149	-0,069643	-0,0204081
I001	0,150926	-0,118514	-0,030246	0,0841115	-0,145442	0,24159	0,0021382
I002	0,117322	-0,177616	0,00550158	-0,239639	0,000486439	0,223628	0,166854

I003	0,177113	-0,141758	0,0476672	-0,074777	-0,0832963	0,252403	0,0136561
I004	0,182778	-0,104992	-0,153198	0,0383686	-0,110967	0,137164	0,0077260
I005	0,178257	-0,0692181	-0,281878	-0,0672666	0,00914805	-0,0141189	0,0503034
I006	0,176324	-0,0845396	-0,276559	-0,0642223	0,032334	-0,0612814	0,0459667
I007	0,175887	-0,0825163	-0,254836	-0,120552	0,0177081	0,00496724	0,0967623
I008	0,179984	-0,0762779	-0,265296	-0,0810842	0,0328839	-0,0202974	0,0941539
J016	0,148442	0,144208	0,146845	-0,174534	0,0923268	0,132964	-0,18232
J018	0,187051	-0,118472	0,00421735	0,0811023	0,0162072	-0,179432	-0,230441
J019	0,186496	-0,133429	-0,0363869	0,0555291	0,032509	-0,217304	-0,003533
J021	0,016662	0,217088	-0,250244	0,172762	-0,264554	0,25299	-0,211757
J022	0,144725	0,116117	0,154547	-0,18769	0,100305	0,0849663	-0,210943
J023	0,161295	0,0882511	0,147031	-0,129889	0,0685488	0,0854724	-0,326014

En la tabla 3.3 se muestran las ecuaciones de los componentes principales. Por ejemplo, el primer componente principal tiene la ecuación

$$0,147233*A005 + 0,153559*A006 + 0,145622*A007 + 0,151739*A008 + 0,141192*A009 + 0,0832908*A010 + 0,140554*A011 + 0,144134*A012 + 0,0132607*A021 + 0,16256*A025 + 0,16069*A026 + 0,1723*B005 + 0,182262*B006 + 0,160712*B007 + 0,16297*B008 + 0,146104*B009 + 0,16334*B010 + 0,178971*B011 + 0,177377*B012 + 0,166274*B018 - 0,129573*B019 - 0,00419166*B020 + 0,149189*B028 + 0,166209*B029 + 0,187282*B089 + 0,18525*B090 + 0,0162874*F011 + 0,0053715*F012 + 0,127891*F017 + 0,130134*F018 + 0,150926*I001 + 0,117322*I002 + 0,177113*I003 + 0,182778*I004 + 0,178257*I005 + 0,176324*I006 + 0,175887*I007 + 0,179984*I008 + 0,148442*J016 + 0,187051*J018 + 0,186496*J019 + 0,016662*J021 + 0,144725*J022 + 0,161295*J023$$

En donde los valores de las variables en la ecuación se han estandarizado restándoles su media y dividiéndolos entre sus desviaciones estándar. Mientras mayor sea el valor de peso asociado a una variable determinada mayor incidencia ha tenido esta en la formación de ese componente.

Tabla 3.4 Componentes Principales

Fila	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	Componente 5	Componente 6	Componente 7
1	-1,63568	-1,72292	1,5779	-2,10493	-0,0309777	0,423929	-0,874538
2	-2,23447	1,80884	2,47999	-2,92317	0,598165	-0,429179	-1,84145
3	-3,21117	-1,36406	3,1068	1,55889	0,33803	-2,33956	-1,21474
4	-4,59152	3,79582	5,1372	1,83233	1,48525	0,68492	-2,10555
5	-5,70919	3,6926	4,70174	-0,943073	0,777407	-0,226798	-1,49612
6	-8,80072	-0,487963	3,91274	-0,900101	0,197127	-0,229883	-1,38421
7	-3,79227	-0,257483	3,04606	-0,143254	0,397884	-2,08283	-1,78395
8	-0,257693	-0,0793929	2,47345	-0,568202	0,492155	-1,42054	-1,56176
9	-1,64965	-2,67628	0,762777	-1,85323	0,0254268	-0,704116	-1,42751
10	-1,92302	-4,72758	0,250129	-1,69719	-0,333921	0,272115	-0,659262
11	-2,67572	0,256502	2,61163	-1,64112	0,719894	-1,08393	-1,68163

12	1,19346	-3,10693	-1,08257	-3,7043	0,141815	0,164274	-0,301624
13	0,708144	-2,26558	-4,34447	-5,92048	0,406531	0,512821	1,34218
14	-0,00196441	-3,62208	-0,770437	-3,32811	0,272318	-0,401188	-1,15114
15	0,707333	-3,79687	0,0813853	-1,68545	0,00813641	-0,453035	-0,483885
16	2,76809	-1,14057	-1,44528	-3,17324	0,430496	-1,72142	-2,08548
17	2,40336	-2,00299	0,124645	-2,00981	-0,0489063	-1,97481	-1,9565
18	-0,890738	-0,266595	0,448242	-1,36177	1,46855	-0,308375	-1,3421
19	2,93227	-3,45445	-1,18516	-2,11365	0,411183	-2,49186	-1,8535
20	3,7414	-0,629337	0,221351	-3,62604	0,397855	0,207325	-0,592849
21	4,58233	-3,29329	1,97942	-0,676292	-0,0758624	0,021208	-0,226697
22	4,82483	-3,96088	-0,919384	-2,13735	1,34668	0,506712	-1,64906
23	5,90945	-4,12376	-0,701868	-0,318143	3,34081	0,307734	-1,6665
24	4,81291	-0,976004	2,83854	-1,36292	0,190616	0,573979	-0,462854
25	2,7113	-3,0424	0,9552	-0,481624	3,39076	1,89487	-0,498209
26	6,30443	-3,31452	-0,961756	-1,4164	1,13954	0,548286	-0,281471
27	2,07856	-1,50408	1,40817	-1,62268	1,28199	2,20885	0,483544
28	4,47962	-1,90878	1,80544	-0,846258	-0,205707	0,358393	0,817184
29	5,70787	-2,01638	1,70674	-1,77406	-0,238689	0,674564	0,0432333
30	5,9243	-1,56179	2,69059	-1,15042	-0,495984	1,07883	-0,0740334
31	9,79863	-2,79634	1,98239	-1,05813	-0,934818	1,34816	0,684078
32	6,95411	-2,81103	1,48027	-1,30149	-0,307507	0,390814	-0,427185
33	5,3646	-3,75789	2,3712	-0,606978	-0,780612	0,997694	0,653606
34	0,552797	-3,81468	3,71826	-0,403362	-0,72754	1,29109	0,598489
35	5,88056	-4,48217	2,22503	0,3712	-0,705715	-0,37741	-0,255514
36	5,7491	-1,53032	2,44794	-1,98506	-0,421534	1,75149	1,19952
37	5,33948	-3,99369	2,53294	-0,30456	-0,84738	1,69622	0,88057
38	4,52103	-5,66847	1,45772	-2,3769	-0,944516	0,697988	-1,47706
39	3,91885	-3,42668	3,58544	0,339818	-0,808004	1,36331	1,14717
40	9,04601	-5,0117	1,25551	-0,713354	-0,957966	1,12166	0,578844
41	1,74535	-5,23075	2,52593	-0,256272	-0,634731	0,553753	0,254892
42	-0,690946	-3,42331	2,85535	-2,13322	-0,846597	2,34634	1,06811
43	2,12733	-6,09801	2,1822	-0,730989	-0,906655	1,36294	0,560735
44	2,41198	-3,55031	2,52047	-1,55253	-0,221726	0,546162	0,141904
45	3,40681	-6,42082	1,85766	-0,23299	-0,801194	0,46829	-0,296556
46	1,55075	-4,87905	2,90926	-0,591201	-0,745046	1,18493	0,41911
47	0,364698	-4,25644	3,29747	-0,131267	-0,574023	1,24295	0,374368
48	1,04688	-3,36051	2,86178	-1,63665	-0,30388	1,10716	-0,30194
49	-0,290758	-1,73589	3,30793	-1,21785	-0,0326945	-0,417435	-0,826494
50	0,643006	-3,65014	1,61913	-2,42239	-0,456973	1,37056	0,274215
51	8,72096	-6,30931	3,15899	1,73328	-1,14292	0,15552	0,0779114
52	-0,78432	4,76954	-0,332296	-2,65612	0,406966	-1,79751	-0,802318
53	-4,17992	4,9325	0,721099	-2,45344	0,53421	-0,302042	-0,00184978
54	-4,75157	5,40318	1,68724	-1,70927	0,435399	-0,39833	0,0520423
55	-2,77374	3,69677	-2,03732	-2,96056	1,04341	-2,18191	-0,284187
56	-2,68054	1,45665	-1,68169	-1,76134	0,351158	-1,78597	-0,0239406
57	-6,4539	-0,0683194	0,464428	0,547965	-0,0306131	-1,58884	0,882515
58	-8,3084	4,1199	0,427413	-2,85786	0,453043	0,221687	1,04441
59	-7,922	0,0997361	-0,506251	-1,10996	0,319297	-1,21326	0,760632
60	-6,52173	1,06071	-0,658625	-1,67612	0,0970396	-0,838119	0,588082
61	-3,69062	3,66057	-0,95127	-2,54131	0,58355	-1,73806	-0,477544
62	-5,80582	0,605144	-0,563937	-1,12057	0,124305	-1,50398	0,0568685
63	-8,67608	1,84498	0,682738	-1,01187	0,274842	-0,724418	0,68981
64	-6,25754	3,32126	1,94525	0,163252	0,244811	-0,901074	-0,23912
65	-12,0891	6,08718	2,82607	-0,959033	0,501953	-0,491944	0,61478
66	-4,76792	3,91113	-1,19129	-2,34303	0,711008	-1,64212	-0,459566
67	-4,45728	-0,499022	-1,81253	-0,925426	1,84531	-0,841552	0,116141
68	-6,63718	5,20813	1,46292	-2,80408	0,747506	0,0487489	0,387395
69	-6,65488	4,28838	1,63886	-1,81611	0,168347	0,644598	1,66611
70	-5,19235	3,01808	1,04865	-1,47686	0,344238	0,294661	1,39227
71	-6,53076	-0,201896	0,510763	-0,402961	-0,135121	0,108963	1,82265

72	-9,76731	-2,04127	0,245655	-0,0108666	-0,294401	-0,253114	1,16795
73	-7,02816	-8,30062	-4,10422	1,7547	2,32693	-0,362484	0,231675
74	-6,953	-2,52717	1,45739	1,57347	0,864773	0,384903	-0,215014
75	-6,72657	-1,98472	-0,780212	0,226599	2,9235	2,15318	1,54165
76	-7,9576	1,16263	0,906217	-1,95763	-0,0206819	1,20523	1,79772
77	-10,0211	-1,57942	-0,442269	-2,84938	-0,204537	1,69016	2,19847
78	-3,58679	-1,48918	-2,49208	-3,09537	0,179179	-0,726915	0,895705
79	-5,19783	-4,76979	-1,72333	1,63577	2,63416	0,903336	1,25784
80	-4,11909	-3,25004	-2,64357	-1,03537	-0,0585925	-1,05532	0,417195
81	-2,66703	-4,3057	-2,58159	0,519073	2,92297	0,683037	0,305361
82	0,234696	4,09262	-0,634022	-0,401841	1,10698	1,12725	0,480017
83	0,220219	1,85249	-0,409229	-0,12196	-0,606134	-0,655959	0,32197
84	-1,16248	-0,0303518	-2,2004	0,197881	2,83261	0,682624	-0,607392
85	-0,929284	-0,652753	-1,86865	1,16872	2,78038	0,605824	-0,466754
86	1,7212	2,08211	0,035948	-0,589685	-0,694325	0,335466	0,575359
87	4,8339	1,65969	-2,12179	-1,50697	-0,466911	0,133524	0,724212
88	3,79211	-0,62554	-2,53753	1,367	2,69934	0,773018	1,07825
89	-0,771354	-0,715559	-0,632854	0,131283	-0,63536	-0,108216	1,01435
90	-0,131713	-1,21889	-0,758883	0,213366	-0,559895	-0,759793	0,386832
91	-2,08406	-0,870786	-1,53841	1,46696	2,58304	1,79644	1,28223
92	-5,66282	0,282878	1,31543	1,71862	0,743977	0,532554	0,00820518
93	-2,5379	0,754493	-0,172732	0,111544	-0,541939	-0,836575	-0,0543391
94	-5,72437	-3,90885	-0,415811	1,42923	-0,867215	-0,828058	0,682892
95	-8,15646	-0,203328	1,90962	0,473453	-0,43991	0,0651255	0,301999
96	0,963848	1,01227	-2,09644	-0,928227	0,9262	0,939	0,401981
97	-4,61647	0,160674	-0,201599	1,65911	2,57749	1,73748	0,464484
98	-3,21942	-3,22793	-0,249181	1,82327	-0,864465	-1,04219	0,474461
99	-4,16084	0,487795	0,065656	-0,190764	-0,39612	-0,183094	0,0942545
100	-1,97629	-1,47734	-0,526604	0,375123	-0,698583	-0,642372	-0,220835
101	-7,85445	0,347511	1,8849	0,450199	-0,814681	0,797889	0,614112
102	-4,27816	-1,00092	0,574301	1,14764	-0,554566	-1,11644	-0,155468
103	-2,06172	-3,44796	-1,71985	1,02407	-0,691425	-1,79707	0,507918
104	-10,2122	-0,52523	-1,19192	-2,43068	-0,506979	0,880612	0,437672
105	-4,26713	-3,12833	-1,39057	2,17228	2,49881	0,557944	-0,233401
106	-0,690114	-1,68544	-2,06521	0,507526	-0,637907	-1,10971	1,2026
107	-4,0207	-1,7466	-1,73062	-1,19932	-0,385254	-0,62913	-0,633733
108	-3,19791	-1,31565	-0,447036	0,702442	-0,454191	-1,71974	-0,569194
109	-2,05888	-2,20088	-1,90601	0,0143514	-0,363903	-1,48602	0,370142
110	-3,16305	-1,743	-0,964861	1,32699	0,929984	-0,434225	-0,466043
111	-2,89443	-2,2611	-1,63096	0,288211	-0,574267	-0,996759	0,723076
112	-0,716708	-0,0203254	-0,308286	0,802626	-0,34392	-1,04975	1,04102
113	-1,67302	1,68469	0,989133	1,0542	-0,471711	0,0496317	0,91026
114	-4,36507	1,45611	1,25776	0,07007	-0,411485	0,256041	-0,0676291
115	-0,205366	-2,4066	-1,63277	0,684008	-0,610473	-1,1834	0,955004
116	-4,51277	0,43987	1,78805	2,44435	-0,434137	-0,427983	2,52493
117	2,43358	0,0542144	-0,783036	0,809613	0,790714	-0,173002	0,298293
118	-1,20373	0,721074	1,69227	1,47959	-0,484823	-0,690582	0,597376
119	-3,66257	0,565638	1,33923	0,99807	-0,251248	-0,953332	0,171955
120	-0,251552	-1,01691	-1,67107	-0,352338	-0,552667	0,106576	1,51698
121	-6,15516	1,35759	1,31942	0,193324	-0,319292	0,122185	0,922085
122	-3,36687	-0,0616984	0,115309	0,514083	-0,676275	-0,0192463	0,241942
123	-4,0817	-0,310818	-1,51432	1,01988	0,448256	-0,0234471	-0,67599
124	-3,43918	-1,1304	-1,50233	1,04159	-1,41872	-0,659444	-0,773062
125	-6,13083	1,83723	1,41222	0,288281	-0,354736	-0,232406	0,456618
126	-3,02251	-2,94574	-4,47023	2,31154	-3,0009	0,220364	0,199071
127	-6,18963	1,98788	0,191262	1,48645	-2,13313	1,97165	0,159962
128	-2,01749	-1,08627	-1,99765	-0,296705	-0,378309	-1,11642	0,74901
129	-2,41364	0,125725	-0,403486	0,176811	-0,8156	0,717	2,09859
130	1,35533	0,85834	-0,952765	0,0588021	-0,198332	-1,47437	0,679802
131	-2,2855	-2,30195	-1,74905	0,675744	-0,805911	-1,05467	0,580008

