

**Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”**

**Facultad de Ingeniería**

**Estudio preliminar del incremento del consumo de energía de los ventiladores de tiro forzado de la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”.**

**Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico.**

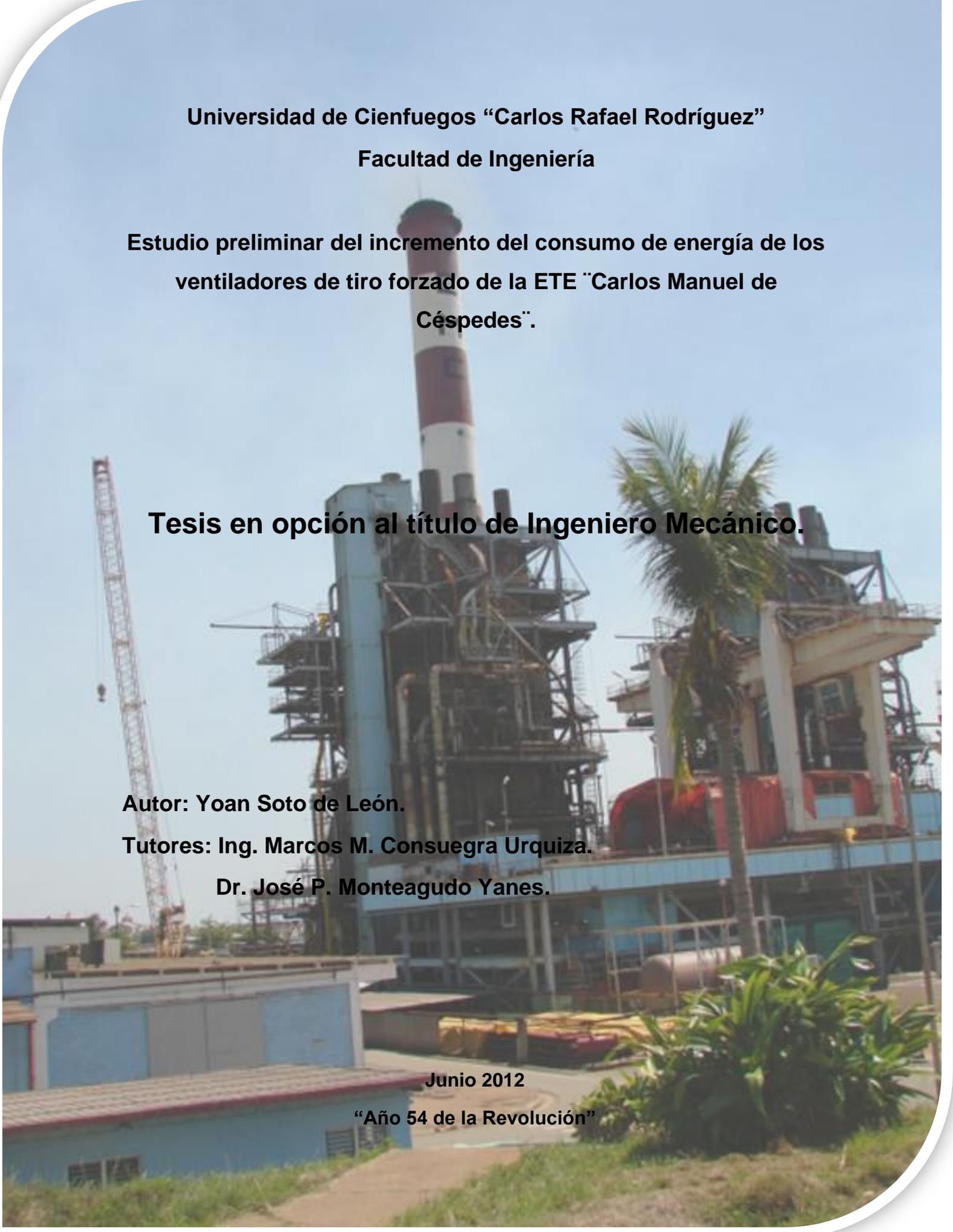
**Autor: Yoan Soto de León.**

**Tutores: Ing. Marcos M. Consuegra Urquiza.**

**Dr. José P. Monteagudo Yanes.**

**Junio 2012**

**“Año 54 de la Revolución”**



**DECLARACION DE AUTORIDAD  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente; que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

---

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

---

Información Científico Técnico  
Nombre y Apellidos. Firma.

---

Vice Decano.

Nombre y Apellidos. Firma.

---

Firma del Tutor

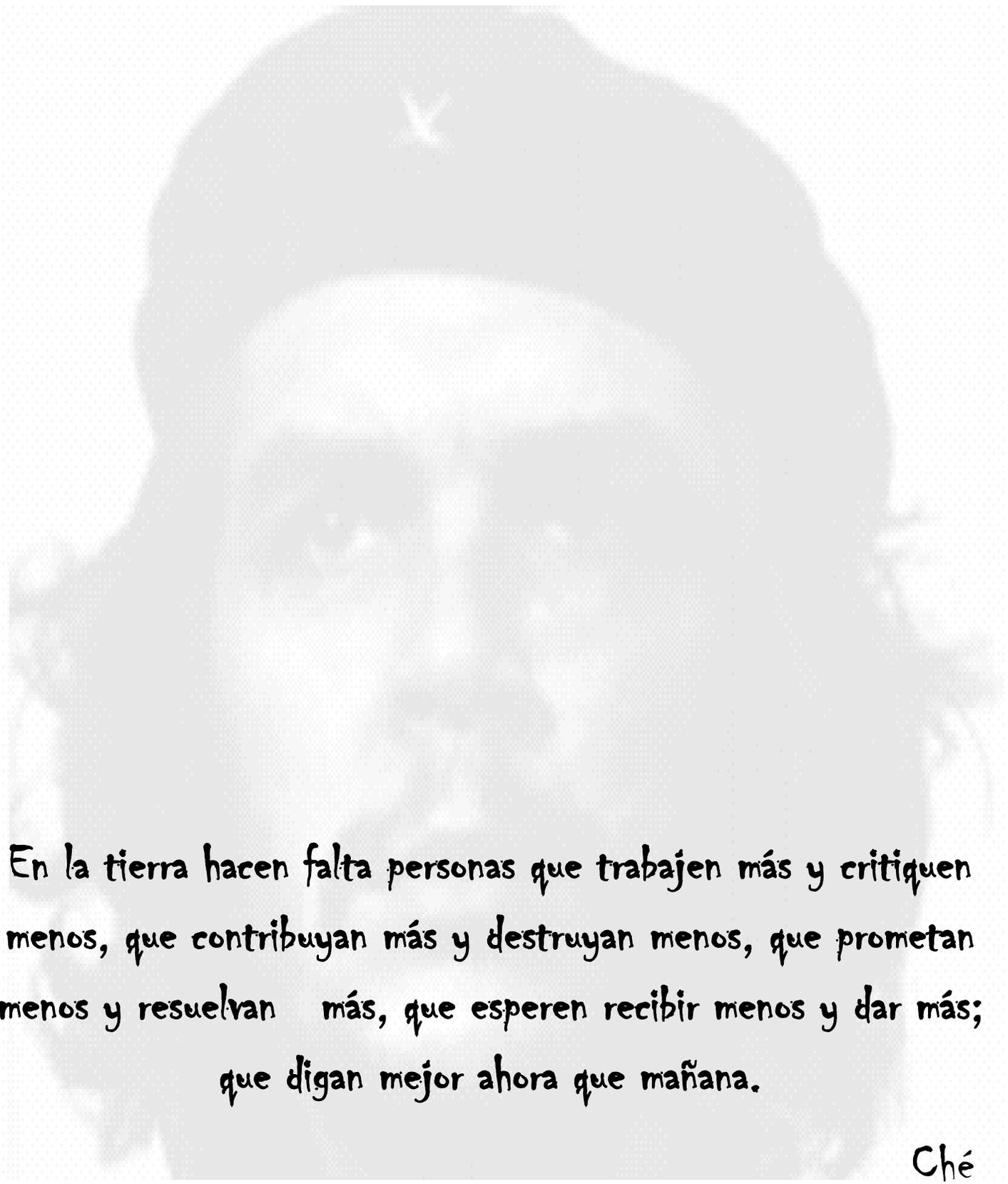
Nombre y Apellidos. Firma.

---

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

*Pensamiento*



En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que contribuyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y dar más; que digan mejor ahora que mañana.

Che

## **AGRADECIMIENTOS**

- Especialmente a mis padres, que me apoyaron y ayudaron siempre con la meta de convertirme en un profesional.
- A mis hermanos por ayudarme incondicionalmente en todo desde el principio.
- A mis tutores Dr. José P. Monteagudo y especialmente a Marcos Consuegra quien estuvo a todo momento para responder todas mis dudas.
- A todos mis amigos y amigas que de una manera u otra me apoyaron.
- A mi novia por alentarme desde que comencé a trabajar en la tesis.

## **DEDICATORIA**

- A mis padres, a mis primos, a mis tías, a mi novia y a mi hermana Yania, la cual no se encuentra en estos momentos conmigo pero sé que le encantaría estar aquí.

## SINTESIS

En el presente trabajo se realiza un estudio del incremento del consumo de los ventiladores de tiro forzado (V.T.F) de la Empresa Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” (ETE). Se realizó un estudio bibliográfico acerca las características constructivas de estos equipos y de sus parámetros operacionales, destacándose estos como los segundos equipos mayores consumidores de la planta. Se realizó además una revisión bibliográfica para comprobar el comportamiento del consumo de los V.T.F en las empresas termoeléctricas de Cuba y el mundo, aunque por falta de bibliografía solo se pudo encontrar un estudio realizado en la ETE “Antonio Guiteras” (AG) de la provincia de Matanzas. Además se analizó el comportamiento de los parámetros de operación del circuito de aire para la combustión, con el objetivo de ver cual de estos parámetros inciden directamente en el insumo de los ventiladores. También se realizó un estudio del insumo de estos equipos con la ayuda de la inteligencia artificial, el cual dio como resultado modelos de redes neuronales artificiales (RNA) que permite planificar y pronosticar a corto y mediano plazo el factor de insumo de los V.T.F. Esos modelos logrado en RNA se compararon con los modelos que se utilizan actualmente en la ETE.

## Índice:

INTRODUCCIÓN.....	1
Problema de Investigación:.....	1
Hipótesis de la Investigación: .....	1
Objetivo general:.....	1
Objetivos específicos: .....	2
CAPITULO I: TENDENCIAS ACTUALES DEL CONSUMO DE ENERGIA EN LOS V.T.F.	4
1.1 Características constructivas de los V.T.F en la ETE “ Carlos Manuel de Céspedes” y sus parámetros operacionales. ....	4
1.1.1 Plantas Termoeléctricas. (Osvaldo Mur González, 011).....	4
1.1.2. Características del insumo en las plantas térmicas.(Williams Francisco Domech, 1978) .....	5
1.1.3 Generalidades sobre Calderas.(Rizhkin, V, Ya, 1987).....	6
1.1.4 Características sobre el circuito de aire para la combustión.(“Circuitos de aire,” n.d.).....	7
1.2 Ventiladores de tiro forzado de las centrales termoeléctricas. (Cherkasski, V, M,, 1986) .....	7
1.3 Estudios realizados en Cuba y el mundo acerca del consumo de los V.T.F en Centrales Termoeléctricas. ....	11
1.3.1 Estudio del comportamiento de la corriente en los V.T.F de la ETE “Antonio Guiteras”.(Dra Teresita Rodríguez Nogueira et al., n.d.) .....	11
1.3.2 Estudio del consumo energético de los V.T.F desde el año 2000 hasta el 2011 en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”. ....	15
CONCLUSIONES PARCIALES I:.....	21
CAPITULO 2: ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE LOS EQUIPOS QUE COMPONEN EL SISTEMA DE AIRE PARA LA COMBUSTION EN LA ETE “ CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES” . ....	23
2.1 Generalidades sobre los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “ Carlos Manuel de Céspedes”.(Williams Francisco Domech, 1978) .....	23
2.1.1 Parámetros principales de diseño. ....	23
2.1.2 Descripción general. ....	24
2.1.3 Las paredes de agua tienen las siguientes dimensiones: .....	25

2.2 Sistema de aire para la combustión. ....	25
2.2.1 Parámetros técnicos de los V.T.F.....	25
2.2.2 Recalentador.....	26
2.2.3 Precalentador de aire. (PRE-CAL). ....	26
2.2.4 Calentador de aire regenerativo. (C.A.R) .....	27
2.3 Estudio de los parámetros de operación de los equipos que intervienen en el sistema de aire y gas para la combustión. ....	29
2.3.1 Análisis del comportamiento de los parámetros de operación en la unidad 4. ..	29
2.3.2 Comportamiento de los parámetros de operación en la unidad 3.....	38
2.4 Comparación de los ensuciamientos del C.A.R en la unidad 3 con el insumo de los V.T.F.....	41
CONCLUSIONES PARCIALES II .....	45
CAPITULO 3: ESTUDIO DEL INSUMO DE LOS VENTILADORES DE TIRO FORZADO CON EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL. ....	47
3.1 Teoría sobre la inteligencia artificial. Redes neuronales.....	47
3.1.1 Redes Lineales.(“REDES NEURONALES,” n.d.).....	47
3.1.2 Arquitectura de la red.(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.) .....	48
3.1.3 Diseño.(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.).....	50
3.1.4 Inicialización. (“Programa de Redes Neuronales,” n.d.).....	50
3.1.5 Regla de aprendizaje.(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.).....	53
3.1.6 Entrenamiento.(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.) .....	57
3.1.7 Redes Adaptivas.(“REDES NEURONALES,” n.d.).....	59
3.2 Modelos en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para controlar el insumo diario promedio de los V.T.F 3A. ....	60
3.2.1 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 3A. ....	61
3.2.2 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 3B.....	65
3.2.3 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 4A.....	68
3.2.4 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 4B. ....	71
3.3 Comparación entre la diferencia del factor de insumo Real y Planificado que se utiliza por la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos, y los valores obtenidos por el modelo de R.N.A. ....	74
3.3.1 Comportamiento del factor de insumo en el mes de mayo para los años 2004 y 2010.....	75

3.3.2 Comportamiento del factor de insumo en el mes de julio de los años 2004 y 2010.....	77
3.3.3 Comportamiento de las diferencias de insumo.....	80
CONCLUSIONES PARCIALES III.....	83
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES .....	88
BIBLIOGRAFÍA.....	90

# INTRODUCCIÓN

### **INTRODUCCIÓN**

El insumo de las plantas térmicas constituye del 4 al 6 % de la generación bruta total. Los ventiladores de tiro forzado pueden llegar a consumir hasta una 1.10 % o más de dicha generación, constituyendo así los segundos equipos más consumidores. Estos presentan en la actualidad desgastes propios de muchos años de explotación que han conllevado a un aumento de su consumo. El uso de técnicas de inteligencia artificial permite detectar con facilidad y rapidez deterioros en parámetros de operación que reflejan un incremento en el consumo de estos equipos, permitiendo así realizar mantenimientos según la condición y disminuir los sobreconsumos y el impacto medio ambiental asociado a la quema de combustibles fósiles. Además permite realizar un pronóstico a corto y mediano plazo del comportamiento del consumo de estos equipos.

Problema de Investigación:

Se aprecia un incremento del consumo de energía de los V.T.F de la ETE "CMC", pero se desconocen los valores cuantitativos de cada una de las posibles causas a las que se atribuye el sobreconsumo.

Hipótesis de la Investigación:

El estudio estadístico en el tiempo de los parámetros operacionales posibilitará definir las causas del sobreconsumo de los V.T.F y proponer métodos de control.

Objetivo general:

Determinar las causas del sobreconsumo de energía de los V.T.F de la ETE "CMC" y proponer métodos de control.

Objetivos específicos:

1. Establecer el estado actual y las tendencias del tratamiento del sobreconsumo de energía de los V.T.F.
2. Desarrollar el estudio teórico experimental del comportamiento de los V.T.F y del sistema de suministro y tratamiento de aire para la combustión en los generadores de vapor.
3. Obtener un modelo basado en inteligencia artificial que posibilite pronosticar el factor de insumo de los V.T.F.

# CAPITULO I

## **CAPITULO I: TENDENCIAS ACTUALES DEL CONSUMO DE ENERGIA EN LOS V.T.F.**

### **1.1 Características constructivas de los V.T.F en la ETE “ Carlos Manuel de Céspedes ” y sus parámetros operacionales.**

#### **1.1.1 Plantas Termoeléctricas.** (Osvaldo Mur González, 011)

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 fluidifique, 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 (carbón o gas, carbón o fuel-oíl, etc.).

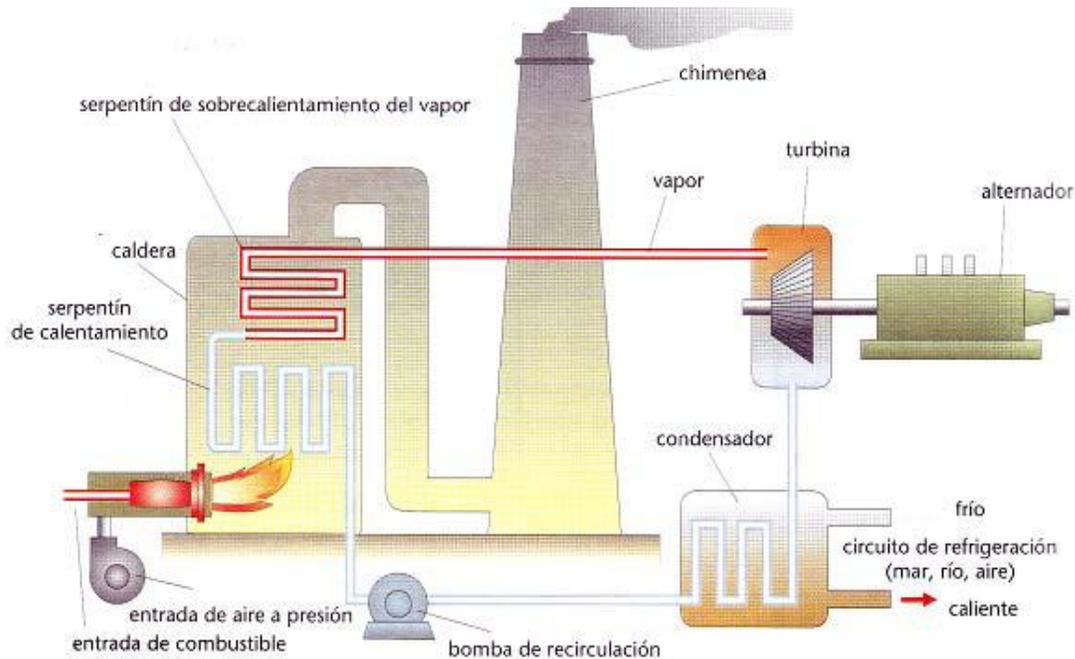


Figura 1.1. Esquema elemental de una Central Térmica.

### 1.1.2. Características del insumo en las plantas térmicas. (Williams Francisco Domech, 1978)

Parte de la energía eléctrica producida en la central termoeléctrica se consume en la realización del proceso tecnológico de transformación de la energía dentro de la central (preparación del combustible, suministro de aire, evacuaciones de los

gases de combustión, suministro de agua de alimentación y de refrigeración, etc.), esta parte forma del 4 al 6 % de la energía producida, o cerca de un 1,5 al 2,5 % del vapor gastado.

### 1.1.3 Generalidades sobre Calderas. (Rizhkin, V, Ya, 1987)

La **caldera** es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. no sirve Según la ITC-MIE-AP01, caldera es todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor. La caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas de intercambiadores de calor, en la cual se produce un cambio de fase. Además, es recipiente de presión, por lo cual es construida en parte con acero laminado.

Debido a las amplias aplicaciones que tiene el vapor, principalmente de agua, la caldera es muy utilizada en la industria, a fin de generarlo para aplicaciones como:

- Esterilización: era común encontrar calderas en los hospitales, las cuales generaban vapor para "esterilizar" los instrumentos médicos; también en los comedores, con capacidad industrial, se genera vapor para esterilizar los cubiertos, así como para elaborar alimentos en marmitas (antes se creyó que esta era una técnica de esterilización).
- Calentar otros fluidos, por ejemplo, en la industria petrolera se calienta a los petróleos pesados para mejorar su fluidez y el vapor es muy utilizado.
- Generar electricidad a través de un ciclo Rankine. La caldera es parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

Es común la confusión entre caldera y generador de vapor, pero su diferencia es que el segundo genera vapor sobrecalentado.

### 1.1.4 Características sobre el circuito de aire para la combustión. ("Circuitos de aire," n.d.)

El aire de combustión es enviado al hogar de las caldera por medio del ventilador de tiro forzado a través del precalentador de aire que tiene por objetivo calentar el aire aprovechando parte del calor que contienen los gases antes de pasar a la chimenea.

Una parte de este aire primario, sirve para secar el carbón en el molino y para la inyección del carbón pulverizado en la cámara de combustión, mientras que la parte restante del aire, llamado aire secundario, se suministra alrededor de los quemadores para lograr un contacto íntimo con las partículas del carbón.

### 1.2 Ventiladores de tiro forzado de las centrales termoeléctricas.

(Cherkasski, V, M., 1986)

Para los generadores de vapor de las centrales termoeléctricas la industria de la URSS fabricaba cerca de 50 dimensiones tipos de ventiladores y aspiradores de humo con caudales de 4.5... 900mil m<sup>3</sup>/h y unas presiones de más de 9810 Pa (1000 mm H<sub>2</sub>O). Los ventiladores de las ETE, según su destinación, se dividen en los siguientes números:

- 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.

**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 ésta última vencen la resistencia de esta vía y del sistema de separación de cenizas.

**Los aspiradores de humo de recirculación** 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%.

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.

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. Los anillos de engrase, que están colgados libremente en el casquillo y el muñón del árbol. El aceite que

se calienta en el cojinete escurre al baño, extrayendo de este modo el calor del cojinete y refrigerándolo.

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 las máquina. Los elementos principales del sistema de refrigeración (bombas, filtros y enfriadores) se duplican con el fin de una fiabilidad completa.

**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.

Con estas chapas se blindan los cuerpos de los ventiladores y los conductos de gas en los lugares donde el flujo, al cambiar la dirección, deposita las partículas abrasivas que circulan a alta velocidad sobre la superficie. La composición racional de la cavidad de paso de la máquina y el sistema de conductos de gas, que disminuye la deposición de arrastre y polvo de carbón sobre las superficies interiores, que delimitan el flujo, reduce considerablemente el desgaste y aumenta los períodos entre las reparaciones.

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.

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.

Al intersecar el flujo la rejilla rotatoria de las paletas sucede la depositación de las partículas abrasivas en algunos lugares de las paletas, lo que conduce a su destrucción. Evitar totalmente el desgaste de las piezas del rotor es imposible. La disminución del desgaste se alcanza recargando metales duros eléctricamente en los lugares en que en la estructura dada aparece el desgaste. El grosor de la capa de recargo forma de 2 a 4 mm. El plazo de servicio del rotor en el caso de descarga aumenta en 3...4 veces. El recargo con aleaciones duras se emplea ampliamente en la práctica de explotación y económicamente se justifica totalmente.

### **Estructura de un ventilador soplador de aspiración unilateral.**

El rotor del ventilador con paletas guía 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 al soporte cilíndrico del aparato guía, que regula el caudal.

Los parámetros principales de los ventiladores de este tipo para los diámetros del rotor  $D_2=600...2000$  mm son:  $Q=4400...200000$  m<sup>3</sup>/h;  $H=97...610$  mmH<sub>2</sub>O;  $N=173...590$  kW;  $\eta=67...70$  %;  $n=750...1430$  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  $D_2=1800\dots2600$  mm.

Los parámetros principales son:  $Q=240000\dots500000$  m<sup>3</sup>/h;  $H=150\dots350$  mmH<sub>2</sub>O;  $N=120\dots585$  kW;  $n=735$  r.p.m.;  $\eta=0,83$ . (V, M, CHERKASSKI, 1986)

### **1.3 Estudios realizados en Cuba y el mundo acerca del consumo de los V.T.F en Centrales Termoeléctricas.**

Debido a que existe escasa bibliografía acerca de este tema el presente epígrafe trata sobre estudios que se han realizado en Cuba sobre el consumo de los V.T.F, en cómo puede incidir el ensuciamiento de los C.A.R en ello.

#### **1.3.1 Estudio del comportamiento de la corriente en los V.T.F de la ETE “Antonio Guiteras”.**(Dra Teresita Rodríguez Nogueira et al., n.d.)

En el trabajo realizado en la ETE “Antonio Guiteras” se parte de exponer los tipos de mantenimientos que en la actualidad se aplican en los equipos de las Centrales Termoeléctricas dentro de los que se encuentran los Calentadores de Aire Regenerativos. Se enfatiza en las Características del mantenimiento por diagnóstico y se muestran metodologías que constituyen herramientas a tener en cuenta a la hora de aplicar este tipo de mantenimiento que pueden ser utilizadas en cualquier equipo.

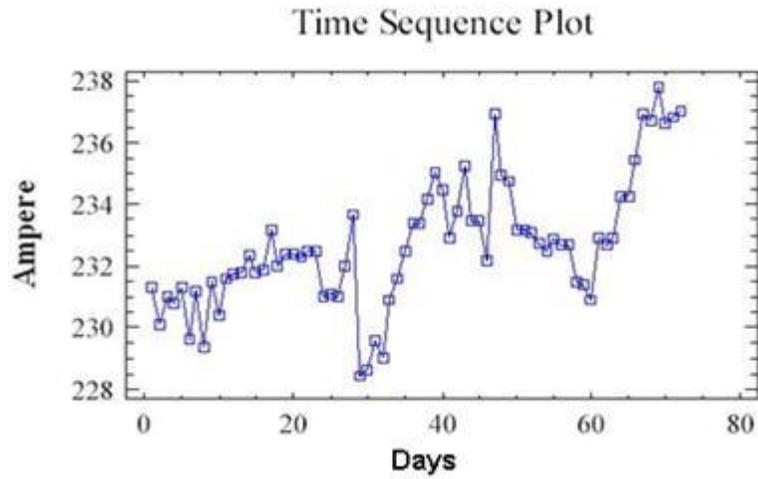


Figura 1.2. Tendencia del comportamiento de la corriente de tiro A.

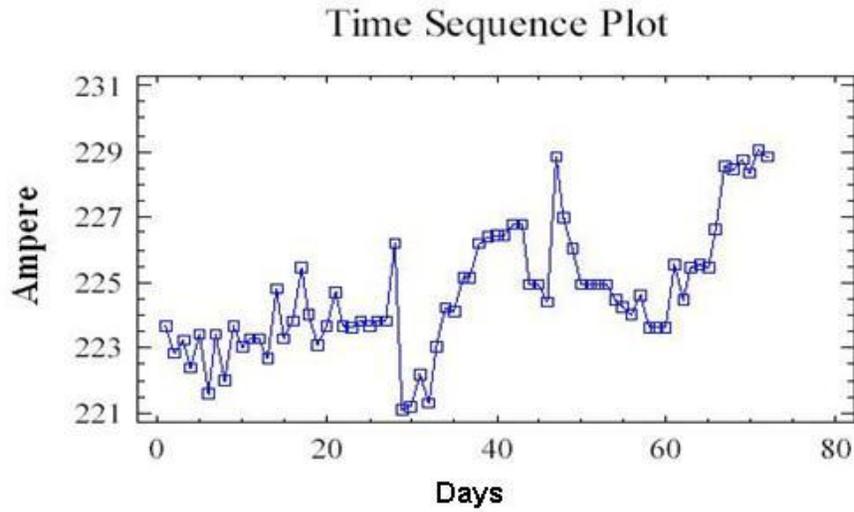


Figura 1.3 Tendencia del comportamiento de la corriente de tiro B.

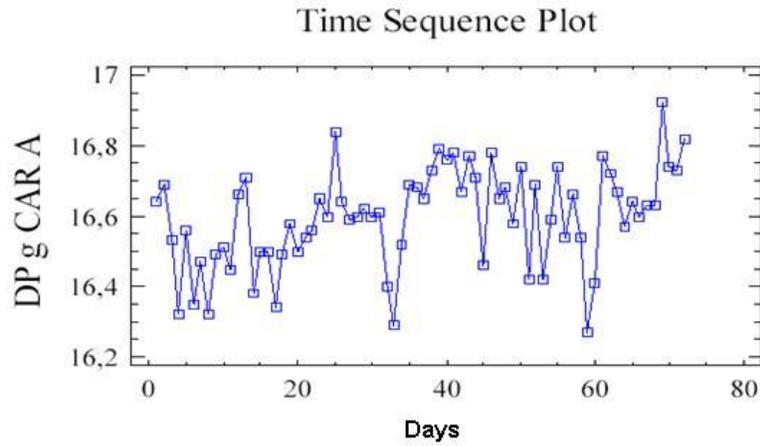


Figura 1.4. Tendencia del comportamiento de la caída de presión en el conducto de gases C.A.R
   
 A.

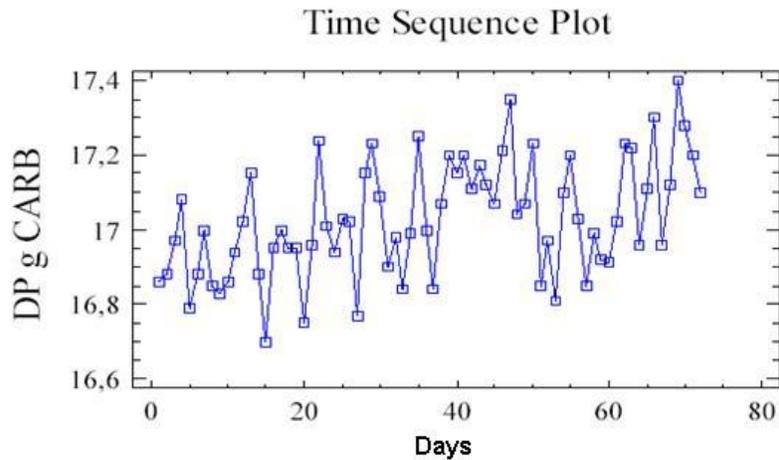


Figura 1.5 Tendencia del comportamiento de la caída de presión en el conducto de gases C.A.R B.

### 1.3.1.1 Resultados obtenidos:

En el análisis realizado a 15 muestras de intervalos entre sopleteos, se pudo comprobar que la variable % de apertura de la compuerta de tiro forzado para una misma carga no sigue el comportamiento que por lógica debe tener puesto que en condiciones de ensuciamiento de la caldera, para suministrar el mismo flujo de

aire debe vencer el aumento de presión en la descarga, por lo tanto debe aumentar el porcentaje de apertura en la succión para garantizar el flujo de aire necesario. Se pudo comprobar que esto es producto de problemas que existen actualmente con la medición de esta variable, ya en los momentos que se realiza el experimento se inhabilitó y se pasó a revisión por los especialistas.

En la variable caída de presión en el conducto de aire prácticamente no se observan cambios, por lo que se deja también fuera del análisis. Las variables que quedan para determinar la variable de diagnóstico son la caída de presión por el conducto de gases por el C.A.R A y por el C.A.R B y la corriente de tiro por el C.A.R A y por el C.A.R B.

Con la ayuda de las dos herramientas antes mencionadas y teniendo en cuenta las propiedades **sensibilidad y estabilidad** se realiza el análisis a las posibles variables de diagnóstico. En los gráficos 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 que muestra el comportamiento de la tendencia de las variables, se puede observar que las variables corriente de tiro A y B tienen mayor sensibilidad que las caídas de presión por el conducto de gases A y B por lo que se realiza el análisis de la estabilidad a través de la desviación estándar mostrada en el anexo 2 a través del Microsoft Excel, donde se muestra que la variable caída de presión de los gases presenta menor desviación estándar que las corrientes de tiro, por lo que es recomendable según la literatura (Luna, 1982) seleccionar este último para diagnosticar, por tener mayor estabilidad.

### 1.3.2 Estudio del consumo energético de los V.T.F desde el año 2000 hasta el 2011 en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”.