132	-1,30389	4,09153	-3,71702	1,86772	-3,33276	1,46053	-3,43279
133	-3,09829	1,19414	-3,33242	1,55787	-3,50636	3,17088	-1,19369
134	-4,74866	1,35741	-2,76548	1,1638	-3,51838	3,56185	-1,72797
135	-13,5269	5,29269	0,73003	-0,0032899	-1,31941	5,50525	-2,52893
136	-5,55532	-4,18463	-3,47376	2,38015	0,753664	3,32059	-0,890898
137	-4,46699	-2,93459	-1,89165	0,657156	-1,92931	0,992492	-1,04802
138	-1,67113	-0,542382	-2,3217	1,47925	-1,88976	0,268286	-1,06214
139	-3,1453	-3,87698	-1,86834	1,50685	-1,96036	0,659129	-0,952179
140	-5,19555	-2,21541	0,758272	2,5767	-1,90785	0,829529	0,00886814
141	-3,09444	-3,01194	0,958375	1,81562	-0,487142	-1,6248	-0,27131
142	3,23554	-0,844316	-1,58807	0,416941	-1,04206	-1,13015	-1,63185
143	0,169518	-2,75071	-0,254568	1,59087	-1,00392	-1,59606	-1,80308
144	-2,17336	-1,34026	-2,12445	-0,90776	-1,39925	0,666996	-1,25282
145	-2,6795	-2,7401	-1,4715	1,72732	-1,72094	0,00912549	-0,142633
146	-0,932829	-3,48006	-0,961919	1,85872	-1,49306	-1,03213	-1,91804
147	-0,733398	-2,80232	-2,26085	0,324333	-1,40835	-0,275124	-0,666521
148	0,609993	-2,45442	-1,91892	0,596738	-1,64977	-0,0247329	-1,05168
149	-2,50315	1,84983	0,240998	-0,154027	-1,13019	1,36594	0,0542006
150	-1,84679	0,01632	-0,22813	1,11678	-1,46925	1,1575	-0,101346
151	-1,65875	-2,08328	-1,61177	2,67004	1,682	1,43832	-1,07248
152	1,27866	-3,06519	-1,41209	2,12453	3,05452	-0,655137	-0,598605
153	-1,04061	-1,63924	-0,204452	0,286592	0,0939227	-2,04436	-0,479669
154	0,450166	-3,01383	-2,04791	0,470236	3,00277	0,345323	-0,695434
155	1,77176	-1,44693	0,552026	1,02945	0,0735278	-2,02453	0,124387
156	0,200785	-1,64201	0,180887	0,312699	-0,272647	-0,507375	0,143381
157	3,39683	-1,20178	-1,17392	-0,705625	1,45721	-0,557009	-0,616142
158	2,72494	-1,59792	-1,06368	-1,15028	-0,120546	-0,679813	-0,205403
159	2,87756	-0,35192	-0,776164	-0,848173	0,0274684	-1,17987	0,124268
160	-0,297902	0,185037	1,65975	1,25604	-0,118379	-0,872281	0,58984
161	0,457721	0,482476	0,356297	-0,107201	-0,0490423	-0,761125	0,215774
162	4,30113	2,50439	0,794157	-0,389272	0,489297	-1,81219	-0,53205
163	2,8726	-0,24516	1,28631	0,70561	0,0236463	-1,76473	-0,457459
164	3,87448	1,28286	0,0852095	-0,268433	3,55539	0,819081	-0,698486
165	3,27496	0,785461	-0,0862169	1,05972	3,32118	0,247764	-0,427137
166	4,09761	-4,65231	0,744046	1,10305	-1,3783	-0,114497	0,668977
167	3,56194	0,010833	1,14643	0,945502	-0,554798	0,218827	1,36869
168	3,70338	0,776235	1,43978	0,752365	-0,205916	-0,525469	0,146114
169	4,25808	2,89115	0,87603	1,79984	0,886216	0,156195	0,44172
170	5,68296	0,102656	-1,50208	0,0645475	0,52949	0,642567	0,640853
171	6,99866	1,07344	0,239782	-0,177451	-0,722147	-0,576258	-0,0847074
172	3,44561	2,44546	0,716341	0,772522	-0,420191	-0,562195	0,784148
173	3,57907	2,97848	0,563582	-0,336983	-0,737027	0,956072	1,07371
174	4,02747	1,32681	1,1493	1,88007	-0,688297	-0,515546	1,05064
175	1,79871	1,31573	3,10157	3,18633	-0,788272	-0,86032	0,0229482
176	4,9403	0,68746	1,62955	1,1713	-0,894018	0,15864	0,158361
177	2,21863	1,74063	-0,997255	1,31492	3,02723	0,193222	-0,323102
178	0,28587	0,316298	-0,423325	0,878474	0,768202	-0,00166768	-0,75445
179	4,56447	2,42759	-2,63134	-0,514218	0,0183902	1,95661	0,0158487
180	6,00415	2,52947	-2,6619	-0,239566	2,84135	0,975376	-0,250491
181	3,90625	0,86529	-2,2543	0,682941	2,6858	1,36078	0,235975
182	1,31648	1,96336	0,405641	2,0474	0,889101	-0,0745408	0,368062
183	5,10015	2,05557	-0,255643	1,04901	-0,852276	-0,884705	-0,19541
184	4,09657	1,12874	0,144829	1,70255	0,860901	-0,281226	-0,306418
185	2,88121	-1,2769	-0,98616	2,58252	2,32165	0,912169	-0,0847179
186	3,81735	-0,109256	-0,759737	3,10693	2,6742	-0,312421	0,108667
187	2,85072	1,29897	2,08866	1,71872	-0,636172	-0,82253	-0,569955
188	3,89554	1,79762	0,36058	0,735031	-0,188847	-1,94546	-0,968519
189	2,35155	1,36869	0,378738	1,49438	-0,339129	-1,86673	-0,530466
190	3,09835	-0,144832	-2,08534	0,123971	0,80472	-0,110987	-0,381469
191	4,22291	1,10545	1,65825	2,8433	-0,495178	-1,96271	-1,04544

192	4,23925	0,828893	-0,781628	0,0160624	-0,562632	-0,693547	0,501131
193	0,502889	3,76826	3,44294	3,30463	1,15493	-0,402008	-0,735713
194	1,39441	2,44298	1,39689	3,5424	-0,609041	-2,8244	1,49683
195	1,38531	3,02428	1,9692	3,69425	2,81633	0,288861	0,340984
196	-0,830782	3,38403	0,59756	0,0755054	-0,272723	-0,383529	-0,443722
197	1,97683	3,89325	-1,12588	-0,282368	-0,521107	-1,4207	-1,00311
198	0,523621	2,92202	-0,883965	-0,12677	-0,685249	-0,126735	0,516907
199	1,65857	0,496937	-2,64944	0,229257	-1,25479	-0,240766	0,80075
200	1,05841	2,90886	-4,43994	1,81728	-3,57259	1,92195	-2,0478
201	0,87872	5,57496	1,12201	0,741461	-0,421624	0,193273	1,31704
202	0,25362	5,23834	1,42567	1,41416	0,853613	0,970085	-0,423911
203	4,10641	3,95744	-1,50378	-0,128442	-0,189821	-1,12407	-0,378621
204	1,61239	3,89667	-1,2569	-0,474402	-0,325025	-0,834923	-0,548523
205	1,51717	3,92308	-0,980729	-0,415743	-0,0801662	-1,30998	-0,875666
206	3,36364	5,15789	-0,514319	0,0888792	1,27483	-0,468772	-1,29317
207	6,4241	7,40206	-0,885827	-1,58725	-1,99112	1,29211	-2,18191
208	2,89255	9,60825	-0,349612	0,69013	-2,22839	2,23568	-2,58639
209	2,29058	6,82043	0,66906	0,373939	2,58628	2,52764	-0,379571
210	5,89102	3,27464	-0,684251	0,155742	0,66936	0,749973	-0,00962691
211	6,05527	4,73892	-0,626125	-1,14985	-0,619988	0,138909	-0,401974
212	3,75561	3,02339	-0,806365	0,172902	-0,67762	-0,144826	0,602354
213	1,47633	-2,27304	0,318353	1,69083	-1,77271	-0,978606	0,62483
214	2,01611	-1,01423	-2,30659	-1,48946	-1,83751	-0,725379	0,9142
215	0,182814	3,46879	1,28307	0,0939602	-0,78668	0,864196	0,561023
216	5,14307	2,08853	-1,97283	-1,34068	-0,919838	0,184938	0,751256
217	7,64466	4,94226	-2,88932	0,0668827	-1,25096	-1,70816	6,41737
218	2,66359	2,87715	0,224162	2,05956	0,59576	0,904072	0,86938
219	7,49664	0,314282	-2,23048	-1,5044	-1,0024	0,29235	0,295311
220	5,79914	4,76072	-1,47869	0,20444	2,67157	1,63518	0,346315
221	2,36747	3,32996	0,0432681	0,598314	-0,690142	0,0260038	0,996495
222	6,79593	2,79483	-1,67516	-1,47949	-0,92937	0,959175	0,90721
223	5,38905	4,10958	2,16577	2,5386	0,596501	0,258822	-0,347187
224	8,20595	5,7548	-1,70219	-2,34331	-0,663018	0,540821	0,519444
225	5,46458	0,714996	-0,221854	1,85823	0,451561	0,0225908	0,14708
226	5,09918	4,42147	0,162425	-0,967026	-0,800914	0,396522	0,286878
227	2,0198	1,35699	0,588427	0,907361	-0,98765	0,429444	1,00998
228	6,45887	2,36085	-0,48489	0,82423	-0,760382	-0,827518	1,13427
229	8,85291	3,8808	-0,170045	-0,0180965	-0,992369	0,221091	0,840159

En la tabla 3.4 se muestran los valores de los componentes principales para cada fila en su archivo de datos.

3.2.1 Gráficos de control para los 7 componentes principales (PCOMP).

Con los 7 componentes principales seleccionados, los cuales explican más de 85 % de la variabilidad de los datos se realizaron gráficos de control los que se muestran en la figuras de la 3.2 a la 3.8. Para la realización de estos gráficos se probó la normalidad de cada uno de los componentes principales, lo que se muestra en el anexo 2.