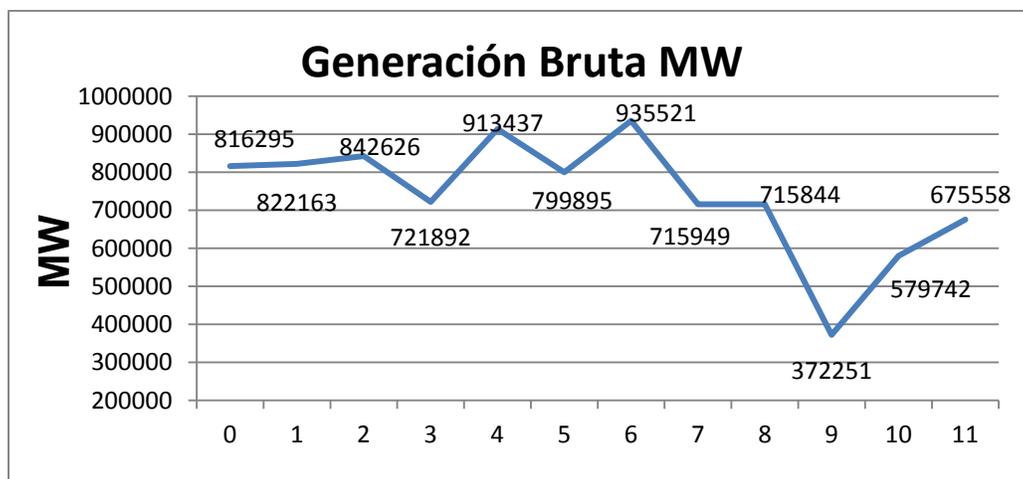


Figura 1.6. Generación Bruta MW.

En esta Figura 1.6 se muestra la generación bruta en el tiempo, donde se puede apreciar lo irregular que ha sido. Los años que más se generó fueron en el 2004 y 2006 con 913437 y 935521 MW respectivamente. Después de esos años hubo una caída hasta el 2009 que fue el año de menos generación con 372251 MW.

## Capítulo I: Tendencias actuales del consumo de energía de los V.T.F.

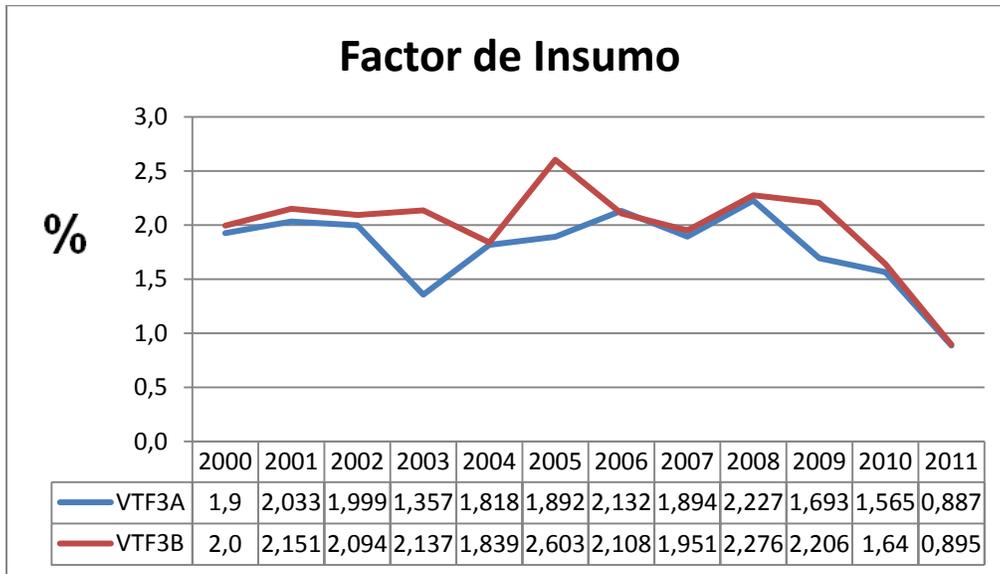


Figura 1.7. Insumo de los V.T.F de la Unidad 3 en %.

En la Figura 1.7 se muestra el porcentaje que consumen los V.T.F de la Generación Bruta total. Donde se analizó los totales anuales desde el 2000 hasta el 2010. Se aprecia el mayor valor de la curva en el año 2005 siendo el valor más grande de la Unidad 3 incluso por encima del 2.5 %.

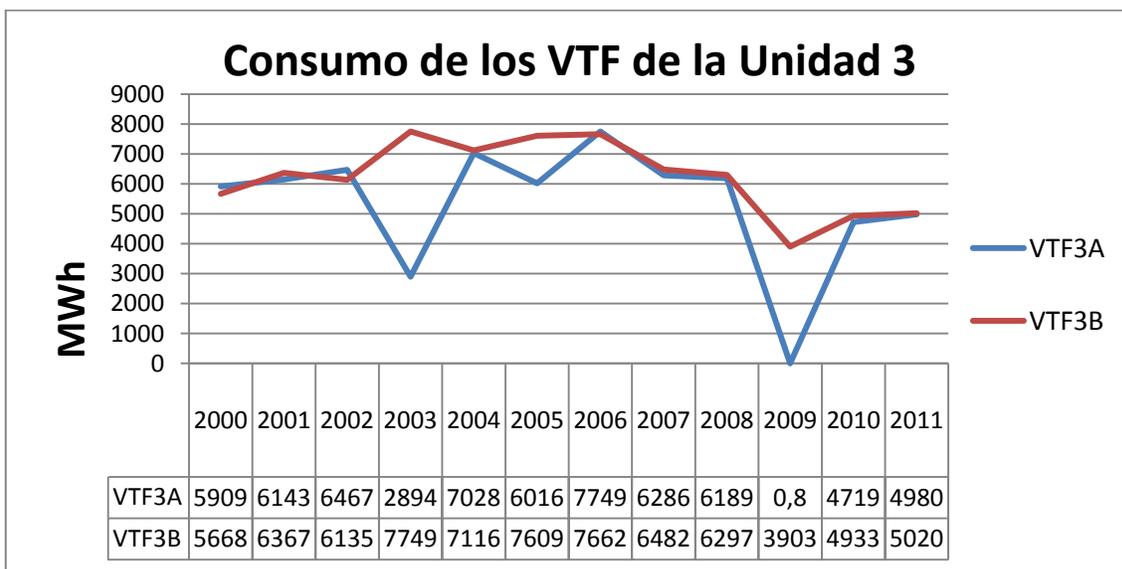


Figura 1.8. Consumo de los V.T.F de la Unidad 3 en MW.

En esta Figura 1.8 vemos el consumo de los ventiladores en MW. Podemos distinguir que el V.T.F 3B es el que más consume en la unidad 3 con un valor máximo de 7660 MW, esto pudiera darse por un ensuciamiento del Calentador de Aire Regenerativo (C.A.R).

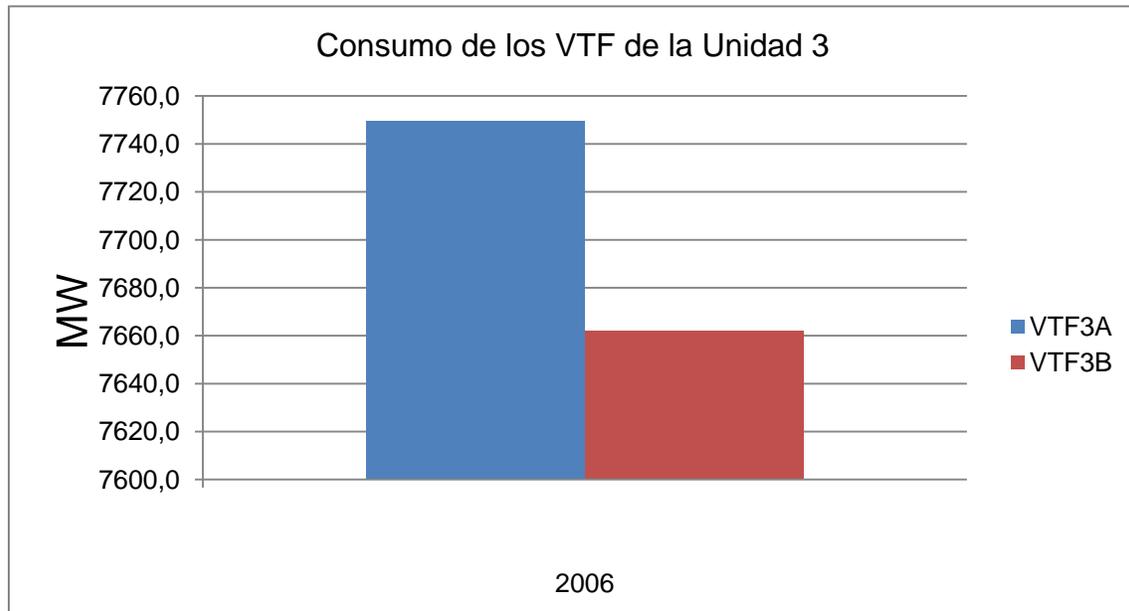


Figura 1.9. Consumo de los V.T.F de la unidad 3 en el año 2006.

El gráfico de la figura 1.9 muestra como se comportó el consumo de los ventiladores de tiro forzado de la unidad 3 en el año 2006, siendo este el más elevado de la generación bruta con 935521 MW en el período desde el año 2000 hasta el 2010. Se aprecia además que el ventilador 3B presenta un consumo por debajo del 3A en 80 MW, lo que puede estar asociado a un desgaste mas avanzado en un ventilador que en otro.

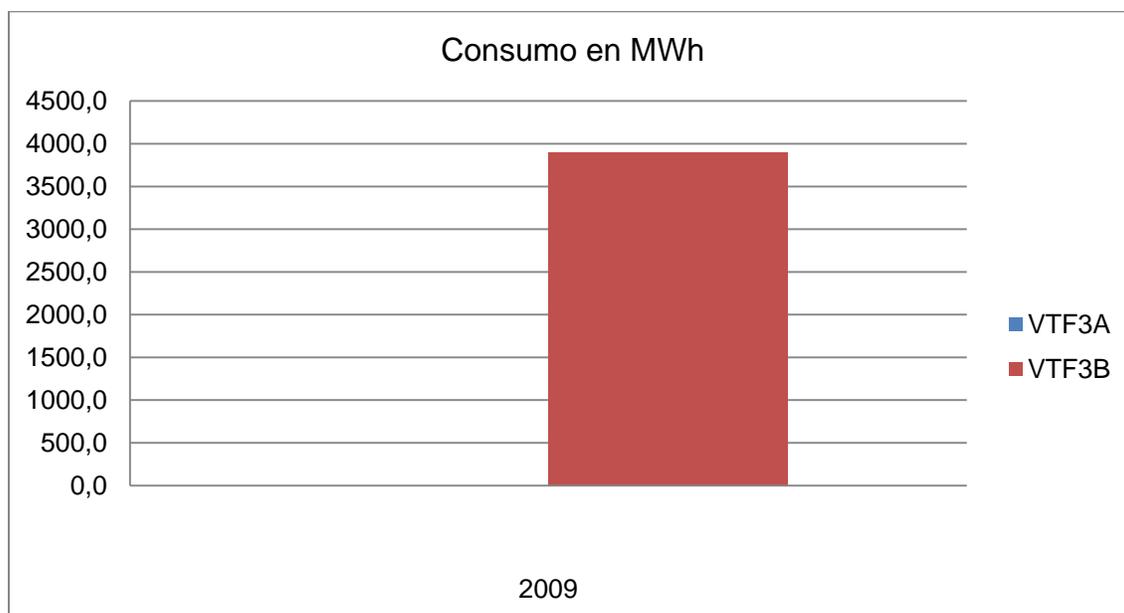


Figura 1.10. Consumo de los V.T.F de la unidad 3 en el año 2009.

En esta Figura 1.10 podemos apreciar el consumo en MW de los ventiladores de tiro forzado A y B de la unidad 3, siendo el año más pequeño de la generación bruta con 372251 MW desde el año 2000 hasta el 2010. La no integración del ventilador 3A es por causa de una parada del equipo, asociado a un ensuciamiento en el C.A.R al cual el está conectado.

## Capítulo I: Tendencias actuales del consumo de energía de los V.T.F.

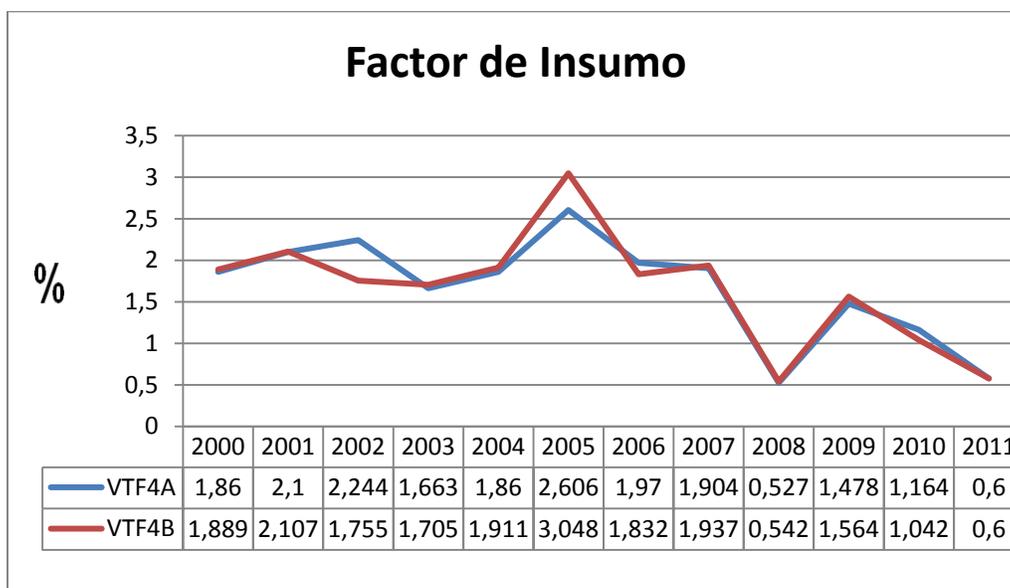


Figura 1.11. Insumo de los V.T.F de la Unidad 4 en %.

En la Figura 1.11 se puede ver como el comportamiento de las curvas son parecidas, aunque en el año 2005 el V.T.F 4B llega a consumir más del 3 % de la generación bruta de la unidad 4, producto al ensuciamiento en el C.A.R. La descendencia de la curva muestra entonces el comportamiento del insumo después de una limpieza del C.A.R.

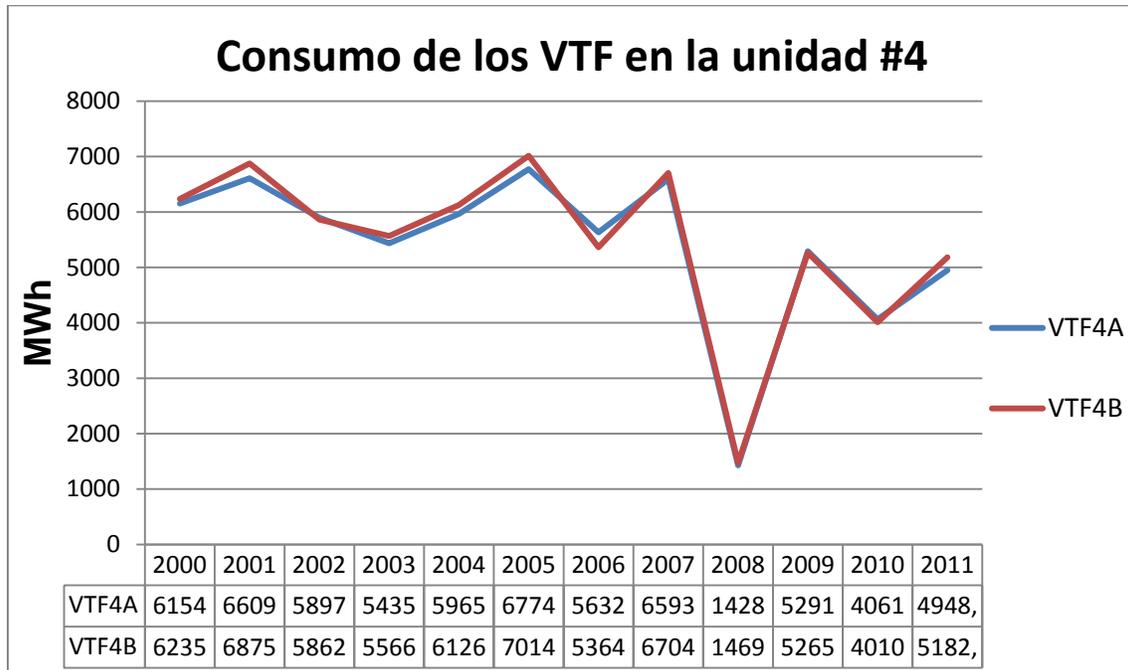


Figura 1.12. Consumo de los V.T.F de la Unidad 4 en MW.

En la Figura 1.12 se aprecia que las curvas de los V.T.F de la unidad 4 que
   
 presentan el consumo son bastante estables. El descenso de las curvas en el año
   
 2008 significa que en ese tiempo la unidad 4 estuvo en parada, producto que se le
   
 estaba realizando una modernización y a la unidad 3 se le bajaron las cargas.

### CONCLUSIONES PARCIALES I:

1. En el estudio realizado en la ETE “Antonio Guiteras” se pudo apreciar que existe una tendencia al aumento del consumo de los V.T.F, producto que la diferencia de presión aumenta en 3 unidades para el conducto de aire y en 4 unidades para el conducto de gases.
2. En el período estudiado en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”, el mayor insumo de los ventiladores en la unidad 3 fue en el año 2005 con un 2.6 %, producto al incremento de la diferencia de presión tanto en el conducto de gases como en el de aire los C.A.R.
3. Los dos últimos años 2009 y 2010 son los de más baja generación bruta de estos 11 años, con una reducción del 52 %.
4. El ventilador de mayor consumo en este período fue el 3B con 7749 MWh, este aumento pudo ser provocado por desgaste, por ensuciamiento en los C.A.R, o simplemente por desbalance de masas.
5. Los V.T.F de la unidad 4 presentaban entre los años 2000 y 2007 un comportamiento ascendente del insumo, pero luego de la modernización se logró disminuir dicho insumo en un 28 %.
6. Los ventiladores de tiro forzado de la unidad 3 tenían un comportamiento irregular del insumo, luego de un mantenimiento general de estos equipos se logró disminuir hasta la fecha en un 40 %.

## CAPITULO II

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

### **CAPITULO 2: ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE LOS EQUIPOS QUE COMPONEN EL SISTEMA DE AIRE PARA LA COMBUSTION EN LA ETE “ CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES”.**

#### **2.1 Generalidades sobre los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “ Carlos Manuel de Céspedes”.**(Williams Francisco Domech, 1978)

Las calderas de las unidades 3 Y 4 de la ETE "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. Este tipo de caldera es conocida como "El Paso".

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 adecuado aislamiento.

#### **2.1.1 Parámetros principales de diseño.**

- Caldera de domo simple, radiante.
- Temperatura del vapor a MCR
  - salida del SH 540 °C
  - salida del RH 540 °C
- Temperatura del agua de alimentar.
  - entrada del economizador (ECO) 263 °C
  - salida del ECO 295 °C



## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

### 2.1.3 Las paredes de agua tienen las siguientes dimensiones:

- Alto del horno 20.7 m
- Ancho del horno 9.14 m
- Fondo del horno 8.5 m

### 2.2 Sistema de aire para la combustión.

El sistema de aire para la combustión consta de dos ventiladores de tiro forzado (V.T.F), encargados de suministrar el aire para la combustión garantizando siempre un exceso de aire que evite la incombustión 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.

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 V.T.F garantiza el aire a los diferentes consumidores de la caldera.

#### 2.2.1 Parámetros técnicos de los V.T.F.

- Tipo: doble succión
- Capacidad (m<sup>3</sup>) 4720
- Presión de succión atmosférica
- Presión de descarga (mm H<sub>2</sub>O) 866
- Temperatura de entrada (°C) 25
- Velocidad (rpm) 1200
- Potencia del motor (Kw) 870
- Voltaje (V) 6000
- Pares de polos 6

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

### 2.2.2 Recalentador.

El recalentador (RH) es una superficie de calentamiento situada entre el SHI y el SHII y está diseñado a contraflujo con los gases para aprovechar de manera más efectiva el calor de los gases, se soporta en la pared diafragma y los tubos de la pared frontal del horno de la misma forma que lo hacen los SH. El vapor para el RH proviene de la salida del cilindro de alta presión de la turbina y la función de este es devolver al vapor las Características de trabajo adecuadas que eviten daños en la turbina.

A la entrada del RH se encuentra situado el dispositivo de atemperamiento y para su protección cuenta con cuatro dispositivos de seguridad, tres a la entrada y una a la salida. El RH cuenta además con una línea de prueba para detectar ponchaduras en los tubos. Esta línea se conecta a la línea de vapor SH antes de la válvula principal de vapor.

#### 2.2.2.1 Datos del RH.

- Tipo: tubos continuos horizontales.
- Superficie de calentamiento 1380 m<sup>2</sup>
- Número de lazos 5
- Número de tubos por grupo 3

### 2.2.3 Precalentador de aire. (PRE-CAL).

Con el objetivo de proteger los metales de los C.A.R de la corrosión a baja temperatura provocada por la presencia de uniones de azufre en los gases de la combustión, la caldera cuenta con precalentadores de aire (Pre-CAL). Estos son intercambiadores verticales de tubos aleteados instalados en el conducto de aire entre la descarga de los V.T.F y los CAR. La temperatura del aire de salida de los Pre-CAL se controla automáticamente o de forma manual desde la Sala de Control Central (BTG), regulando el flujo de vapor proveniente de la estación reguladora.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

El vapor de calentamiento se suministra desde el cilindro de media presión (CMP) a través de la extracción 5 para potencias superiores al 75 %; para cargas menores del 75 % se alimenta de vapor proveniente del cabezal auxiliar de vapor (15 kgf/cm<sup>2</sup>). El condensado del vapor se recepciona en los tanques de condensado del vapor desde donde se puede enviar al canal o al CBP-1 o el condensador.

### 2.2.3.1 Datos técnicos del PRE-CAL.

➤ Cantidad	2
➤ Tipo:	vertical de tubos aleteados
➤ Superficie de calentamiento	830 x 2m <sup>2</sup>
➤ Diámetro exterior de los tubos	21.7 mm
➤ Espesor de los tubos	2 mm
➤ Material de los tubos	STE-35-5

### 2.2.4 Calentador de aire regenerativo. (C.A.R)

El C.A.R es un intercambiador de calor donde una masa de gases procedentes del eje convectivo luego de entregar el calor en la caldera entrega el calor a una masa metálica que se encuentra girando, calentándola; este metal al hacer contacto con la masa de aire frío la calienta hasta una temperatura adecuada. Este tipo de intercambiador presenta ventajas con respecto a los de tipo tubular ya que es más eficiente, las temperaturas del metal son uniformes y se eliminan los focos de calor. En su conjunto cada C.A.R cuenta con tres grupos de cestos que se colocan en forma horizontal en tipo cuña.

Los grupos se colocan verticalmente formando los cestos calientes, tibios y los fríos. La fuente para el giro del C.A.R la constituye un motor que se alimenta de 380 Volt a través de un reductor con una rueda dentada. El C.A.R se apoya en dos chumaceras, superior e inferior las cuales son enfriadas con agua procedente del circuito de enfriamiento, y cuenta además con compuertas de cierre tanto por la

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

parte de aire como por la parte de gases así como con tuberías para el lavado de estos en explotación y registros para el acceso al interior de este, posee además un motor de aire que permite el giro de este en caso que no pueda usarse el motor eléctrico. Para la limpieza de las superficies de intercambio el C.A.R está equipado con un soplete tipo oscilante movido por un motor de 380 v dirigido desde un panel en BTG.

### 2.2.4.1 Datos técnicos del C.A.R.

➤ Cantidad	2 x caldera
➤ Tipo:	regenerativo vertical
➤ Flujo de gases a (MCR)	568 t/h
➤ Flujo de aire a (MCR)	524 t/h
➤ Temperatura de los gases a la entrada	337 °C
➤ Temperatura de los gases a la salida	144 °C
➤ Temperatura del aire a la salida del C.A.R	304 °C
➤ Superficie de calentamiento	12000 m <sup>2</sup>
➤ Material de la placa extremo caliente	acero dulce
➤ Material de la placa intermedia	acero dulce
➤ Material de la placa extremo frío	acero resistente a la corrosión (acero CORTEN)

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

### 2.3 Estudio de los parámetros de operación de los equipos que intervienen en el sistema de aire y gas para la combustión.

Tabla. 2.1 Parámetros de operación del sistema de aire y gas para la combustión.

Presión Descarga V.T.F-A	mmH <sub>2</sub> O
Presión Descarga V.T.F-B	mmH <sub>2</sub> O
Presión Aire ENT C.A.R-A	mmH <sub>2</sub> O
Presión Aire ENT C.A.R-B	mmH <sub>2</sub> O
Presión Aire SAL C.A.R-A	mmH <sub>2</sub> O
Presión Aire SAL C.A.R-B	mmH <sub>2</sub> O
Presión Caja Aire	mmH <sub>2</sub> O
Presión Gas Horno	mmH <sub>2</sub> O
Presión Gas SAL C.A.R-A	mmH <sub>2</sub> O
Presión Gas SAL C.A.R-B	mmH <sub>2</sub> O
Temp C.A.R-A SAL Gas	°C
Temp C.A.R-B SAL Gas	°C
Temp C.A.R-A ENT Gas	°C
Temp C.A.R-B ENT Gas	°C
Temp C.A.R-A ENT Aire	°C
Temp C.A.R-B ENT Aire	°C
Temp C.A.R-A SAL Aire	°C
Temp C.A.R-B SAL Aire	°C
Temp Gas ENT Eco	°C
Temp Aire Succ VTF (Temp Amb)	°C

#### 2.3.1 Análisis del comportamiento de los parámetros de operación en la unidad 4.

El siguiente análisis de los parámetros de operación de los equipos que intervienen en el sistema de aire gas para la combustión consiste en la graficación de valores acumulados en un período de tiempo. En el caso de la unidad 4 los valores que se tomaron fueron a partir de la modernización con el objetivo de comparar el comportamiento con la unidad 3.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

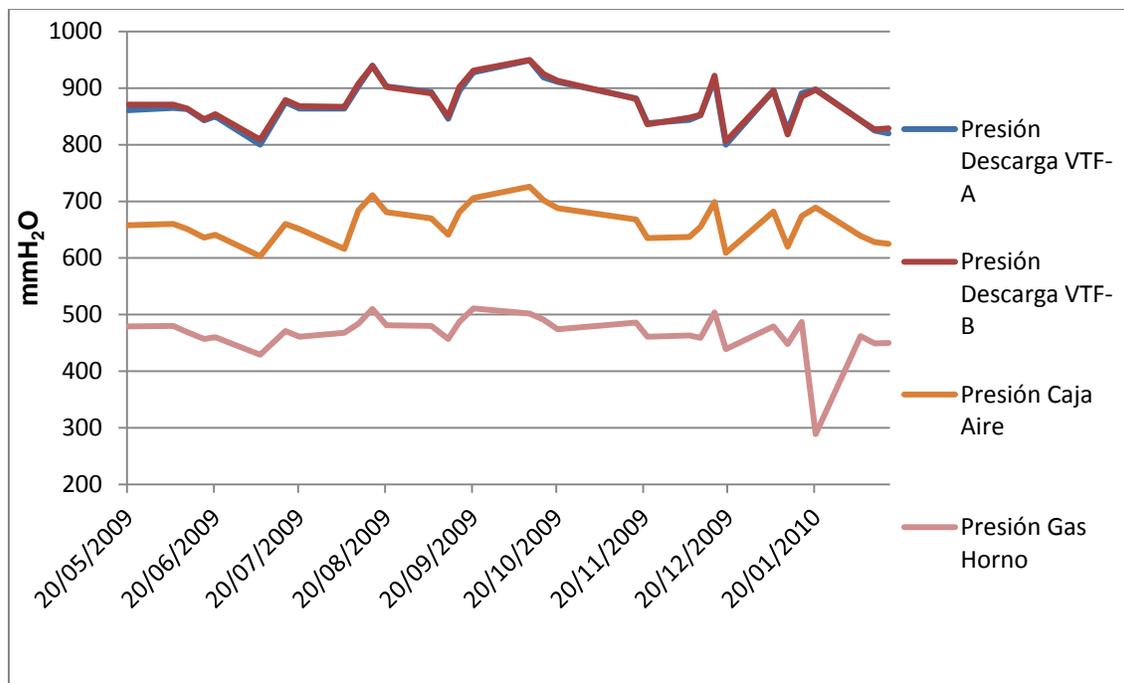


Figura 2.1 Comportamiento en el tiempo de las presiones en la descarga de los V.T.F.

En la Figura 2.1 pueden verse las presiones de descarga de los V.T.F, así como la presión en la caja de aire y la presión del gas en el horno, presentando un comportamiento irregular en el tiempo, con una tendencia al aumento en un rango de hasta 100 mmH<sub>2</sub>O.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

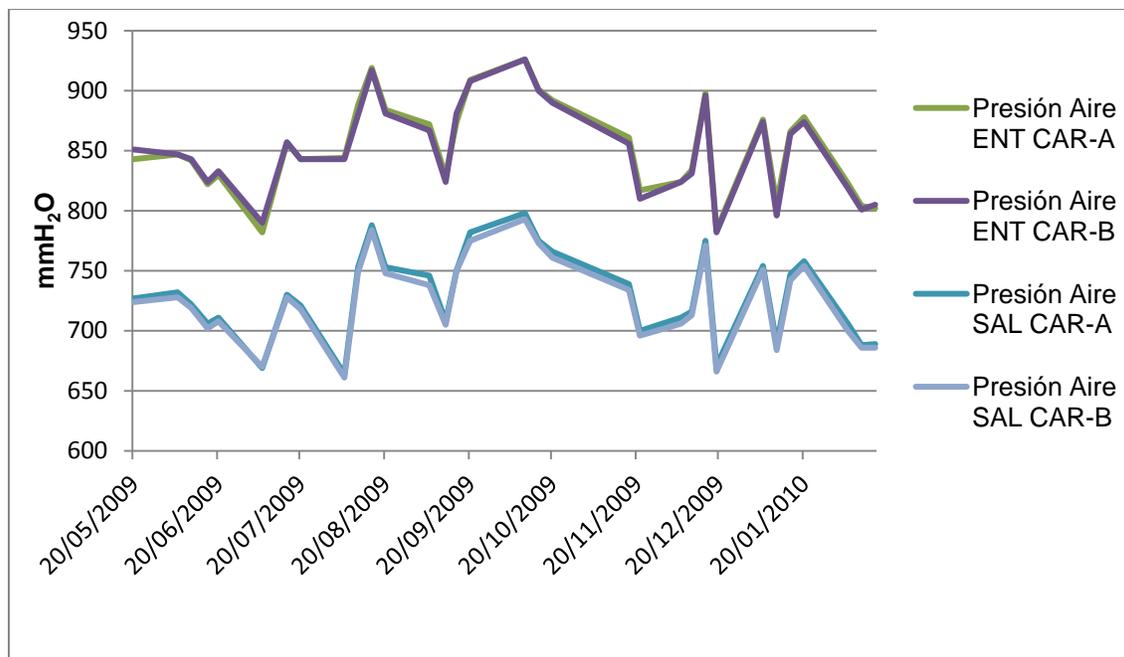


Figura 2.2 Comportamiento en el tiempo de la presión de aire en la entrada y salida del CAR.

En la Figura 2.2 se muestran las presiones de aire en la entrada y salida del C.A.R, donde tanto en la entrada como en la salida los V.T.F presentan el mismo comportamiento en el tiempo., con una media para la entrada de los C.A.R de 850 mmH<sub>2</sub>O y para la salida de 700 mmH<sub>2</sub>O. El aumento repentino de las curvas en 90 % para la entrada y en un 87 % aproximadamente para la salida puede estar asociado a un ensuciamiento de los C.A.R.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”



Figura 2.3 Comportamiento en el tiempo de la presión del gas en el C.A.R.