El análisis de estas gráficas permitió determinar que los compontes principales 1 y 2, figuras 3.2 y 3.3 fueron los que más puntos fuera de control tuvieron durante el año

2014. Se seleccionó los componentes que más variaron del 2014 porque nos interesa saber que variables del sistema de aire cambiaron más a finales del período estudiado.

De las 44 variables que se utilizaron para el análisis se seleccionaron entonces aquellas cuyos componentes 1 y 2 tuvieron mayores valores, es decir se redujo la tabla 3.2 a la 3.5 con lo que se simplificó considerablemente el análisis.

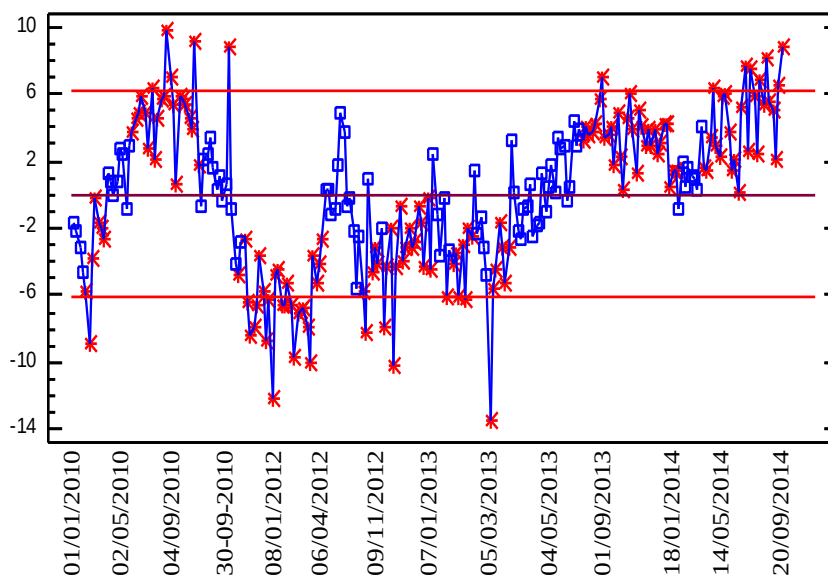


Fig.3.2 Gráfico de Individuos - PCOMP_1, 37 fuera de límites, LCS = 6,12, CTR = 0,00 LCI = - 6,12.

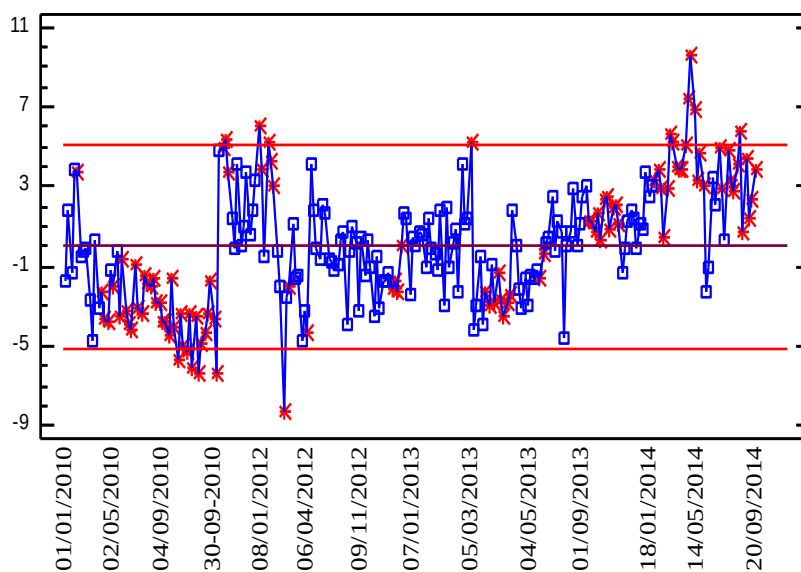


Fig.3.3 Gráfico de Individuos - PCOMP_2, 17 fuera de límites, LCS = 5,16, CTR = 0,00 LCI = - 5,16.

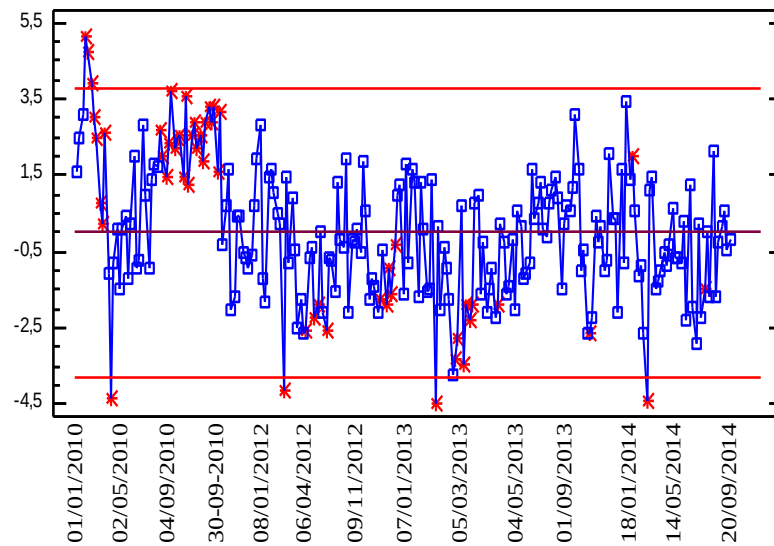


Fig.3.4 Gráfico de Individuos - PCOMP_3, 7 fuera de límites, LCS = 3,81, CTR = 0,00 LCI = - 3,81.

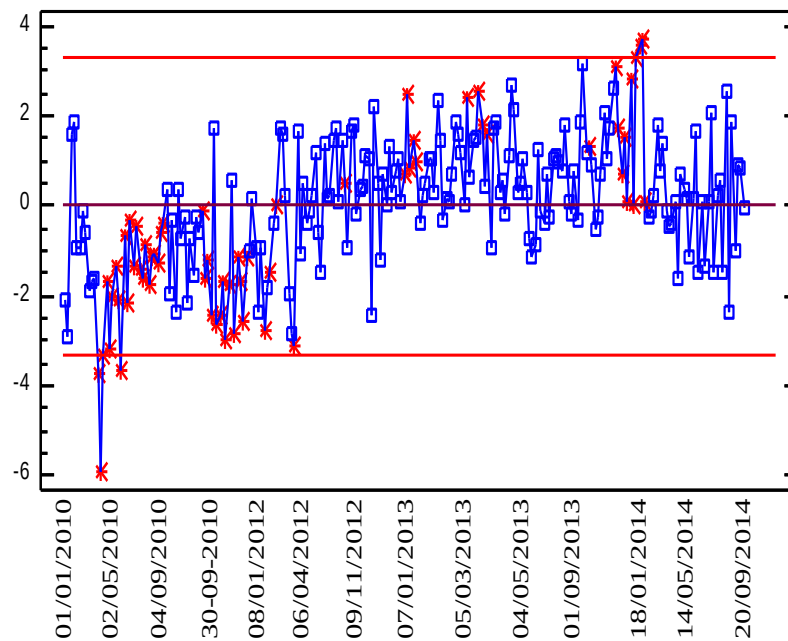


Fig.3.5 Gráfico de Individuos - PCOMP_4, 6 fuera de límites, LCS = 3,32, CTR = 0,00 LCI = - 3,32.

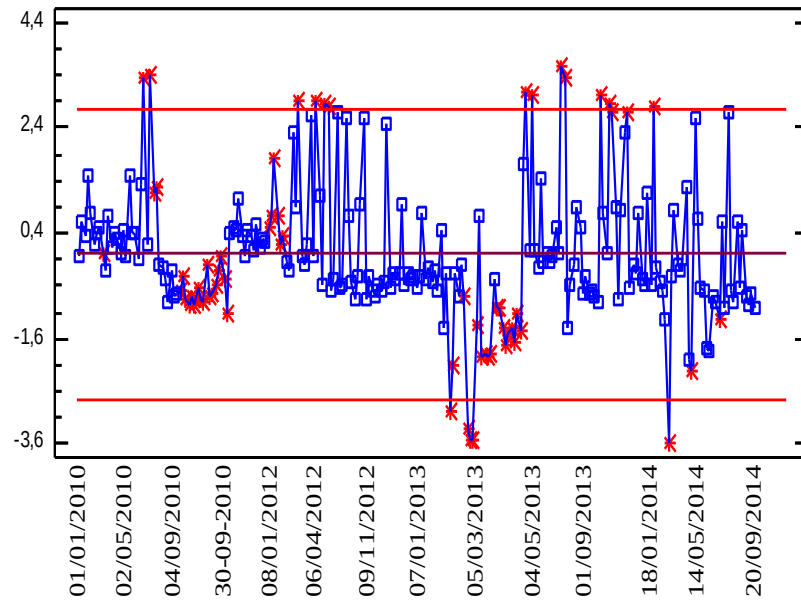


Fig.3.6 Gráfico de Individuos - PCOMP_5, 18 fuera de límites, LCS = 2,75, CTR = 0,00 LCI = - 2,75.

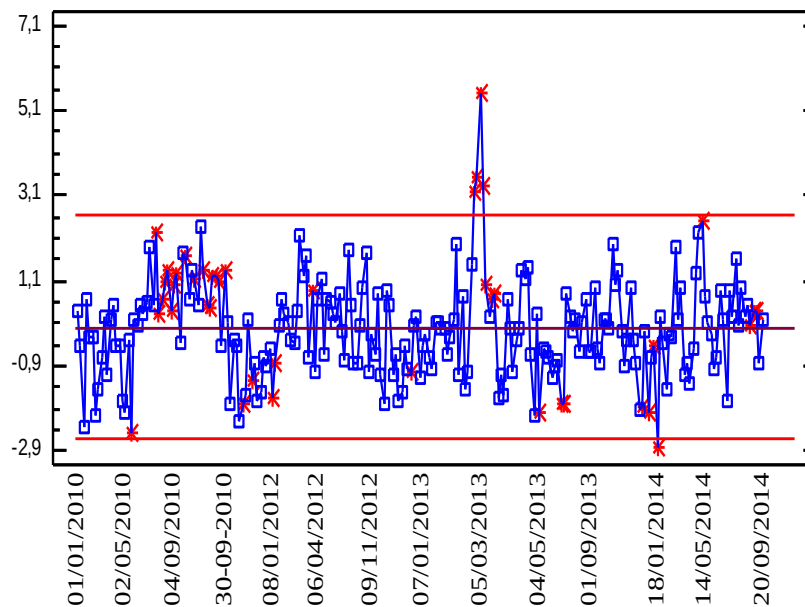


Fig.3.7 Gráfico de Individuos - PCOMP_6, 5 fuera de límites, LCS = 2,62, CTR = 0,00 LCI = - 2,62.

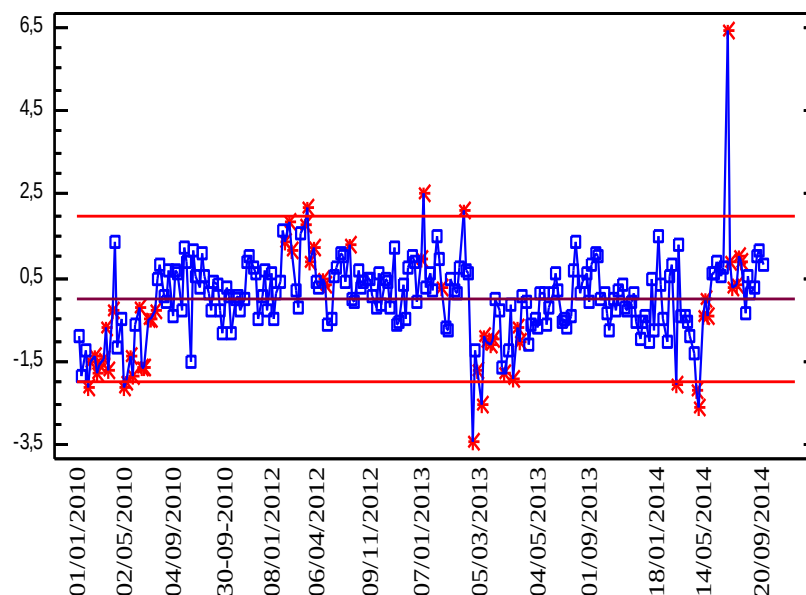


Fig.3.8 Gráfico de Individuos - PCOMP_7, 11 fuera de límites, LCS = 1,96, CTR = 0,00 LCI = - 1,96.

Tabla 3.5 Pesos de componentes principales mayores de 0,14.

códigos	Componente 1	Componente 2
A005	0,147233	0,24338
A006	0,153559	0,234233
A007	0,145622	0,249173
A008	0,151739	0,240595
A009	0,141192	0,254017
A011	0,140554	0,253674
A025	0,16256	0,185146
A026	0,16069	0,174597
B009	0,146104	-0,192605
B010	0,16334	-0,181494
B029	0,166209	-0,10222
B089	0,187282	-0,119739
B090	0,18525	-0,132602
I001	0,150926	-0,118514
I003	0,177113	-0,141758
I004	0,182778	-0,104992
J016	0,148442	0,144208
J018	0,187051	-0,118472
J019	0,186496	-0,133429
J022	0,144725	0,116117

Como se muestra en la tabla 3.5 de 44 variables consideradas inicialmente 20 resultaron ser las de mayor variabilidad durante el 2014, es decir el método aplicado redujo a más de la mitad aquellas variables consideradas como que afectan el consumo de energía del sistema de aire ,variables estas a tener en cuenta para analizar el comportamiento de dicho sistema.