En la Figura 2.3 se muestra el comportamiento en el tiempo de la presión del gas en la salida de los C.A.R A y B, en esta gráfica se aprecia como la presión en la salida del C.A.R A es mucho menor que en el otro en un rango alrededor de los 50 mmH<sub>2</sub>O, lo que puede ser resultado de un ensuciamiento en el calentador B.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

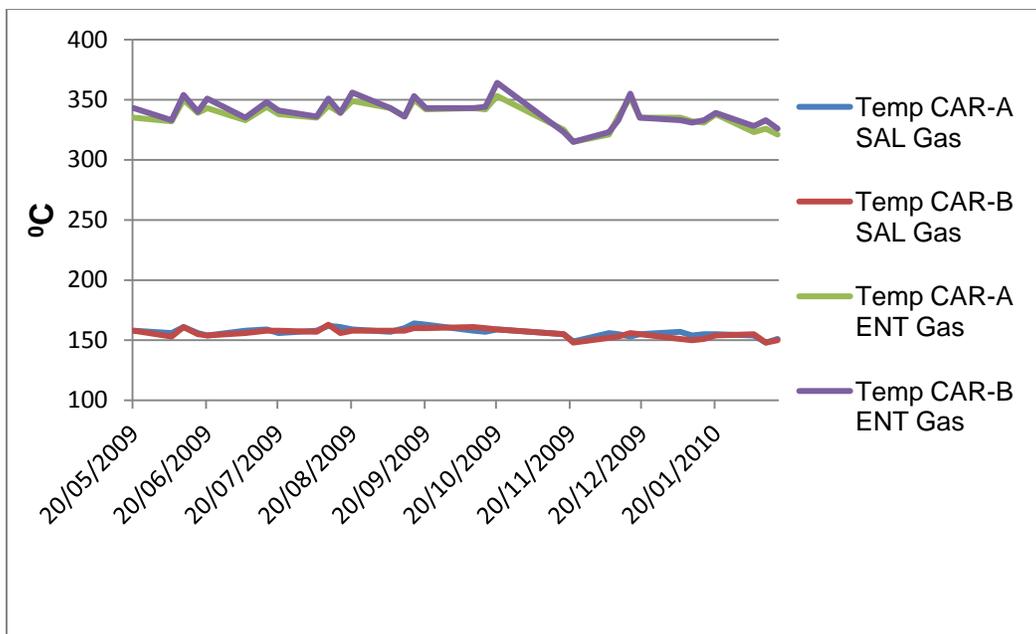


Figura 2.4 Comportamiento en el tiempo de la temperatura del gas en la entrada y salida del CAR.

La gráfica de la Figura 2.4 muestra el comportamiento en el tiempo de las temperaturas del gas en la entrada y la salida de los C.A.R. Donde tanto en la entrada como en la salida las temperaturas se mantienen en el mismo rango para los dos C.A.R, A y B, variando entre 340 y 360 °C para la entrada, siendo en la salida entre 150 y 160 °C aproximadamente.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

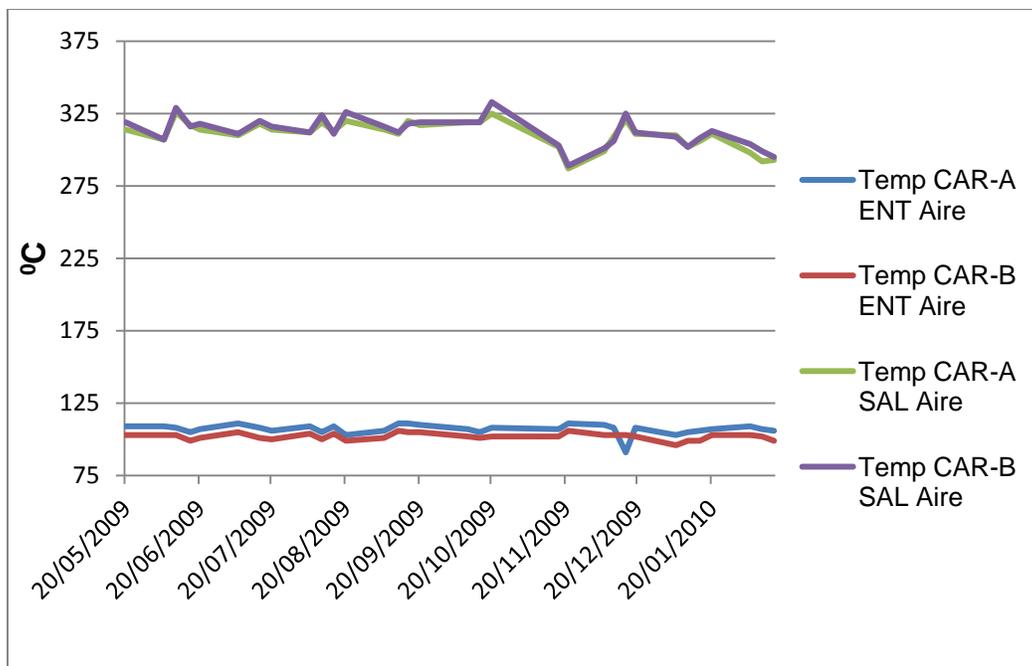


Figura 2.5 Comportamiento en el tiempo de la temperatura del aire en la entrada y salida del CAR.

En la Figura 2.5 se presentan las curvas de comportamiento en el tiempo de la temperatura del aire para la entrada y la salida de los C.A.R. En este gráfico se puede ver cómo tanto en la entrada como en la salida las temperaturas se mantienen en un rango de variación de 10 °C.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

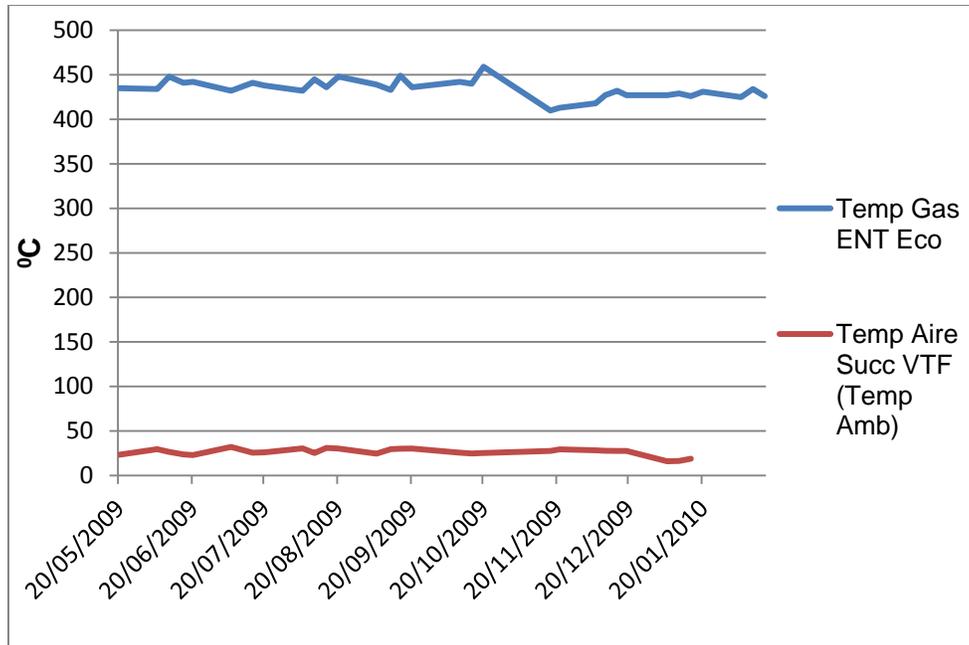


Figura 2.6 Comportamiento en el tiempo de la temperatura del Gas en la entrada del economizador y del aire en la succión de los V.T.F.

En la Figura 2.6 se muestran las curvas del comportamiento de las temperaturas del gas en la entrada del economizador y del aire de succión de los V.T.F.

Donde la temperatura del aire de succión de los ventiladores se mantiene casi estable, mientras que la temperatura en la entrada del economizador presenta algunas irregularidades, manteniéndose en un rango de variación de 50 °C.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

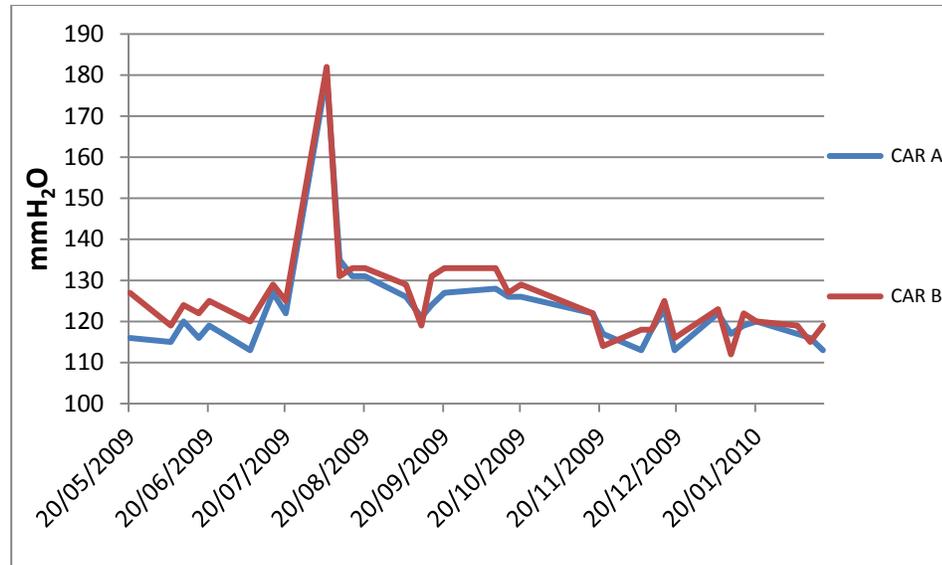


Figura 2.7 Comportamiento de la caída de presión en el conducto del aire.

En la Figura 2.7 se muestra el comportamiento en el tiempo de la caída de presión en el conducto del aire del V.T.F A, la gráfica es irregular con tendencia hacia el aumento, en aproximadamente 10 mmH<sub>2</sub>O. El pico que se aprecia es producto aun ensuciamiento en el C.A.R.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

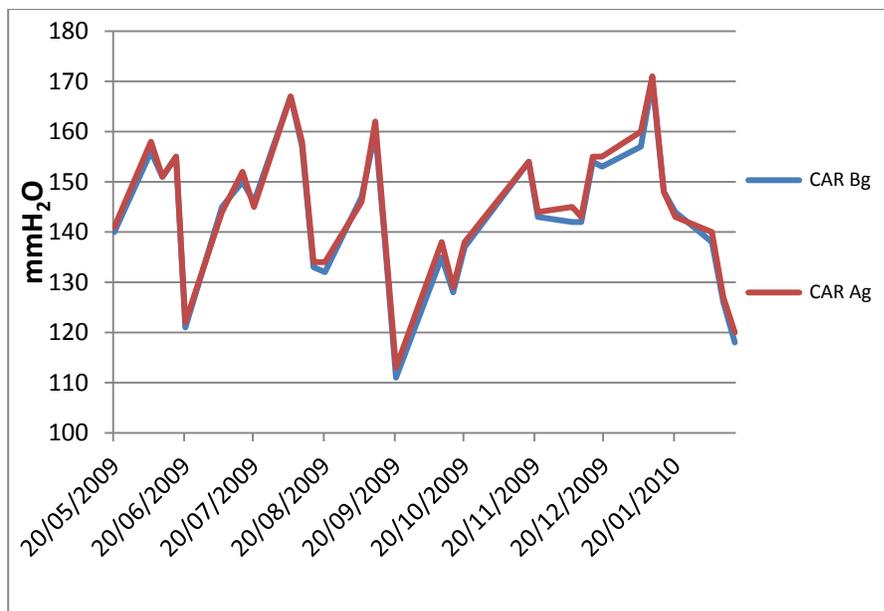


Figura 2.8 Comportamiento de la caída de presión por el conducto de gases.

En la Figura 2.8 se muestra el comportamiento de la caída de presión por el conducto de gases, el cual oscila entre los 110 y los 170 mmH<sub>2</sub>O aproximadamente. El comportamiento irregular de estas curvas puede estar asociado a los pocos valores que se grafican en ella.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

### 2.3.2 Comportamiento de los parámetros de operación en la unidad 3.

En las gráficas presentadas en las figuras 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, se aprecia el comportamiento de los principales parámetros de operación del sistema de aire para la combustión de la unidad 3. Dichos parámetros son los que inciden directamente en el insumo de los V.T.F y a su vez en el insumo de la planta.

En un análisis realizado las curvas presentadas a continuación se puede ver claramente que su comportamiento en los equipos del sistema de aire para la combustión que están relacionados entre sí es verdaderamente muy similar, obteniendo como resultado un buen funcionamiento del sistema.

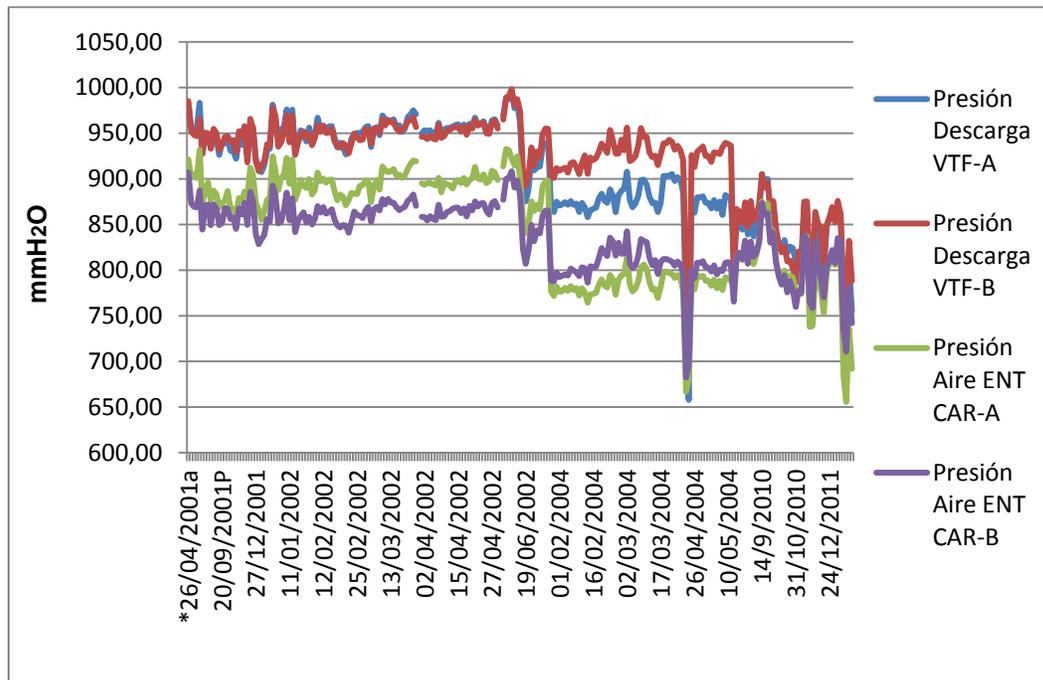


Figura 2.9 Comportamiento en el tiempo de las presiones de aire en la entrada de los C.A.R y la descarga de los V.T.F.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

En la figura 2.9 se presenta en el tiempo el comportamiento de las presiones de descarga de los V.T.F, así como las presiones de entrada de los C.A.R. En este gráfico se obtuvo como resultado que las presiones de los V.T.F en la mayoría del tiempo están por encima de su presión por diseño, en valores que llegan a alcanzar los 1000 mmH<sub>2</sub>O.

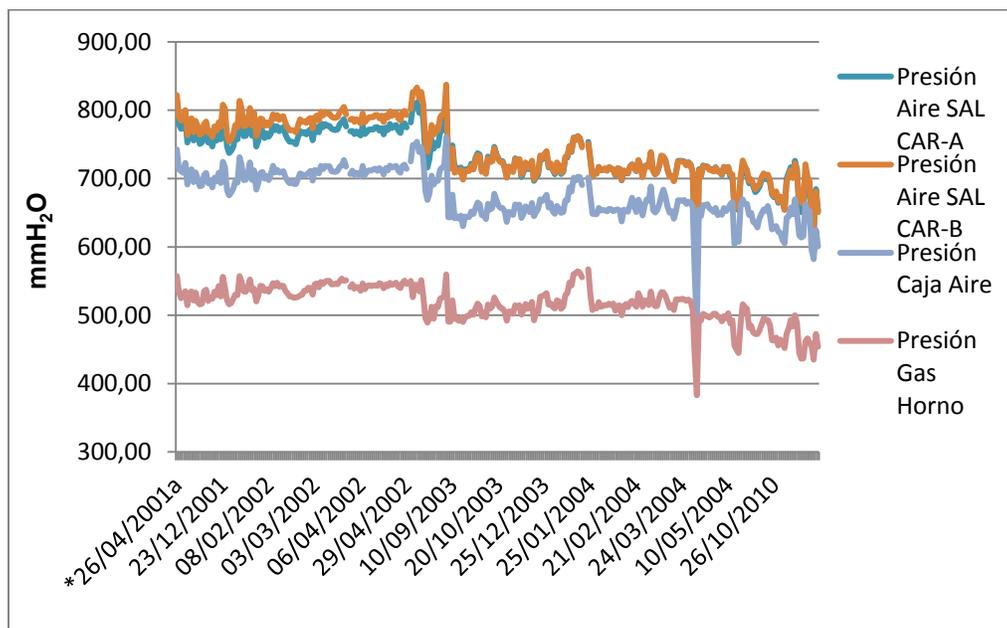


Figura 2.10 Comportamiento de las presiones de aire a la salida de los C.A.R, la presión en la caja de aire y la presión del gas en el horno.

En el gráfico presentado en la figura 2.10 se aprecia un comportamiento similar para los parámetros que ahí se analizan, lo que significa un buen funcionamiento de los C.A.R, la caja de aire y el horno.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

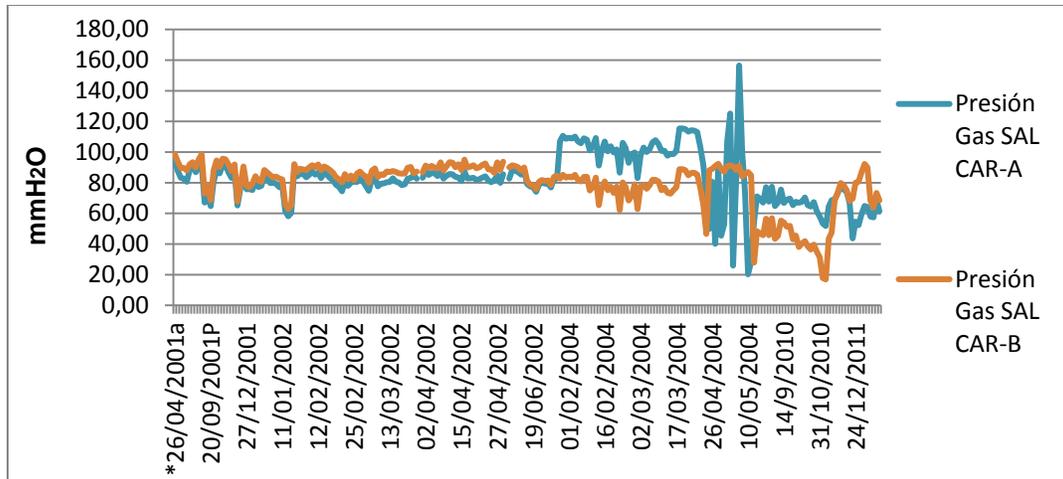


Figura 2.11 Comportamiento de las presiones del gas a la salida de los C.A.R.

En la figura 2.11 están presentadas en el tiempo las curvas de presiones del gas a la salida de los C.A.R., en ellas se puede apreciar un comportamiento similar. Los picos de caída representan un descenso brusco de la presión por parada de la planta y los picos de ascenso de presión representan un ensuciamiento de los C.A.R.

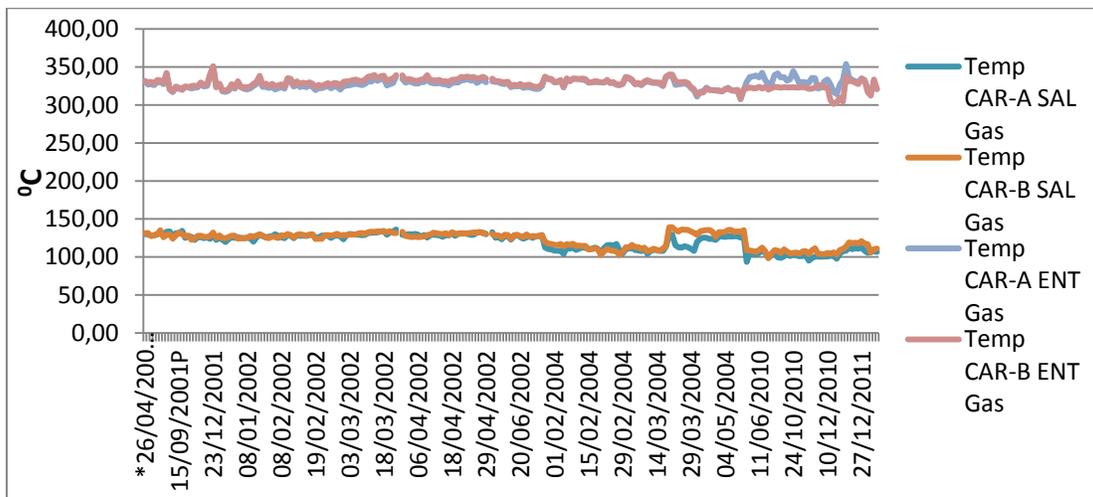


Figura 2.12 Comportamiento de las temperaturas de entrada y salida del gas en los C.A.R.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

En la gráfica presentada en la figura 2.12 se aprecia como las temperaturas de entrada y salida del gas en los C.A.R oscilan en rangos de 50 °C.

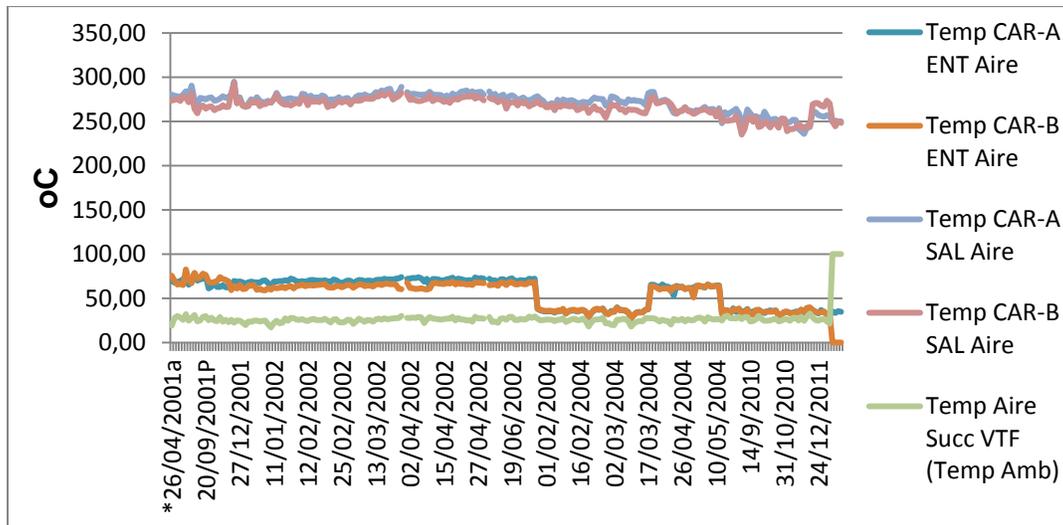


Figura 2.13 Comportamiento de la temperatura del aire en la entrada y salida de los C.A.R, además de la temperatura del aire en la succión de los V.T.F.

En la figura 2.13 se presentan graficadas las temperaturas de entrada y salida del aire en los C.A.R, así como la temperatura del aire en la succión de los V.T.F. Es apreciable la disminución de la temperatura del aire a la salida de los C.A.R, asociado al ensuciamiento de los mismos.

### 2.4 Comparación de los ensuciamientos del C.A.R en la unidad 3 con el insumo de los V.T.F.

El ensuciamiento de los C.A.R se produce por la acumulación de partículas que quedan de una mal combustión del combustible utilizado en la caldera que poco a poco se incrustan en las paredes de los C.A.R.

Como se aprecia en las figuras 2.14, 2.15 y 2.16 el comportamiento de la diferencia de presión en el tiempo está asociado directamente con el insumo de los V.T.F y que por demás incide también en el insumo de la planta.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

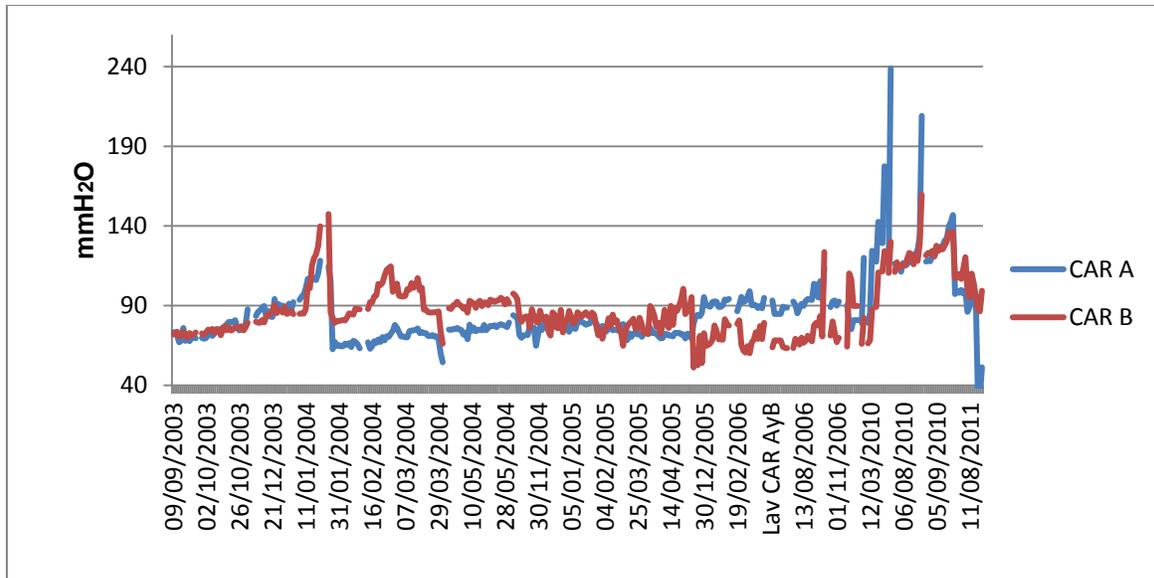


Figura 2.14 Diferencia de presión en los conductos del aire de los C.A.R en la unidad 3.

En la figura 2.14 se presenta el comportamiento en el tiempo de la diferencia de presión en el conducto de aire, el cual presenta una tendencia al crecimiento producto al ensuciamiento de los C.A.R.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

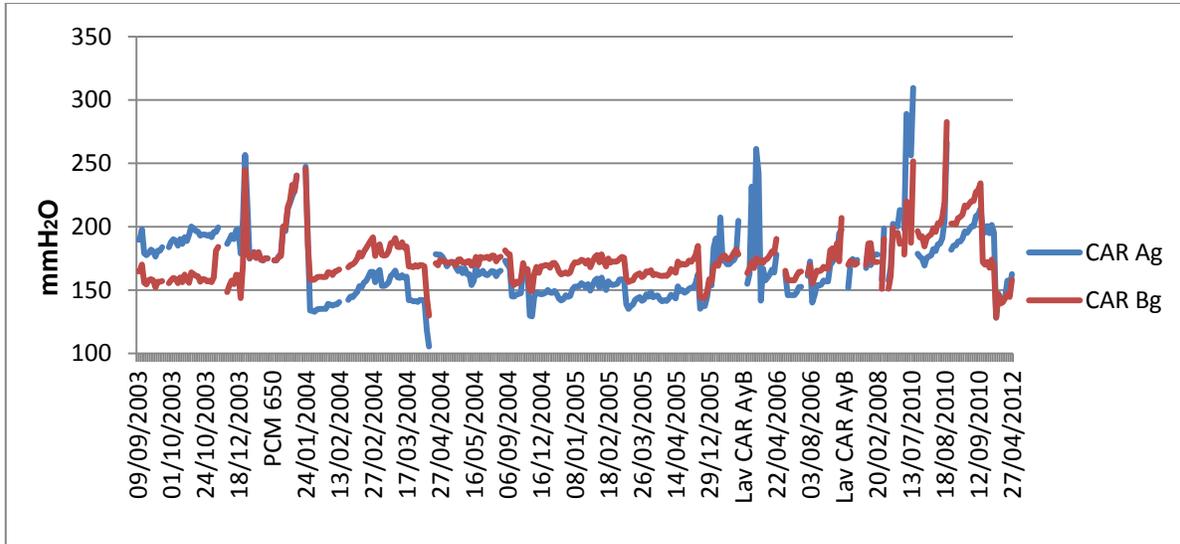


Figura 2.15 Diferencia de presión en el conducto de gases de los C.A.R en la unidad 3.

En la figura 2.15 se ha presentado el comportamiento en el tiempo de la diferencia de presión en el conducto de gases producto de la combustión, se aprecia constantemente una tendencia al crecimiento hasta alcanzar valores de 300 mmH<sub>2</sub>O, lo cual es provocado por un ensuciamiento en los C.A.R.

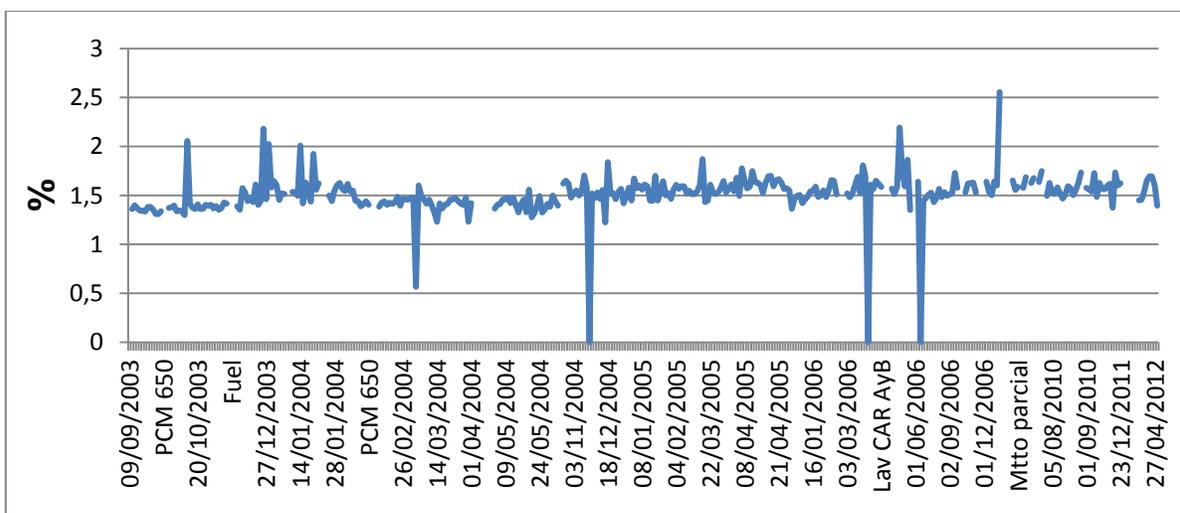


Figura 2.16 Comportamiento del insumo de la unidad 3 en el tiempo.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

En la figura 2,16 se presentó el comportamiento en el tiempo del insumo de la unidad 3, este parámetro representa el porciento de corriente que utiliza la planta para el uso necesario de equipos como los V.T.F, alcanzando como valor máximo 2.6 % en el año 2006.

## Capítulo II: Estudio de los parámetros de los equipos que componen el sistema de aire para la combustión en la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”

---

### CONCLUSIONES PARCIALES II

1. La presión de descarga de los V.T.F en el período analizado se encuentra mayormente entre los 900 y 950 mmH<sub>2</sub>O en la unidad 4, siendo muy por encima de su presión por diseño.
2. El aumento del insumo en los V.T.F está asociando al aumento de la diferencia de presión tanto en el conducto de aire como el de gases de los CAR, los cuales pueden llegar hasta valores de 240 mm H<sub>2</sub>O en el conducto de aire y hasta 300 mmH<sub>2</sub>O en el conducto de gases para la unidad 3, y en la unidad 4 pueden alcanzar valores hasta de 180 mmH<sub>2</sub>O para el conducto de aire y 170 mmH<sub>2</sub>O para el conducto de gases.
3. Las temperaturas que se analizaron en este capítulo, no presentan comportamiento similar al insumo por lo que no se utilizará en la obtención de los modelos en RNA.

## CAPITULO III

## CAPITULO 3: ESTUDIO DEL INSUMO DE LOS VENTILADORES DE TIRO FORZADO CON EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

### 3.1 Teoría sobre la inteligencia artificial. Redes neuronales.

#### 3.1.1 Redes Lineales. (“REDES NEURONALES,” n.d.)

Las redes que veremos en este capítulo varían con las del capítulo anterior en que tienen una función de activación lineal. Otro elemento importante es que la regla de aprendizaje respectiva (la regla Widrow-Hoff, regla de mínimos cuadrados o regla delta) ajusta los pesos (y elementos de tendencia -biases-) proporcionalmente a el valor del error, no solo cuando se detecta su presencia.