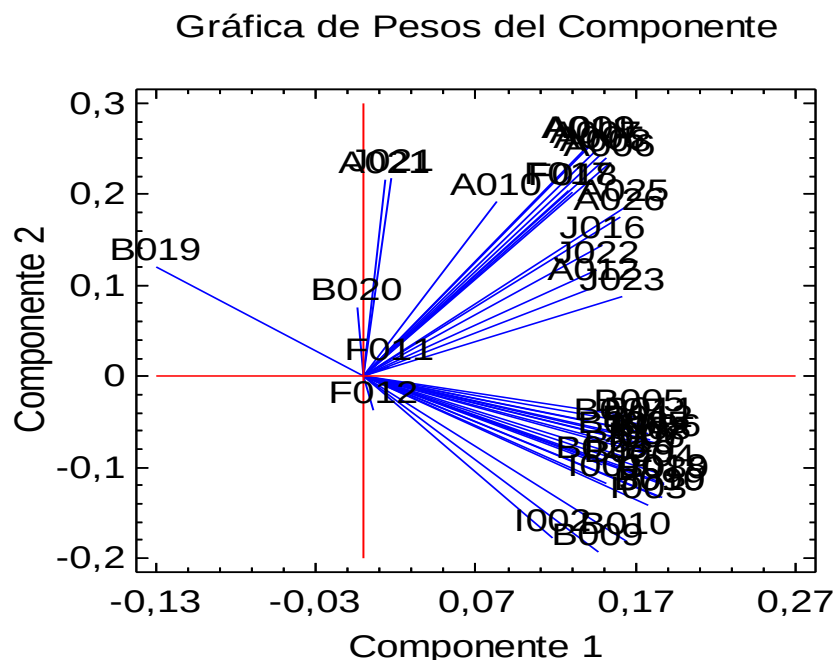


Figura 3.9 Grafico de los componentes 1 vs. 2.

La figura 3.9 muestra los componentes 1 y 2 graficados para de la totalidad de las variables. Este gráfico permite ver cuales variables reciben más peso de los componentes 1 y 2 y puede ser usado para llegar a los resultados de la tabla 3.5.

3.2.2 Comportamiento real de las variables más influyentes en las variaciones del consumo de energía de los VTF U - 4.

A continuación se muestra el comportamiento real de algunas de las variables que fueron seleccionadas como las de mayor variabilidad según el análisis de componentes principales, para mostrar la validez de los resultados obtenidos y hacer un posterior análisis de la implicación de estas en el sistema de aire y en el consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado.

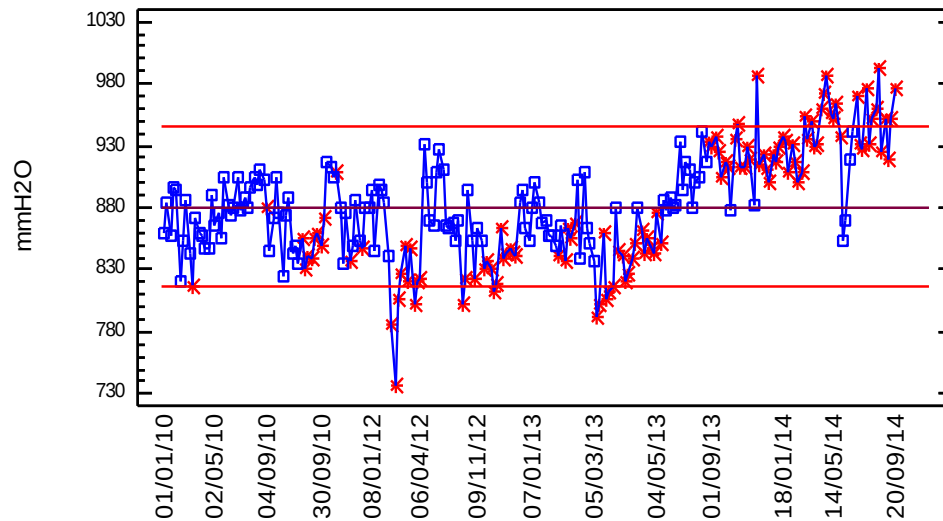


Fig.3.10 Comportamiento de la variable presión de descarga del VTF 4A (A005), 29 fuera de límites. La LSC+3 sigma=944, 84, la CTR=880,89 y la LCI-3 sigma=816,94.

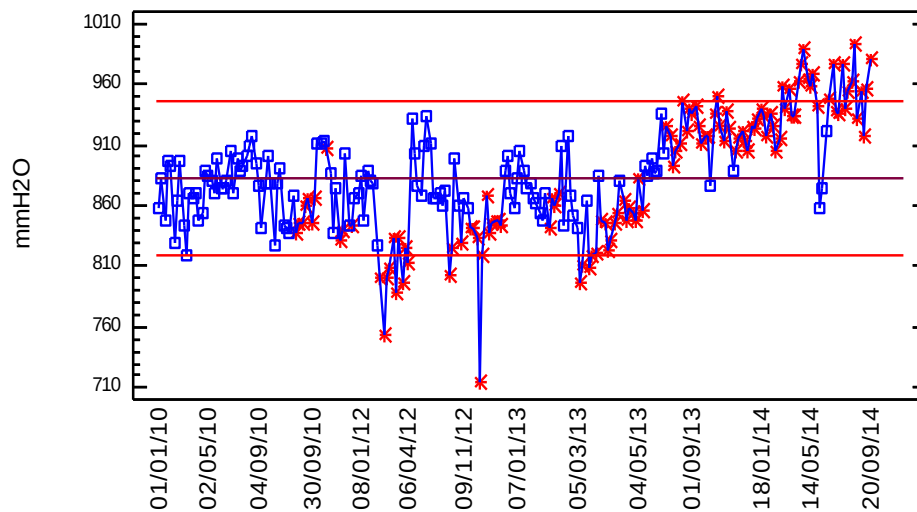


Fig. 3.11 Comportamiento de la variable presión de descarga de VTF 4B (A006), 30 fuera de límites. La LSC+3 sigma=946,61, la CTR=882,79 y la LCI-3 sigma=818,97.

En la figura 3.10 y 3.11 se puede observar como a partir del mes de mayo del año 2013 las presiones de descarga de ambos VTF de la U- 4 superan la media de 882,9 mmH₂O y ya a finales del 2014 superan la LSC en la mayoría de las mediciones, con un aumento significativo en ambos casos.

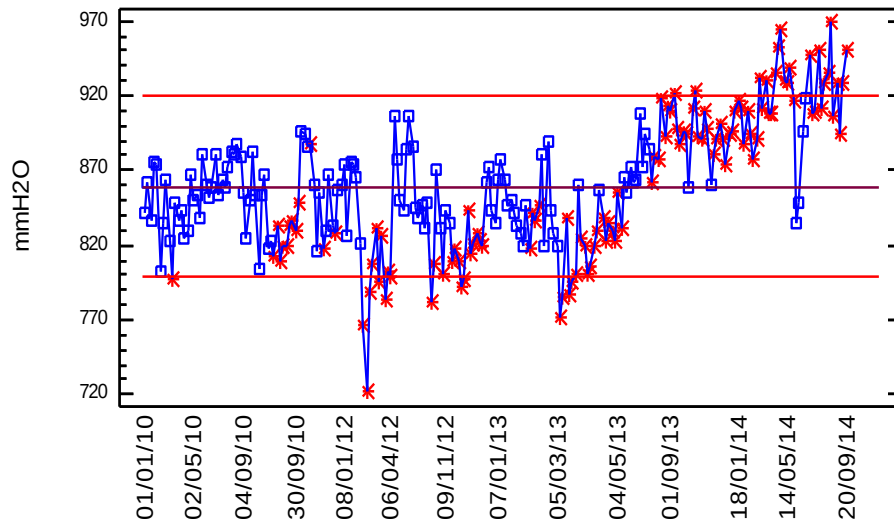


Fig.3.12 Comportamiento de la variable presión de aire entrada al CAR 4A (A007) ,31 fuera de límites. La LSC+3 sigma =920, 48, la CTR=859,31 y la LCI-3 sigma=798,14.

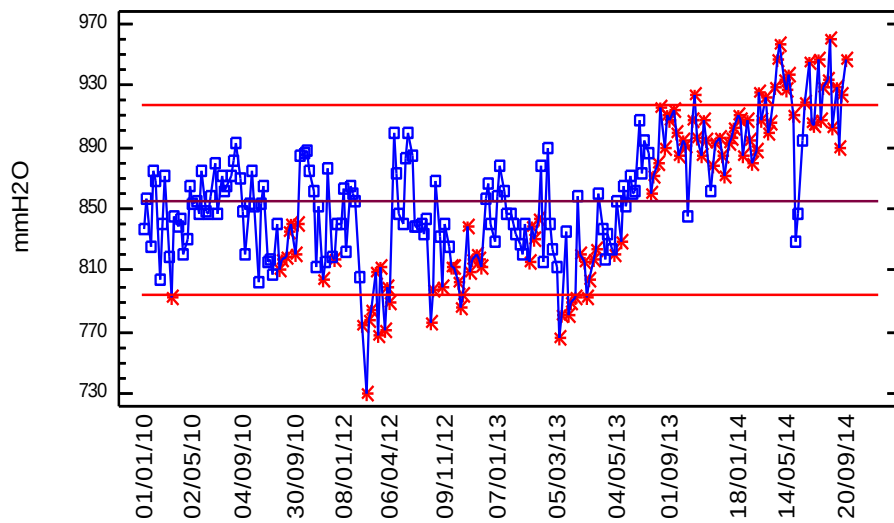


Fig.3.13 Comportamiento de la variable presión de aire entrada al CAR 4B (A008) ,34 fuera de límites. La LSC+3 sigma =917,11, la CTR=855,48 y la LCI-3 sigma=793,86.

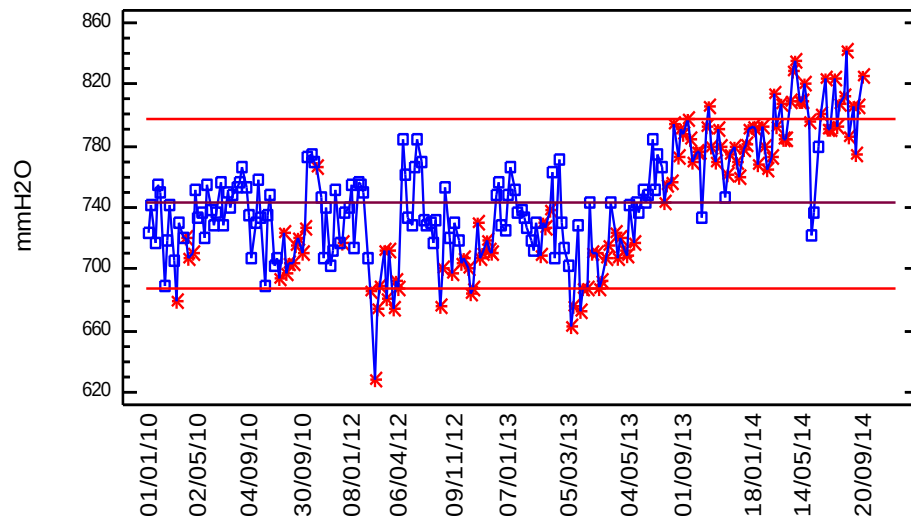


Fig.3.14 Comportamiento de la variable presión de aire salida al CAR 4A (A009) ,35 fuera de límites. La LSC+3 sigma =797,57, la CTR=742,90 y la LCI-3 sigma=688,23.

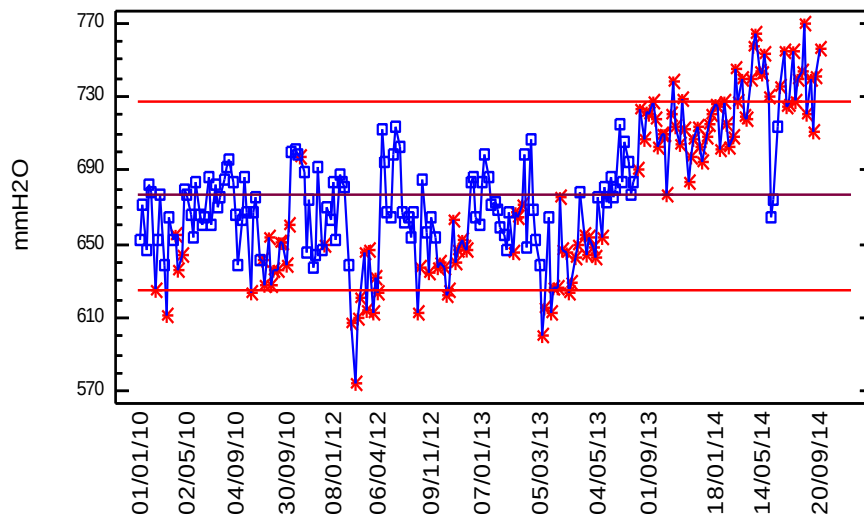


Fig.3.14 Comportamiento de la variable presión caja de aire (A011) ,37 fuera de límites. La LSC+3 sigma =727,54, la CTR=676,35 y la LCI-3 sigma=625,17.