En este capítulo se van a atacar básicamente dos problemas. En primer lugar, queremos diseñar una red lineal que, al ser presentada con un conjunto dado de entradas, dé como salidas los vectores deseados correspondientes. Para cada vector de entrada se calculará el vector de salida. La diferencia entre el vector de salida y el vector de salida deseado es el error. Se estarán buscando valores para los pesos y elementos de tendencia tales que la suma de los cuadrados de los errores se minimice o este bajo un nivel de tolerancia pre-establecido.

Los sistemas lineales tienen un mínimo único en el espacio del error, por lo tanto el problema de entrenamiento no es tan grave. En la mayoría de los casos los valores de convergencia se pueden calcular directamente de las entradas y salidas deseadas. Hay casos en los que se dan problemas numéricos que dificultan esta tarea. Afortunadamente, existen herramientas (el algoritmo Widrow-Hoff) con las que siempre se puede encontrar un error mínimo para el problema.

El segundo problema es la necesidad común de entrenar una red dinámicamente, es decir, que el sistema responda de manera continua a cambios en el ambiente de operación. A este tipo de sistemas se le conoce como adaptivo. Este problema

puede ser resuelto gracias a que el tiempo de entrenamiento es generalmente suficientemente corto para permitir entrenamiento a cada paso basándose en vectores de entrada y deseado nuevos.

Un trabajo pionero en ésta área se debe a Widrow y Hoff, quienes nombraron sus sistemas adaptivos lineales ADELIN. Estas redes con usualmente utilizadas en procesamiento de señales, control y sistemas de predicción.

Una neurona con dos entradas y función de activación lineal se muestra en la figura 3.1. Tal como al final del capítulo anterior, el término de tendencia (vías) se utiliza como variable extra de ajuste para obtener la respuesta deseada de la red. El valor del término de tendencia se obtiene como si fuera un peso más, tal como se vio en el capítulo pasado.

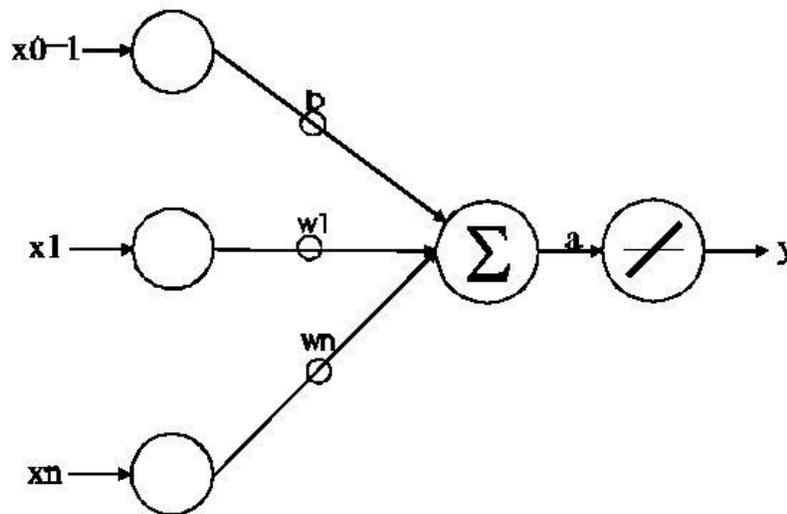


Figura 3.1 Esquema de una red lineal.

Una neurona lineal se puede entrenar para aprender funciones lineales o puede ser utilizada para encontrar una aproximación lineal a una función no lineal. Una red lineal, por supuesto, no puede ejecutar una computación no lineal.

### 3.1.2 Arquitectura de la red. (“Programa de Redes Neuronales,” n.d.)

Es posible diseñar una red lineal con varias neuronas del tipo de la que se muestra en la fig. 3.1. A este tipo de red se le ha llamado también MADELINE, por

## Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

ser Muchas ADELINe. La regla de entrenamiento Widrow-Hoff, sólo puede entrenar redes de una sola capa de procesamiento, sin embargo esto no es una desventaja muy grande. Se puede demostrar (incluso vislumbrar) que una red lineal de varias capas siempre tiene un equivalente de una sola capa. De hecho lo único que se lograría con capas múltiples sería una operación de multiplicación a los resultados de una sola capa, lo que implica multiplicar por cierto factor los resultados de la capa única.

La figura 3.2 muestra una red lineal de múltiples neuronas. Ahora se adopta la notación que MATLAB usa en el manual y en los programas.

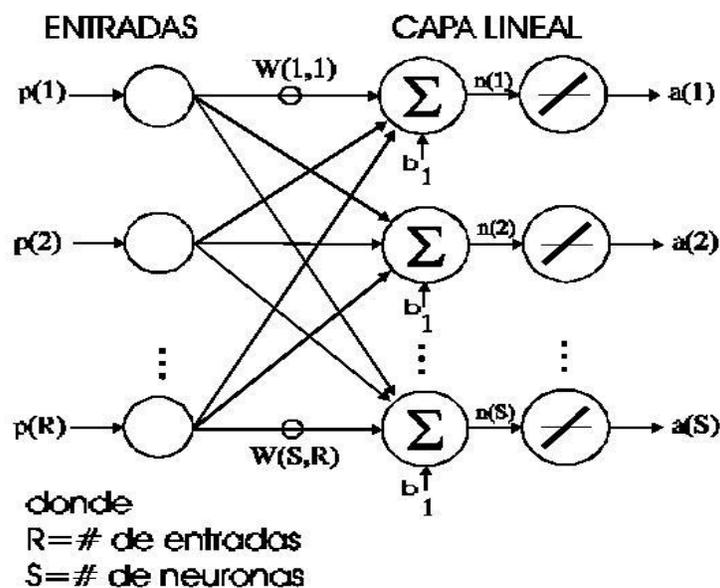


Figura 3.2 Arquitectura de una red lineal. Se usa notación de MATLAB.

La figura 3.3 muestra un diagrama esquemático equivalente a la figura 3.2 pero en este caso en simbología reducida. Las entradas se muestran como un vector, al igual que las salidas, los elementos de tendencia y los resultados intermedios (n). Los pesos ahora son una matriz porque hay tantos pesos como número de neuronas en la capa procesadora para cada entrada. Cada entrada tiene un vector

de pesos asociado. El conjunto completo de pesos forma una matriz con los vectores que corresponden a cada entrada.

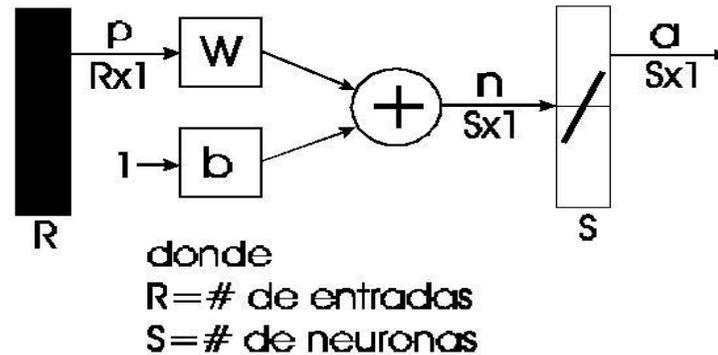


Figura 3. 3 Arquitectura de una red lineal. Se usa notación reducida de MATLAB.

El símbolo de sumatoria con la letra griega sigma mayúscula se ha sustituido por el signo '+' y el símbolo para describir la función de activación sigue siendo el mismo.

### 3.1.3 Diseño.

(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.)

El diseño de la arquitectura en este tipo de redes no es ningún problema dado que el número de entradas esta dado por la definición del problema al igual que el número de salidas. El módulo de redes neuronales de MATLAB contiene varias funciones para el diseño e implementación de este tipo de redes.

### 3.1.4 Inicialización.

(“Programa de Redes Neuronales,” n.d.)

La función **initlin** se usa para inicializar los peso y elementos de tendencia del la capa lineal dándoles valores pequeños al azar. El código de inicialización para una capa de siete neuronas lineales y cinco entradas, sería:

```
[W,b] = initlin(7,5);
```

**Initlin** es una función que pertenece al módulo de RN. Estas funciones están dadas en archivos de extensión '.m' que están en ASCII. En la figura 3.4 se presenta el código para la función **initlin**:

```
function [w,b] = initlin(r,s)
```

```
%INITLIN Initialize linear layer.  
%  
% [W,B] = INITLIN(R,S)  
% R - Number of inputs to the layer.
```

```
function [w,b] = initlin(r,s)  
%INITLIN Initialize linear layer.  
%  
% [W,B] = INITLIN(R,S)  
% R - Number of inputs to the layer.
```

## Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

```

%      S - Number of neurons in layer.
%      Returns:
%      W - SxR Weight matrix.
%      B - Bias (column) vector.
%
%      [W,B] = INITLIN(P,T)
%      P - RxQ matrix of input vectors.
%      T - SxQ matrix of target outputs.
%      Returns weights and biases.
%
%      EXAMPLE: [w,b] = initlin(2,3)
%              p = [1; 2; 3];
%              a = simulin(p,w,b)
%
%      See also NNINIT, LINNET, SOLVELIN, SIMULIN, LEARNWH, ADAPTWH, TRAINWH.

% Mark Beale, 12-15-93
% Copyright (c) 1992-94 by the MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.1 $ $Date: 1994/01/11 16:24:49 $

if nargin < 2,error('Not enough arguments. '),end

% NUMBER OF INPUTS
[R,Q] = size(r);
if max(R,Q) > 1
    r = R;
end

% NUMBER OF NEURONS
[S,Q] = size(s);
if max(S,Q) > 1
    s = S;
end

[w,b] = rands(s,r);
  
```

Figura 3. 4 Código de la función `initlin` de MATLAB.

Como se puede apreciar esta función es sumamente simple y se reduce a asignar valores aleatorios a las variables de salida de la función. El único cuidado que se tiene que tener es asignar a cada vector o matriz su tamaño correspondiente. Se puede observar de este código que el tamaño de los vectores o matrices de entrada se infieren, por lo tanto se puede tener:

```
[W,b] = initlin(P,T);
```

Si una solución con error cero existe, entonces la función **solvelin** la encontrará. Si no existe una solución perfecta para el problema, la función regresará valores que minimizan la suma de errores cuadrados ('sse', por sus siglas en inglés).

$$sse = \sum_{k=1}^Q e(k)^2 = \sum_{k=1}^Q (t(k) - a(k))^2$$

Si existe más de una solución con error cero, la función regresa la solución con los pesos y elementos de tendencia más pequeños, desde el punto de vista del sse.

Pero, ¿para qué entrenar la red si ya se tiene una función que devuelve una solución? Existe la posibilidad de que **solvelin** no entregue una solución. Se puede dar el caso que para ciertas condiciones de tamaño de las matrices o parámetros de entrenamiento la función regrese el siguiente mensaje:

**Warning: Matrix is singular to working precision.**

Cuando los cálculos realizados por **solvelin** no son numéricamente estables la red se puede entrenar con **learnwh** y **trainwh** para obtener una aproximación de la solución ideal. En otras circunstancias, es posible que no se cuente con todos los vectores de entrenamiento desde un principio, y se requiera de un entrenamiento dinámico. Para esto se tiene que contar con un procedimiento de entrenamiento para la red. La función **adaptwh** permite que una red lineal sea entrenada de manera adaptativa, en respuesta a un ambiente cambiante.

Finalmente, el estudio del procedimiento de entrenamiento para las redes lineales nos dará elementos esenciales para entender procedimientos de entrenamiento más complejos.

### 3.1.5 Regla de aprendizaje. ("Programa de Redes Neuronales," n.d.)

Siendo ejemplos de redes supervisadas, las redes lineales son entrenadas en base a ejemplos de operación deseada. La regla de aprendizaje de Widrow-Hoff **learnwh** calcula cambios a los pesos y elementos de tendencia de la capa de procesamiento para reducir el error mínimo cuadrado de esa capa. **learnwh** toma

como argumentos el vector de entrada  $\mathbf{p}$  presentado a la red, y el error  $\mathbf{e}$  de la red (la diferencia entre las salida de la red  $\mathbf{a}$  y las salidas deseadas  $\mathbf{t}$ ).

$$\mathbf{e} = \mathbf{t} - \mathbf{a};$$

$$[\mathbf{dW}] = \text{learnwh}(\mathbf{p}, \mathbf{e}, \text{lr});$$

Un argumento adicional es  $\text{lr}$ , la razón de aprendizaje, que funciona como una ganancia en los cambios de las variables adaptables. Este parámetro es importante porque da el tamaño de los pasos hacia la convergencia. Si  $\text{lr}$  es grande, al aprendizaje es rápido, pero si es muy grande, el aprendizaje se puede tornar inestable y tal vez aun alejarse de la convergencia. Para asegurar un aprendizaje estable, la razón de aprendizaje  $\text{lr}$  debe ser menor al recíproco del vector característico (o propio o Eligen) de la matriz  $\mathbf{P}^* \mathbf{P}$ . La función `maxlinlr` calcula la razón de aprendizaje máxima, que asegure estabilidad ( $0.999 * \mathbf{P}^* \mathbf{P}$ ). La función `maxlinlr` de MATLAB se muestra en la figura 3.5.

```

function lr = maxlinlr(p,b)
%MAXLINLR Maximum learning rate for a linear layer.
%
%   MAXLINLR is used to calculate learning rates for TRAINWH.
%
%   MAXLINLR(P,'bias')
%   P - RxQ matrix of input vectors.
%   Returns maximum learning rate for layer with biases.
%
%   MAXLINLR(P)
%   P - RxQ matrix of input vectors.
%   Returns maximum learning rate for layer without biases.
%
%   EXAMPLE: P = [1 2 -4 7; 0.1 3 10 6];
%             lr = maxlinlr(P,'bias')
%
%   See also LINNET, LEARNWH, ADAPTWH, TRAINWH.

% Mark Beale, 1-31-92
% Revised 12-15-93, MB
% Copyright (c) 1992-94 by the MathWorks, Inc.
% $Revision: 1.1 $ $Date: 1994/01/11 16:25:45 $

if nargin < 1, error('Not enough input arguments.'): end

if nargin == 1
    lr = 0.9999/max(eig(p*p'));
else
    p2=[p; ones(1,length(p))];
    lr = 0.9999/max(eig(p2*p2'));
end
  
```

Figura 3. 5 Código de la función **maxlinlr** de MATLAB. Versión íntegra.

Como podemos observar el código nuevamente es muy simple. También se nota que existen dos posibilidades para llamar a la función:

`lr = maxlinlr (P)` % Si no se usan elementos de tendencia

`lr = maxlinlr (P,'bias')` % Si se usan elementos de tendencia

Al llamar la función incluyendo los elementos de tendencia, se añade una hilera de unos al final de la matriz P como se muestra a continuación:

P =

1.0000 2.0000 -4.0000 7.0000

0.1000 3.0000 10.0000 6.0000

p2 =

1.0000 2.0000 -4.0000 7.0000

0.1000 3.0000 10.0000 6.0000

1.0000 1.0000 1.0000 1.0000

Pidiendo la ayuda para el comando 'ones' desde la ventana de comandos de MATLAB se obtiene:

```
help ones
```

```
ONES All ones.
```

```
ONES (N) is an N-by-N matrix of ones.
```

```
ONES(M,N) or ONES([M,N]) is an M-by-N matrix of ones.
```

```
ONES(SIZE(A)) is the same size as A and all ones.
```

Es importante tener siempre en mente la posibilidad de usar la ayuda y tener presente sus alcances, que son considerables. Esta explicación ha sido bastante detallada con el objetivo de mostrar las herramientas disponibles para enfrentar un problema. Una vez que la razón de aprendizaje ha sido calculada, iteraciones en el código de la figura 3.6 reducirán el error asociado con las matrices de entrada y de salidas deseadas.

```
A = simulin(P,W,b);  
E = T - A;  
[dW,db] = learnwh(P,E,lr);  
W = W + dW;  
b = b + db;
```

Figura 3.6 Código usado para cada iteración de aprendizaje.