De la fig.3.12 a la 3.15 se muestra el comportamiento de las variables de presión de entrada de aire en ambos CAR, presión salida de aire CAR 4A y presión en la caja de aire a quemadores de la unidad, se puede observar el aumento de presión a partir de mediados del 2013 superando la media en las 4 variables y a finales del 2014 superan la LSC.

Otras variables no graficadas como el % de apertura de las compuertas de regulación de los VTF A y B crecieron también por encima del comportamiento medio de 74,67 y 71,28 % respectivamente. La temperatura del aire de entrada a los calentadores de aire regenerativos (CAR) tuvieron mucha variabilidad pero no crecieron significativamente por encima de sus valores medios de 105,9 °C para el A y 101,39 °C para el B.

La diferencia de presión entre la entrada y la salida del CAR A creció significativamente por encima de la media de 115,88 mmH₂O. El flujo de aire para la combustión que se mide en porcentaje se mantuvo por encima del valor medio de 76,22 %.

El cambio de las variables antes mencionadas indica cambios en el comportamiento de las curvas de funcionamiento de los VTF, ver fig. 3.15, las cuales inciden en el aumento del consumo de energía de los mismos. Aumentos en el % de aperturas de las compuertas implica un cambio para una curva de trabajo de mayor capacidad y el aumento en las presiones de descarga y en las del resto del sistema movimientos para puntos de trabajo de menos eficiencia.

El resto de las variables seleccionadas pertenecen a la parte mecánica del sistema, desviaciones en las mismas pueden provocar desbalance y desalineamiento mecánicos en el sistema y en los ventiladores lo que en dependencia de la magnitud puede provocar sobreconsumo de energía.

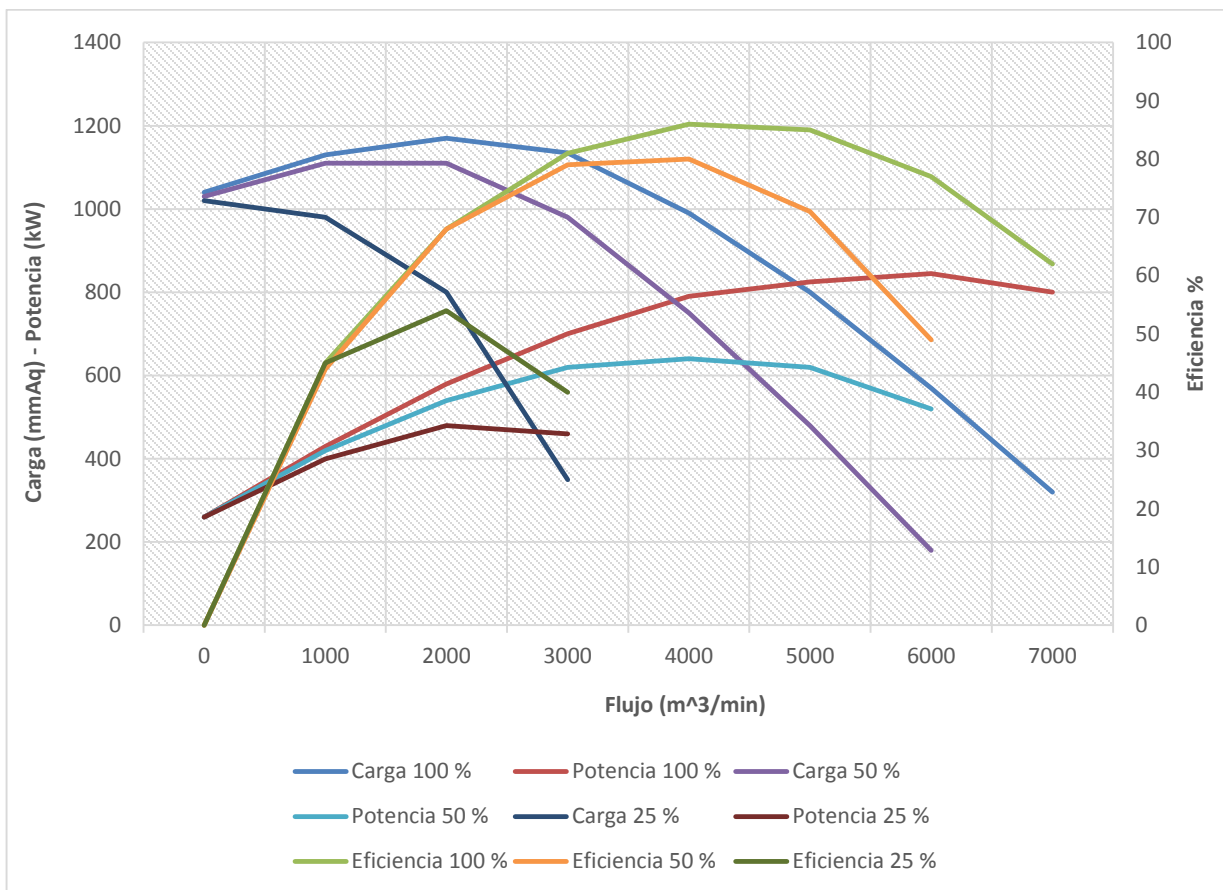


Fig. 3.15 Curvas características de los ventiladores de tiro forzado.

3.3 Variables del sistema de circulación que más inciden en las variaciones del consumo de energía de las bombas de circulación de la unidad 4 e influencia de las mismas en el período de tiempo estudiado.

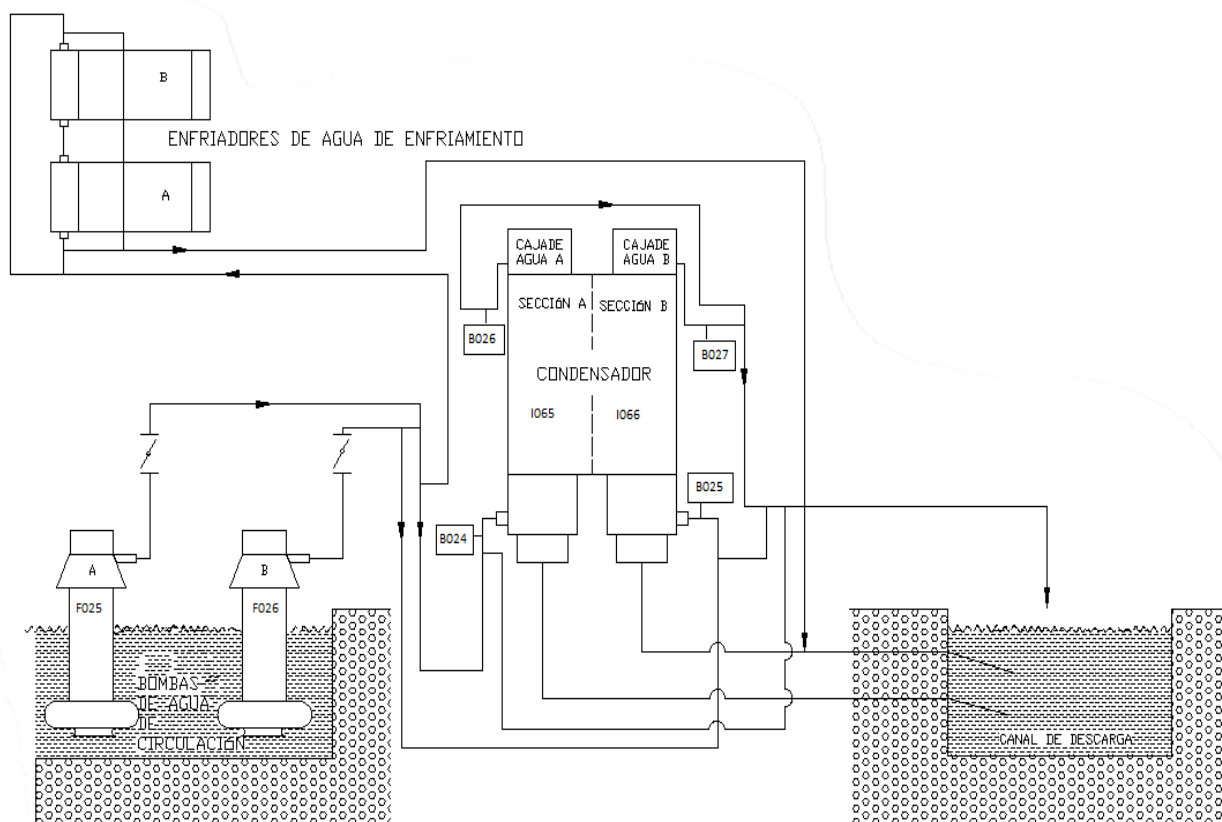


Fig.3.16 Esquema del sistema de circulación y ubicación de los puntos de medición de las variables que se monitorean.

Tabla 3.6 Variables del sistema de circulación que más inciden en las variaciones del consumo de energía de las B.C.

Código	Variable	Unidad	Código	Variable	Unidad
B024	Temp.agua ent. Sección A	°C	E061	Temp pozo caliente	°C
B025	Temp.agua ent. Sección B	°C	F025	Amperaje B.C 4A	A
B026	Temp.agua sal. Sección A	°C	F026	Amperaje B.C 4B	A
B027	Temp.agua sal. Sección B	°C	I065	Pr.Dif.Seccion A	
D005	Vacío	mmHg	I066	Pr.Dif.Seccion B	
E009	Temp.escape turbina	°C			

En el sistema de circulación se aplicó el mismo análisis estadístico que para los VTF con el mismo propósito de obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 11 variables que explican la mayor variabilidad en los datos, en este caso 2 componentes se extrajeron puesto que 2 componentes tuvieron autovalores mayores o iguales que 1,0. En conjunto ellos explican 75,17 % de la variabilidad en los datos originales. Ver anexo 4.

Tabla 3.7 Pesos de los Componentes.

	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2
B024	0,341309	0,275862
B025	0,349245	0,275148
B026	0,377103	0,137238
B027	0,377713	0,101634
D005	-0,360432	0,0919447
E009	0,377734	-0,020589
E061	0,317013	-0,0146199
F025	-0,100138	0,446702
F026	0,000690775	0,36864
I065	0,27564	-0,433042
I066	0,132533	-0,5357

En la tabla 3.7 se observan los pesos dados a las 11 variables consideradas en el sistema de circulación por los componentes 1 y 2, las variables temperaturas de entrada del agua de mar a la sección A y B (B024 y B025) y las presiones diferenciales de las secciones A y B (I065 y I066).

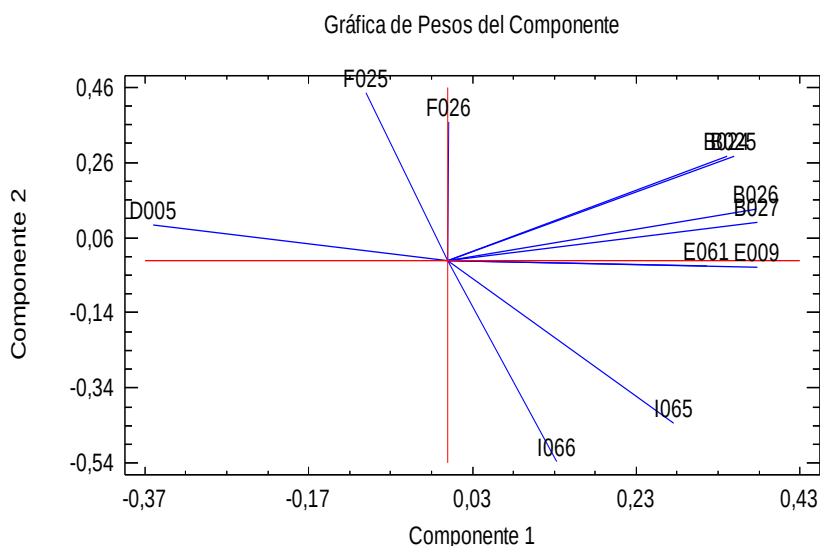


Fig.3.17 Grafico de los componentes 1 vs el 2.

En la figura 3.17 se graficaron los componentes 1 y 2 para el sistema de circulación con la misma se ratifica la selección efectuada en la tabla 3.7. Prueba de normalidad para los dos componentes Ver anexo 5.

3.3.1 Gráficos de control para los 2 PCOMP.

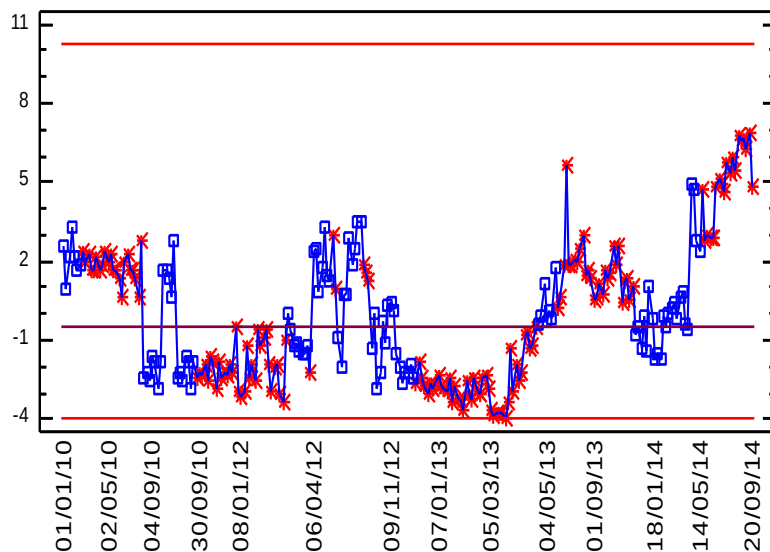


Fig.3.18 Gráfico de individuos PCOMP-1; 1 fuera de límites, LSC=10,30, CTR=-0,44 y LIC=-3,97

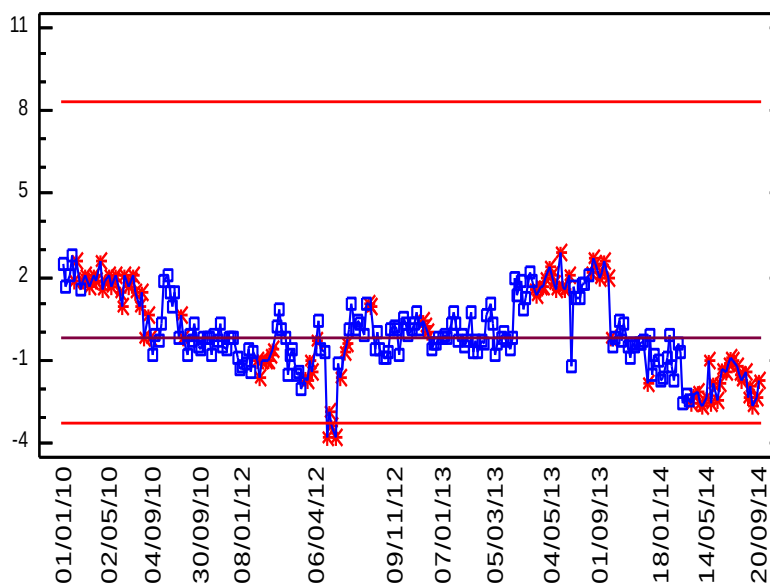


Fig.3.19 Gráfico de individuos PCOMP-2; 2 fuera de límites. LSC=8,36, CTR= - 0,19 y LIC=-3,28.

3.3.2 Comportamiento real de las variables más influyentes en las variaciones del consumo de energía de las bombas de agua de circulación.

A continuación se grafica el comportamiento real de las variables que fueron detectadas por el método de componentes principales como las de mayor variabilidad en el 2014.

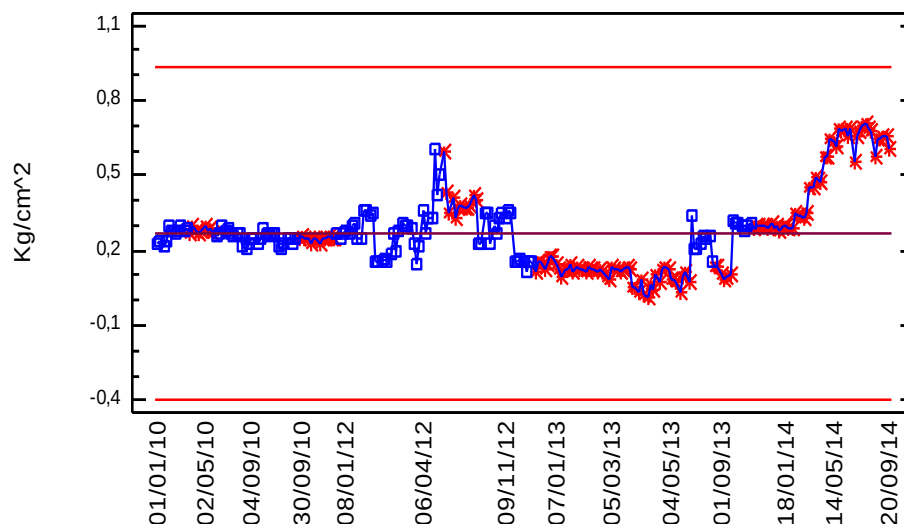


Fig.3.20 Comportamiento de la variable Presión diferencial de la sección A del condensador (I065) ,0 fuera de límites. La LSC+3 sigma =0,92, la CTR=0,26 y la LCI-3 sigma=-0,40.

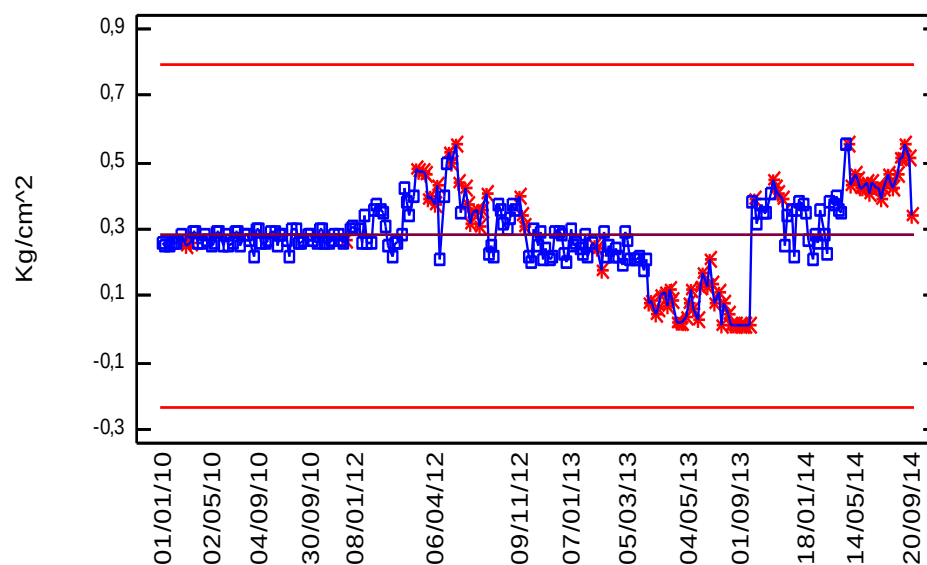


Fig.3.21 Comportamiento de la variable Presión diferencial de la sección B del condensador (I066) ,0 fuera de límites. La LSC+3 sigma =0,79, la CTR=0,28 y la LCI-3 sigma =-0,23.

En las figuras 3.20 y 3.21 se muestra el comportamiento de las variables de presión diferencial en ambas secciones del condensador, se puede observar el aumento de dicha presión a partir de septiembre del 2013, llegando a sobrepasar la media del período que fue de 0,26 en la sección A y 0,28 en la sección B. Cuando aumenta la presión diferencial en las secciones del condensador aumenta la presión de descarga de las bombas de circulación, lo que trae consigo un aumento de la demanda de potencia de la bomba por el tipo de curva característica que presentan estos equipos como se puede ver en la fig. 3.22, pero todo esto ocurre en detrimento de la eficiencia de dicha bomba.

Otras variables no graficadas como las temperaturas de entrada de agua de mar en ambas secciones del condensador (B024 y B025) y las temperaturas de salida de agua de mar (B026 y B027) respectivamente, crecieron también por encima de la media en el período estudiado con valores de (27,63°C y 27,46°C) para la entrada y (37,55 °C y 37,87°C) para la salida. Estas variables antes mencionadas no presentan una correspondencia directa en el consumo eléctrico de las bombas de circulación pero afectan directamente el vacío en el condensador lo que trae como consecuencia variaciones significativas en el consumo eléctrico de los equipos de uso planta lo que eleva el FI de la unidad.

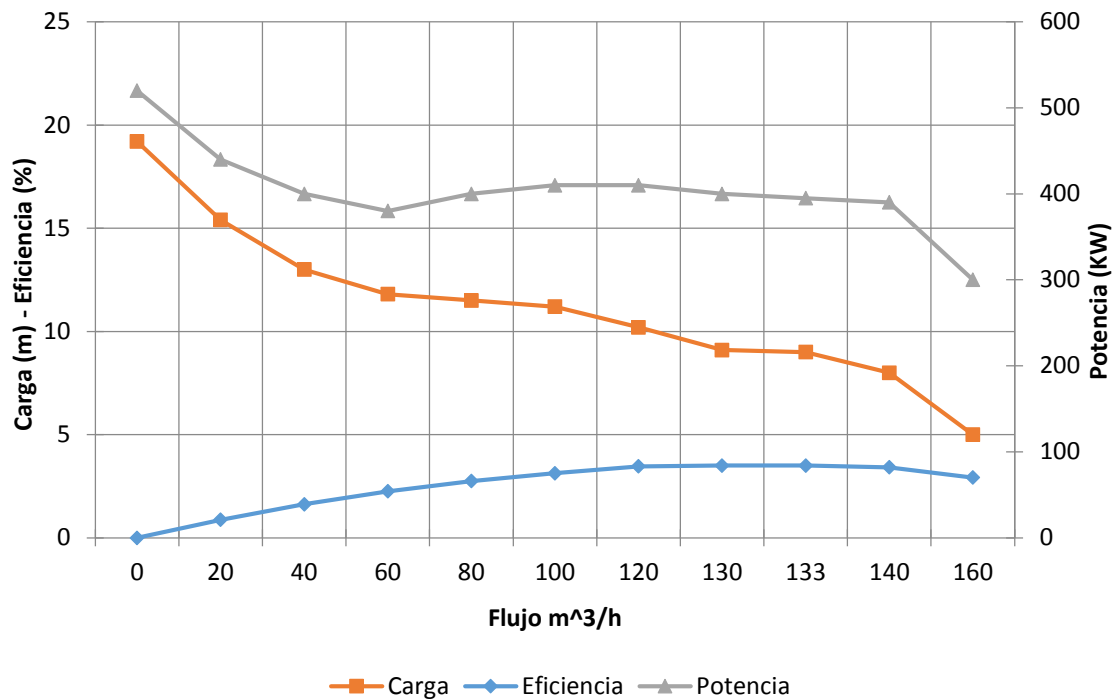


Fig.3.22 Curvas características bomba de circulación.

3.4 Medidas a tomar en función de los resultados obtenidos.

Sistema de aire:

El aumento significativo de las presiones en la descarga de los VTF, de las presiones de aire a la entrada y salida de ambos CAR y el aumento en el % de apertura de las compuertas de succión, pueden ser debidas a infiltraciones de aire en los CAR después de 7 años de operación, por lo que se recomienda efectuar el análisis de los productos de la combustión, a partir del cual es posible calcular la relación aire - combustible, y el grado de efectividad de la combustión y determinar el porcentaje en volumen de cada gas componente, para determinar si el valor de las infiltraciones de aire de una sección de aire supera la norma establecida de un 10 % según consideraciones tomadas en la planta y planificar el mantenimiento del tabique y de los sellos radiales del CAR.

Planificar el lavado del CAR A donde el diferencial creció significativamente por encima de la media que fue de 115 mmH₂O.

El aumento de las temperaturas en las chumaceras del VTF A y del VTF B puede estar ocasionado por desbalance o alteraciones en el alineamiento mecánico del equipo lo

que puede conllevar a un aumento en el consumo de energía del ventilador, por lo que se recomienda, orientar al grupo de diagnóstico que realice un análisis espectral, lo que involucra: análisis de vibraciones, análisis de fases, unido al estudio del consumo de energía con el analizador de redes, para determinar la magnitud del posible desalineamiento o desbalance para planificar un mantenimiento mecánico.

Sistema de circulación:

Debido al aumento de las presiones diferenciales de las entradas y salidas del agua de mar de las secciones en las que está dividido el condensador se recomienda: verificar y evaluar periódicamente el óptimo funcionamiento del sistema de limpieza con el uso de bolas y planificar la limpieza mecánica para evitar ensuciamientos excesivos en el condensador lo que tiene como consecuencia una disminución en la transferencia de calor entre el vapor de escape de la turbina y el agua de mar afectando la presión del vacío en el condensador.

Conclusiones parciales del capítulo:

1. El uso de la estadística multivariada permitió determinar cuáles son las variables más influyentes en el consumo de energía eléctrica en los equipos de los sistemas de aire y circulación de agua de mar en la E.T.E Cienfuegos en el último año del período 2014.
2. El análisis de componentes principales permitió reducir en un 47% el número de variables a controlar en los dos sistemas estudiados, esto reduce notablemente el tiempo para determinar la incidencia de estas variables en el período de tiempo estudiado al no tener que estudiar el 100%.
3. En el período de tiempo estudiado las variables que más incidieron en el consumo de energía en el sistema de aire y gases fueron: presión de descarga de ambos VTF, presión de aire entrada en ambos calentadores de aire regenerativos (CAR) y salida del CAR A, presión caja de aire, compuerta de regulación en ambos VTF, temperatura de aire entrada a ambos CAR, temperatura aire entrada/ gases salida en ambos CAR, temperatura chumaceras libre y motor del VTF A y temperatura lado motor VTF ,flujo de aire para la combustión, temperatura promedio de ambos CAR y diferencial de presión del CAR A por aire.

4. Las variables que más incidieron en el sistema de agua de circulación en este período fueron: presión diferencial en ambas secciones del condensador y con menor variabilidad temperaturas del agua de mar entrada y salida en ambas secciones de condensador.
5. Las medidas tomadas según el análisis de los resultados obtenidos fueron: analizar los gases de escape para determinar el grado de infiltraciones en los calentadores de aire regenerativos, indicar la realización de un análisis espectral para detectar un posible desalineamiento y o desbalance en los ventiladores de tiro forzado para planificar el manteniendo de los mismos, verificar el funcionamiento del sistema de limpieza del condensador por bolas y planificar el lavado del CAR A y de las secciones en las que se divide el condensador.

Conclusiones generales:

1. El factor de insumo de energía en Cuba se comporta en un rango entre 5,41 y 10,58 %. En ocho de las doce plantas mostradas se presentan factores de insumo por encima de lo recomendado por la literatura que es de un 7%, lo que denota un aumento del consumo de energía de los principales equipos que indiquen en el mismo.
2. Los equipos que mayor influencia tienen en el insumo de las plantas termoeléctricas en Cuba que manejan elevados flujos con alto consumo de energía asociado se encuentran: las BAA, los VTF y las BC con rangos de potencia de 1850 y 4500 kW, 630 y 1825kW y 450 y 793 kW; para flujos entre 325 y 548 m³/h, 193000 y 486720 m³/h y 8640 y 20342 m³/h respectivamente.
3. En la mayoría de las plantas estos equipos tienen más de 30 años de explotación hecho que debe incidir en el aumento de consumo de estos equipos, siendo los mismos los responsables del 33 % del consumo de energía propio de las plantas.
4. Los ventiladores de tiro forzado de la unidad 4 presentan incrementos en el factor de insumo para carga promedio similares en años anteriores, a finales del período estudiado 2010 – 2014, con valores superiores al 1.4 %
5. El consumo real de energía de los ventiladores forzados de la unidad 4 presenta una tendencia lineal a acercarse el valor que se planifica, como el modelo de planificación no cambia esto denota incremento en el consumo de energía de los mismos.
6. El consumo real de energía de las bombas de circulación de la unidad 4 se ha acercado en muchas ocasiones al consumo de energía planificado, destacándose un acercamiento a finales del 2014 esto denota incremento en el consumo de estos equipos.
7. Con el método de componentes principales aplicado se redujo a más de la mitad el número de variables a considerar en los sistemas de aire y de circulación ante el incremento en el consumo de energía y el aumento del factor de insumo.
8. Entre las variables más influyentes en el consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado (VTF) a finales del período 2010 – 2014 se encuentran: presión de descarga de los VTF A y B, presión de aire de entrada al calentador de aire regenerativo (CAR) A y B, presión de aire a la salida de los CAR, presión de la

caja de aire, % de apertura de las compuertas de regulación, temperaturas de las chumaceras del motor y del ventilador de tiro forzado y el flujo de aire para la combustión.

9. Las variables más influyentes en el consumo de energía del sistema de circulación fueron las presiones diferenciales de las secciones A y B del condensador.
10. Por los resultados obtenidos se tomaron medidas como: analizar los gases de escape para determinar el grado de infiltraciones en los calentadores de aire regenerativos, la realización de un análisis espectral para detectar un posible desalineamiento y o desbalance en los ventiladores de tiro forzado para planificar el mantenimiento de los mismos, verificar el funcionamiento del sistema de limpieza del condensador por bolas y planificar el lavado del CAR A y de las secciones en las que se divide el condensador.

Recomendaciones:

- 1- Elaborar un software para realizar con rapidez el análisis estadístico (componentes principales) con el objetivo de realizarlo en intervalos de tiempo más cortos.
- 2- Continuar estudios para determinar otras causas influyentes en el insumo de energía de las unidades.

Bibliografía

- Arteaga F. & Ferrer A. (2003). MONITORIZACIÓN DE PROCESOS MULTIVARIANTES CON DATOS FALTANTES MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.
- Castillo H.E. (1978). *Calderas Japonesas "Hitachi"*. La Habana: Ministerio de la Industria Eléctrica, Dirección de Capacitación.
- Cherkasski, V, M. (1986). *Bombas ventiladores compresores*. MOSCU: MIR.
- Clavijo Méndez J.A. (2003). Análisis de componentes principales - ACP. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos15/analisis-acp/analisis-acp.shtml#ANALISIS>.
- De la Torre Silva, F. (2009). *Metodología para la Evaluación del Comportamiento Mecánico - Dinámico - Funcional de las Turbinas a Vapor de 100 MW de Potencia de Generación*. Tesis Presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, "Instituto Superior Politécnico" José Antonio Hecheverría.
- Domenech F. W. (1978a). *Unidades Japonesas de 169 MW. Turbina y Equipos Auxiliares*. La Habana.
- Domenech F.W. (1978b). *Unidades Japonesas de 169 MW. Turbina y Equipos Auxiliares. Diagramas*. La Habana.
- Domenech W.F. (1978). *Caldera Japonesa HITACHI*. La Habana.
- FlaktWoods. (2014). Industrial Fan Application.
- García, Antonio Pernús. (2013). Características de los equipos principales instalados en las plantas térmicas.
- Hair J.F, Anderson, R.E, & Black W.C. (1999). *Análisis Multivariante* (5º ed.). Prentice Hall.

Hitachi. (2014). Hitachi América Ltd. Retrieved from <http://www.hitachi-america.us/products/business/isd/pumps/>.

Hitachi. (2012). Hitachi Pumps 2008 - VHPC.

Iberdrola. (2012). Eficiencia energética Iberdrola. *Eficiencia energética Iberdrola*. Retrieved from (http://www.iberdrola.es/webibd/gc/prod/es/doc/eficiencia_energetica_empresa_electrica.pdf).

Montgomery D.C. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos* (2º ed.). LIMUSA WILEY.

Mur González O. (2011). *Determinación de las causas del incumplimiento de las normas de insumo en la CTE CMC*. Universidad de Cienfuegos.

NIST - SEMATECH National Institute of Standards and Technology. (2013). *Engineering Statistical Handbook*. Retrieved from www.itl.gov.

Ravaf, Tejas N, & Patelb, R.N. (2012). Optimization of Auxiliary Power Consumption of Combined Cycle. *Sciverse ScienceDirect*. Retrieved from www.sciencedirect.com.

Rizhkin, Ya. V. (1987). *CENTRALES TERMOELECTRICAS* (2º ed.). Playa, Ciudad de La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.

Shlens J. (2005, December 10). Tutorial on Principal Component Analysis.

STATGRAPHICS. (2007, April 25). Componentes Principales.

STATGRAPHICS. (2006). Ajuste de Distribución (Datos No Censurados).

Vazquez Ramos O. (2015). Ultimos equipos solicitados por la planta.

Wikipedia. (2015). Central Termoeléctrica. Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/Central_termoel%C3%A9ctrica.

Anexos:

Anexo 1 Pruebas de normalidad Unidad 4.

Tabla 1. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para CP – U4, FI - U4 y BC-4 prueba de Kolmogorov-Smirnov.

	Normal CP U#4	Normal FI U#4	Normal FI BC U# 4
Valor P	0,55	0,68	0,63

Tabla 2. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para VTF – U-4, prueba de Shapiro-Wilk.

	Normal-FI VTF U# 4
Valor-P	0,15

El uso de valores P en pruebas de hipótesis: El valor P es la probabilidad de que el estadístico de prueba asuma un valor que sea al menos tan extremo como el valor observado del estadístico cuando la hipótesis nula H_0 es verdadera. En términos más formales el valor P se define como el nivel de significación menor que llevaría a rechazar la hipótesis nula H_0 . (Montgomery, 2004).

En la tabla 1 y 2 se muestran los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si las CP, FI, VTF y BC de la unidad 4 pueden modelarse adecuadamente con una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que los datos provienen de una distribución normal con 95% de confianza.

Anexo 2 Prueba de Normalidad de los componentes principales sistema de aire.

Con el objetivo de usar los componentes principales para controlar las 44 variables de las cuales ellos explican el comportamiento se probó la normalidad de los 7 componentes principales.

Tabla 3.Pruebas de normalidad Estadístico W de Shapiro-Wilk.

	PCOMP_1	PCOMP_2	PCOMP_3	PCOMP_4	PCOMP_6
	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Estadístico	0,974929	0,986016	0,980418	0,984446	0,980374
Valor -P	0,0666165	0,735752	0,306917	0,616724	0,303992

Tabla 4.Pruebas de Bondad-de-Ajuste. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	PCOMP_5	PCOMP_7
	Normal	Normal
DMAS	0,1009	0,0603318
DMENOS	0,0971872	0,0600564
DN	0,1009	0,0603318
VALOR-P	0,178526	0,376088

En las tablas anteriores, ninguna de las distribuciones es rechazada por la prueba en un nivel de 5% significancia.

Anexo 3. Histogramas que muestran el comportamiento normal de los 7 componentes principales del sistema aire.

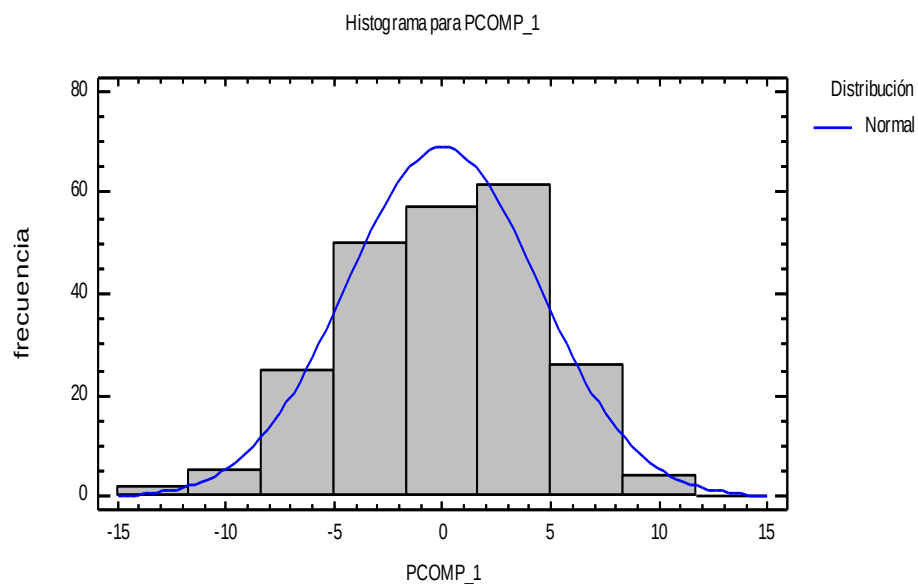


Fig.1 Histograma para PCOMP 1.

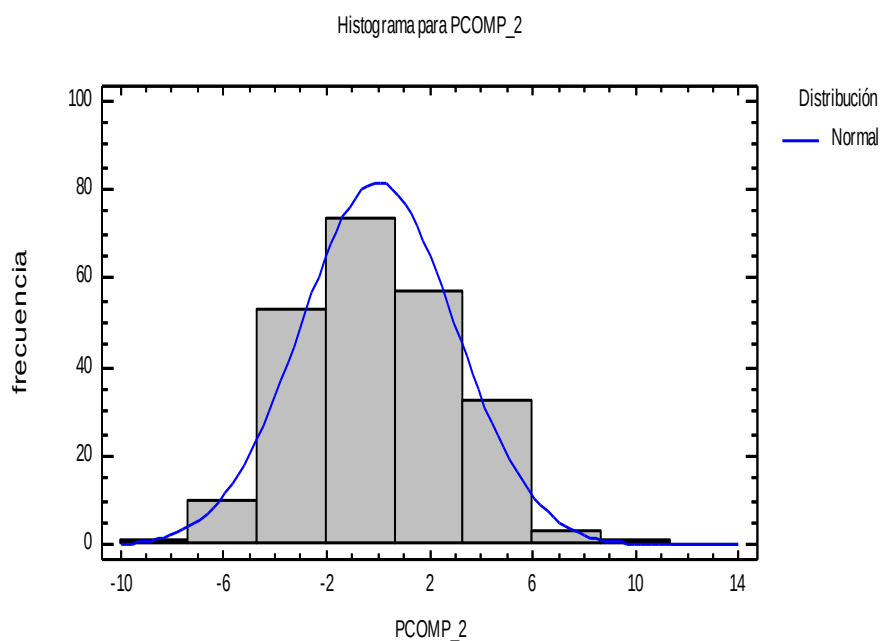


Fig. 2 Histograma para PCOMP 2.

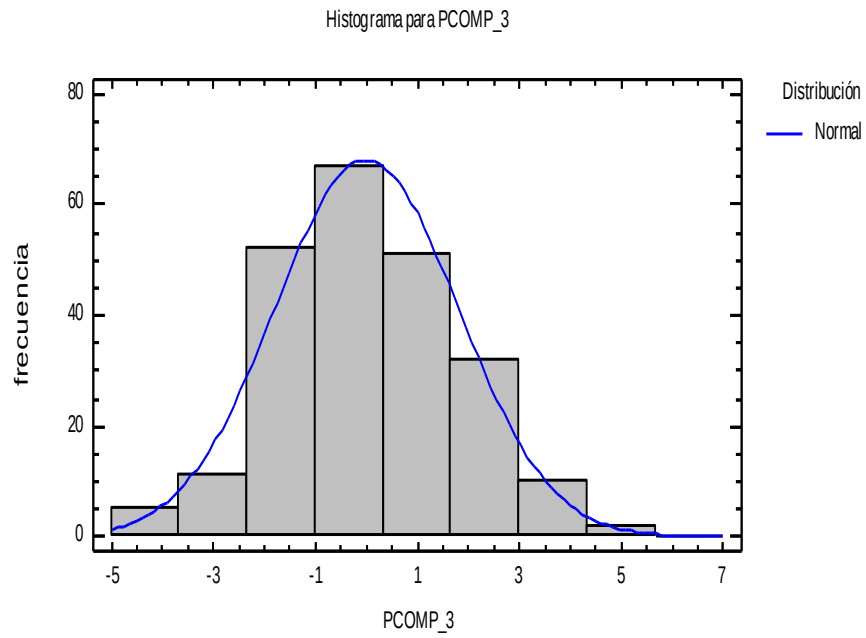


Fig. 3 Histograma para PCOMP 3.

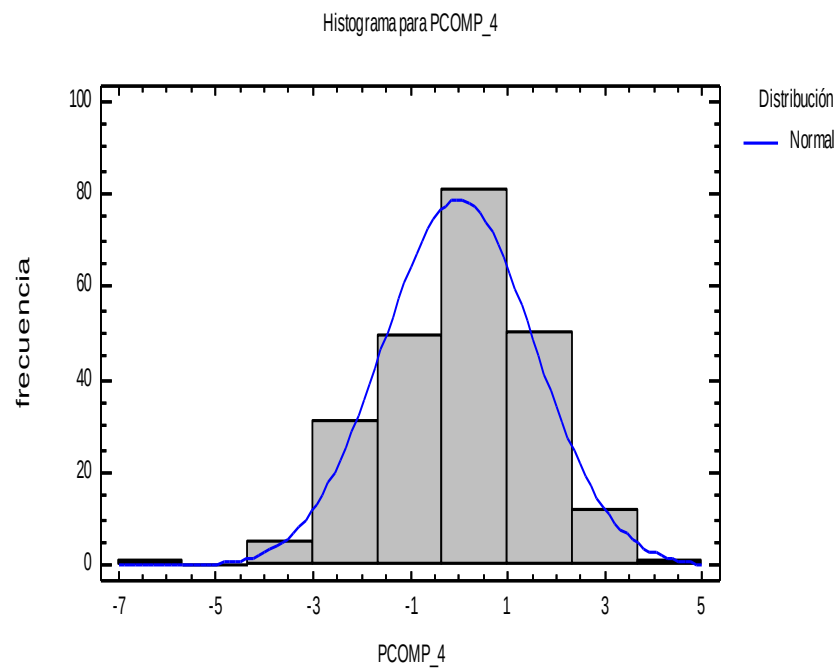


Fig. 4 Histograma para PCOMP 4.

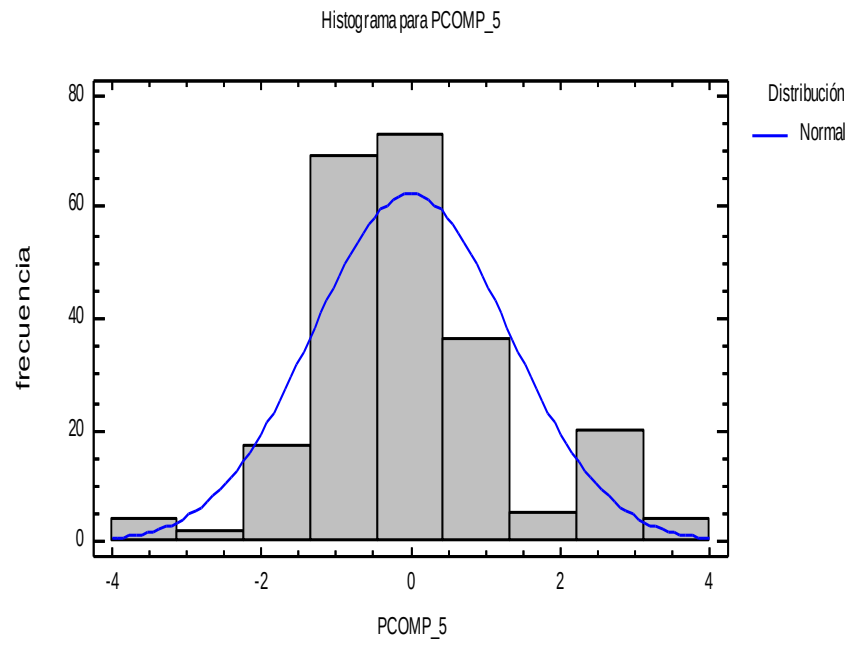


Fig. 5 Histograma para PCOMP 5.

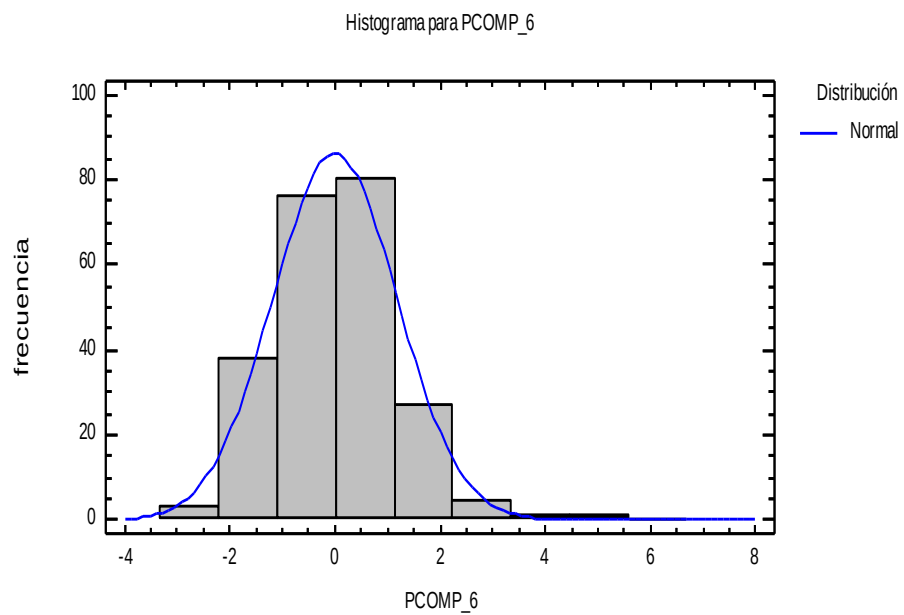


Fig. 6 Histograma para PCOMP 6.

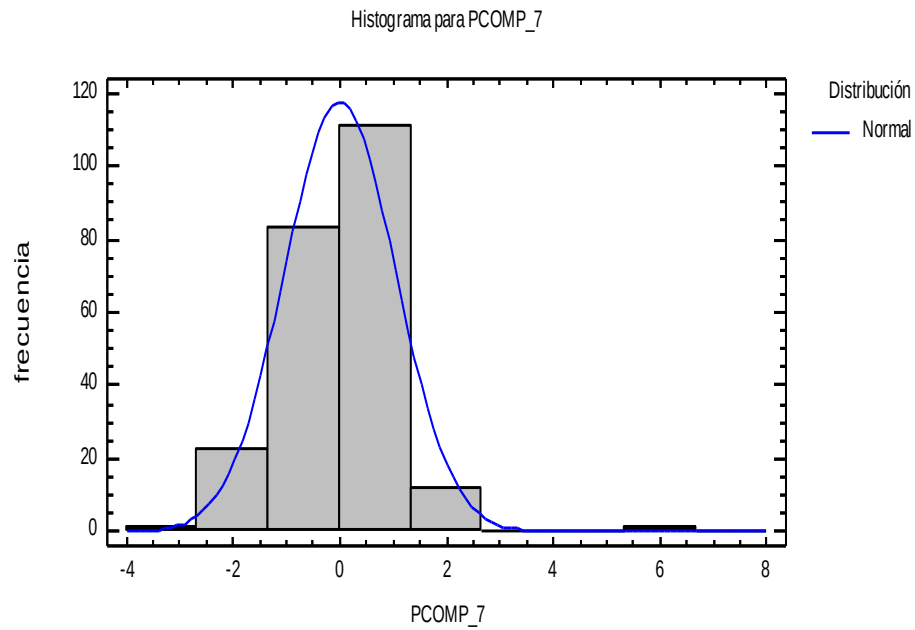


Fig. 7 Histograma para PCOMP 7.

Anexo 4. Análisis de los dos componentes principales del sistema de circulación.

Tabla 5. Análisis de Componentes Principales

Componente		Porcentaje de	Porcentaje
Número	Autovalor	Varianza	Acumulado
1	6,31565	57,415	57,415
2	1,95356	17,760	75,175
3	0,926646	8,424	83,599
4	0,718831	6,535	90,133
5	0,504539	4,587	94,720
6	0,254916	2,317	97,038
7	0,136077	1,237	98,275
8	0,102787	0,934	99,209
9	0,0438735	0,399	99,608
10	0,0251394	0,229	99,837
11	0,0179822	0,163	100,000

Anexo 5 Pruebas de Normalidad de los componentes principales del sistema de circulación.

Con el objetivo de usar los componentes principales para controlar las 11 variables de las cuales ellos explican el comportamiento se probó la normalidad de los 2 componentes principales.

Pruebas de Bondad-de-Ajuste Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 6.Pruebas de normalidad.

	PCOMP_1	PCOMP_2
	Weibull (3-Parámetros)	Valor Extremo Más Grande
DMAS	0.0721736	0.0777767
DMENOS	0.0761948	0.0799419
DN	0.0761948	0.0799419
Valor-P	0.111027	0.0829609

Histogramas que prueban la normalidad de los 2 componentes principales del sistema de circulación.

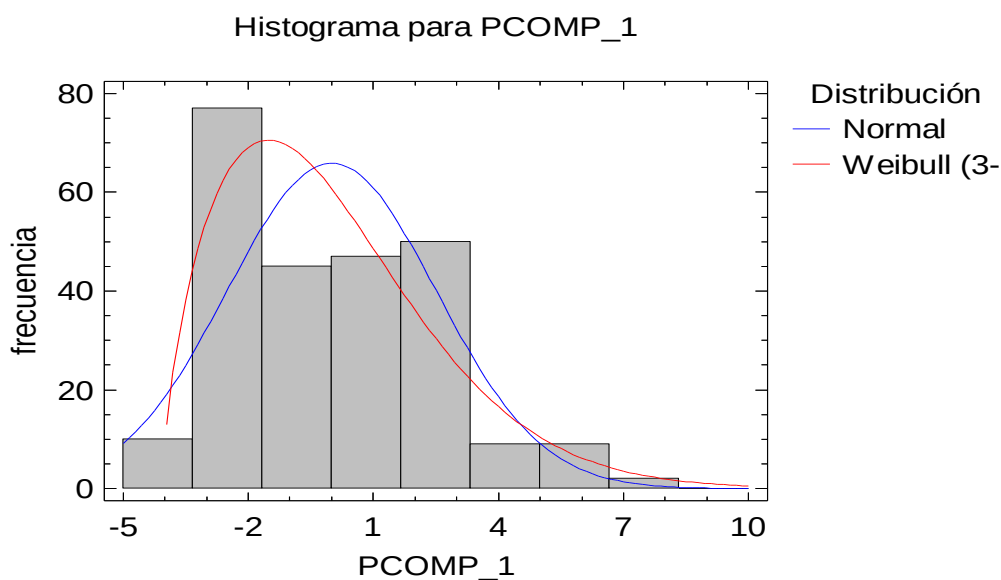


Fig.8 Histograma para PCOMP_1

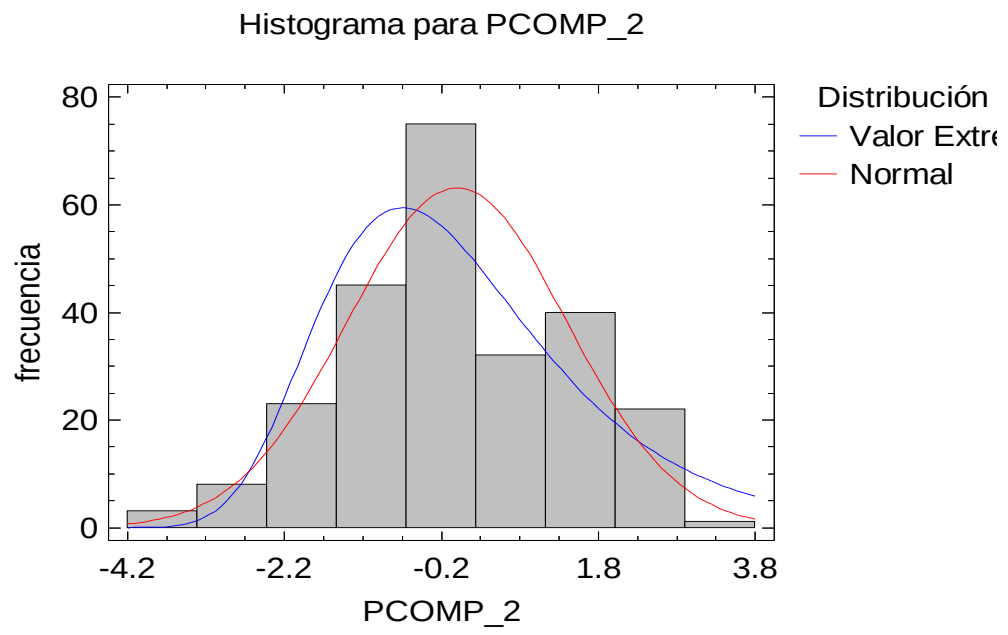


Fig.9 Histograma para PCOMP_2.