La regla Widrow-Hoff calcula cambios pequeños para los pesos y elementos de tendencia de la neurona en el sentido que disminuya el error. Este sentido se encuentra tomando la derivada de la suma del cuadrado de los errores (sse) con respecto a estos parámetros. La derivada de sse con respecto al peso  $W(i, j)$  (de la entrada  $j$  a la neurona  $i$ ) para un solo vector de entrada y vector de salidas deseadas es:

$$\frac{\partial sse}{\partial W(i, j)} = \frac{\partial}{\partial W(i, j)} \left( t(i) - \sum_{j=1}^R W(i, j)p(j) - b(i) \right)^2 = -2e(i)p(j)$$

Los cambios a los pesos se hacen en el sentido opuesto al sentido de aumento del error. Haciendo que el parámetro  $lr$  absorba la constante '2' se obtiene:

$$\Delta W(i, j) = lr \cdot e(i)p(j)$$

Que en forma matricial se convierte en:

$$\Delta W = lr \cdot E p^T$$

Esta expresión fácilmente puede escribirse en términos de los elementos de tendencia, recordando que éstos son pesos con entradas fijas a '1'.

$$\Delta b = lr \cdot E$$

### 3.1.6 Entrenamiento. ("Programa de Redes Neuronales," n.d.)

MATLAB provee una función para realizar el proceso iterativo de aprendizaje, lo que se llama entrenamiento. La función **trainwh** presenta de manera repetitiva las entradas **P** a una red lineal, usando **simulan**, y calcula los errores con respecto al vector de salidas deseadas **T**, y encuentra nuevos valores para los pesos y elementos de tendencia con **learnwh**. Este proceso se repite hasta que la suma del cuadrado de los errores cae bajo una tolerancia de error predeterminada o

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

---

hasta que se haya alcanzado el número máximo de épocas de entrenamiento. Las instrucciones correspondientes se muestran en la figura 3.7.

```
tp = [disp_freq max_epoch err_goal lr];  
[W,b,ep,tr] = trainwh(W,b,P,T,tp),
```

Fig. 3. 7 Instrucciones de MATLAB para el aprendizaje iterativo o entrenamiento.

Los parámetros de entrenamiento **tp** determinan que tan frecuentemente se despliagan los resultados (**disp\_freq**), el número máximo de épocas deseado (**max\_epoch**), la tolerancia de error deseada (**err\_goal**) y la razón de aprendizaje (**lr**). En MATLAB cualquiera de estos parámetros puede ser ignorado o se le puede asignar el valor **NaN**. Este valor, que significa **Not A Number**, es un artificio de MATLAB para manejar valores nulos. MATLAB también acepta que el vector **tp** no sea incluido en **trainwh** y se le asignaran valores predeterminados de fábrica. Si se busca la ayuda para la función **trainwh (help trainwh)** en la ventana de comandos, se desplegarán, entre otras cosas, los valores predeterminados. La función **trainwh** regresa los nuevos valores para **W** y **b**, pero también el número de épocas que se requirieron para la convergencia, **ep**, y un record de los errores a lo largo del entrenamiento, **tr**.

Una vez que la red ha sido entrenada satisfactoriamente y un vector de entrada no perteneciente al grupo de vectores de entrenamiento es presentado a la red, ésta producirá un resultado que se acerque al que produciría el vector de entrada más parecido de el grupo de entrenamiento. Este comportamiento llamado generalización es una de las Características más poderosas y atractivas de las redes neuronales.

Si al probar la red entrenada no se obtiene el comportamiento deseado, existen dos posibilidades. Una es que el problema que se está tratando no sea apto para ser aprendido por una red lineal. La otra posibilidad es que el entrenamiento haya sido insuficiente. La función **trainwh** puede ser llamada cuantas veces sea

necesario, mientras no se pierda el 'conocimiento' acumulado en ningún momento. También se puede modificar el número de épocas de entrenamiento deseadas según se requiera para obtener un resultado aceptable.

### 3.1.7 Redes Adaptivas. ("REDES NEURONALES," n.d.)

En una red lineal adaptativa se muestra en detalle en la figura 3.8 y en diagrama a bloques en la figura 3.9.

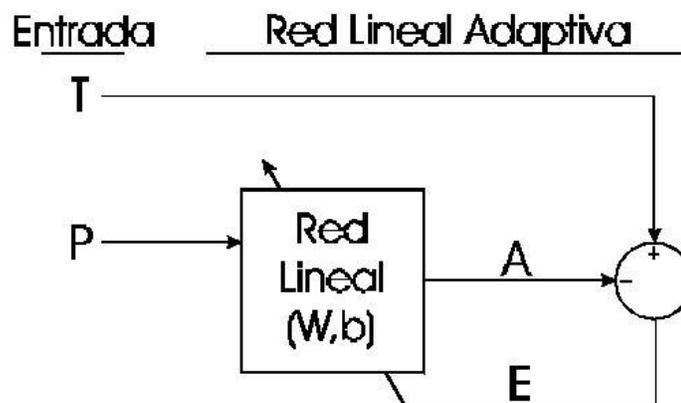


Figura 3.8 Red lineal adaptativa.

La función **adaptwh** simula una red lineal adaptativa. Este tipo de redes es entrenado con los vectores de entrada de uno por uno. El objetivo en este caso es, de forma continua en el tiempo, ajustar los pesos y elementos de tendencia de tal manera que éstos predigan cada vector de salidas deseadas de la mejor manera posible, según se van presentando, uno por uno.

Las señales de entrada y de salidas deseadas están representadas por matrices de vectores (es decir, un conjunto de vectores). Por ejemplo, la *i*-ésima columna de la matriz de entrada **P** corresponde a la *i*-ésima muestra de entrada de la red.

**adaptwh** toma como argumentos de la función los pesos y elementos de tendencia iniciales, una matriz de vectores correspondientes a una señal de entrada **P**, una matriz de señales de salida deseadas **T** y una razón de aprendizaje:

$$[A,E,W,b] = \text{adaptwh}(W,b,P,T,lr);$$

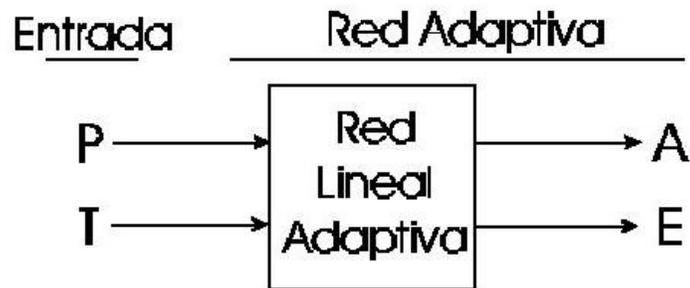


Figura 3.9 Red lineal adaptativa en diagrama de bloques.

**adaptwh** simula un red lineal adaptativa al ir presentando cada vector de entrada en  $P$  en secuencia a la red (junto con **simulin**) y luego ajustando los pesos y elementos de tendencia de acuerdo al error resultante. Una vez que todas las entradas han sido presentadas, la función **adaptwh** regresa nuevos valores para  $W$  y  $b$  y además las salidas de la red  $A$  y la señal de error  $E$ . Esto contrasta con **trainwh** en el sentido de que ésta última ajusta las variables de la red basada en TODOS los vectores de entrada y el proceso lo repite iterativamente hasta que se alcanza la tolerancia de error deseada.

Otro aspecto interesante de esta función es que no sólo regresa los valores nuevos para los pesos y los elementos de tendencia (que a los usuarios de la red generalmente no interesan), sino que también regresa la salida de la red  $A$  y la salida de error  $E$ .

### 3.2 Modelos en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para controlar el insumo diario promedio de los V.T.F 3A.

Diariamente se lleva la carga promedio de la Unidad 3 y de la Unidad 4 en MW, el insumo de los V.T.F en % (cuanto de la generación bruta consumieron los mismos), ese día. Esta variable se registra desde el año 2000. Como la carga promedio de la unidad es diferente todos los días y como es lógico el insumo diario de los V.T.F también es diferente, se hace complejo mantener un estricto control sobre el mismo, ya que la planificación de este parámetro siempre está muy por debajo de lo que se encuentra en la realidad.

## Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

---

Es por eso que en este capítulo se van a proponer nuevos modelos para el control del insumo de los V.T.F. Para lograr este control se crearon cuatro modelos con redes neuronales artificiales soportados en MATLAB dando como entradas la diferencia de presión en el conducto de aire, la diferencia de presión en el conducto de gases, el factor de insumo promedio por día para cada ventilador, la presión de descarga para cada ventilador y el flujo de aire para cada ventilador y como salida los Insumo total real de los dos V.T.F trabajando en paralelo durante todo el día.

Para crear estos modelos se escogieron los datos recopilados desde el año 2000 hasta el 2012. Con los modelos creados se hizo una simulación con el factor de insumo. Este se comparó con el insumo real y el planificado del mes de mayo del 2004 y el mes de junio del 2010.

En las figuras 3.12, 3.16, 3.20, y 3.24 se muestran las correlaciones de regresión que dieron como resultado el modelo de RNA con los parámetros que su comportamiento es más se cercano al comportamiento del insumo. Después de varias pruebas la mayor regresión obtenida fue para el modelo del V.T.F 3B, mientras que para los otros modelos fueron 87, 81 y 86 % para los ventiladores 3A, 4A, 4B respectivamente. Dichas correlaciones de regresión no son las mejores que se pudieran obtener, pero se logra mejorar el modelo de planificación de insumo para la ETE “Carlos Manuel de Céspedes”.

### **3.2.1 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 3A.**

Para la realización del modelo en RNA que permitirá un mejor control sobre el insumo del ventilador se tomaron valores aleatorios de los parámetros de entrada recopilados desde el año 2000 hasta el 2012.

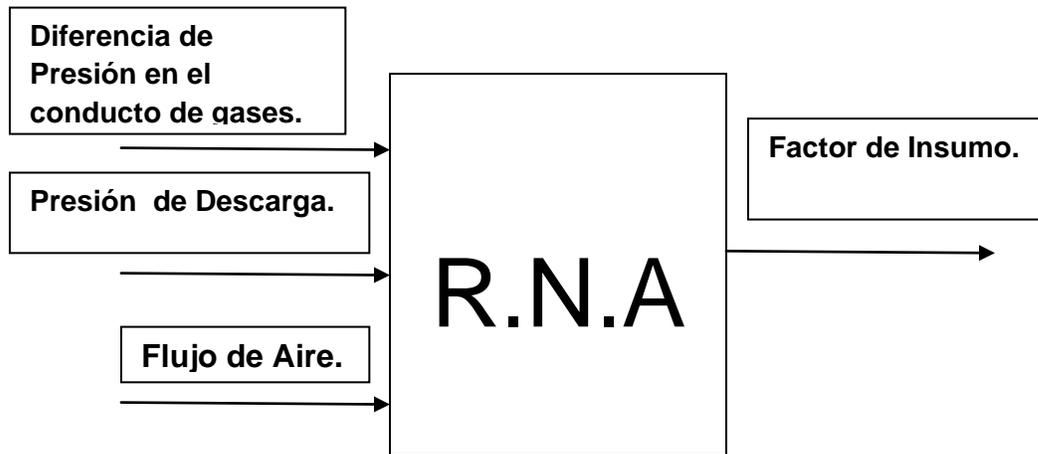


Figura 3.10. Esquema del modelo desarrollado con inteligencia artificial para el control diario del insumo del V.T.F 3A.

En la figura 3.10 se muestra el esquema en el cual se basa el modelo de RNA para el V.T.F 3A. Aquí se presentan como entrada (Diferencia de presión en el conducto de aire, la Presión de Descarga del V.T.F y el flujo de aire del V.T.F) siendo estos parámetros los que más parecido tienen en su comportamiento con el insumo.

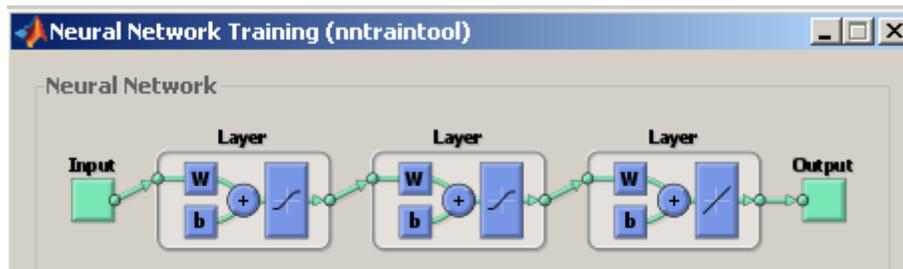


Figura 3.11. Arquitectura general de la RNA utilizada para controlar el insumo del V.T.F 3A.

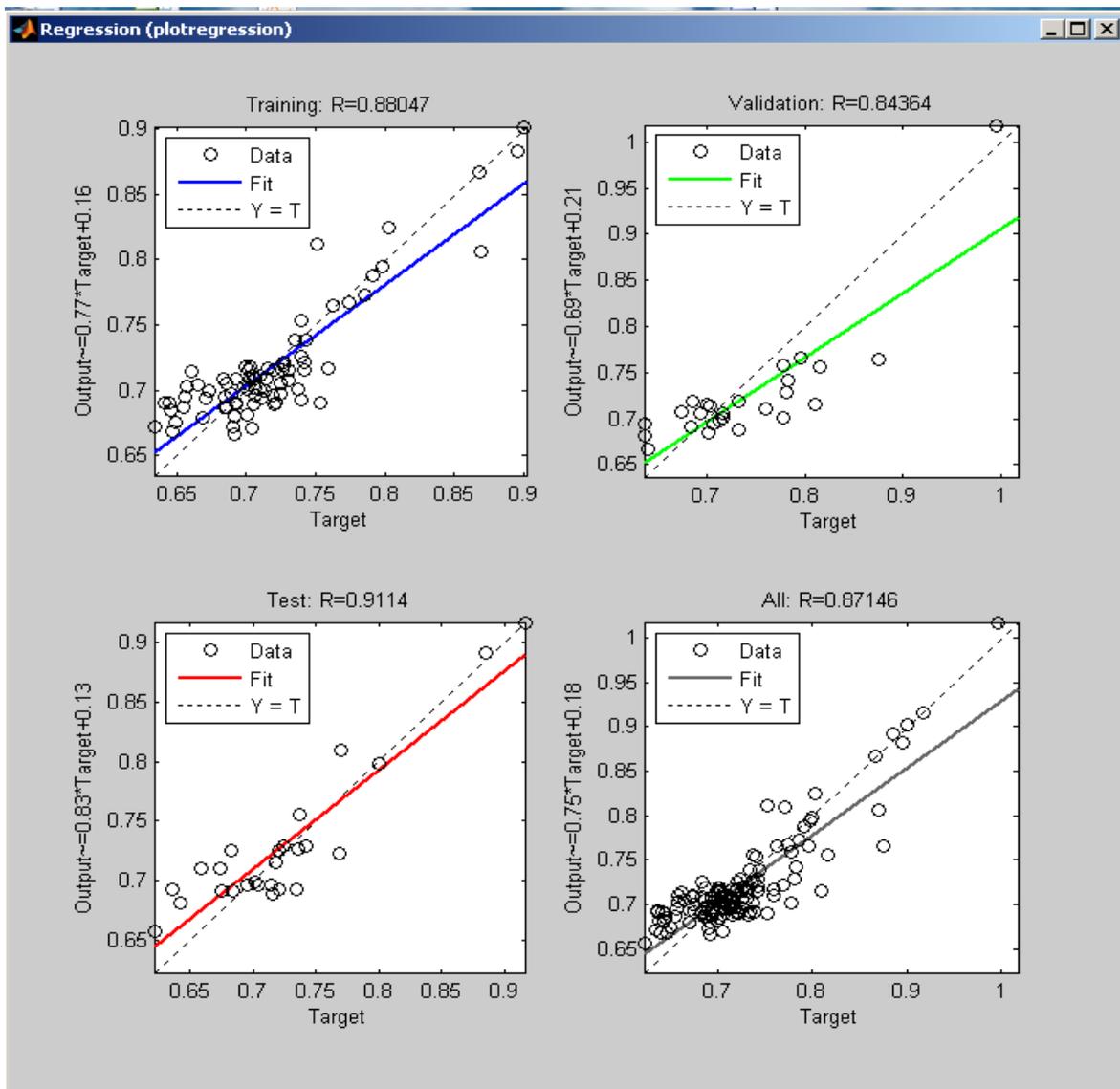


Figura 3.12 Resultados del modelo realizado para el V.T.F 3A.

## Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

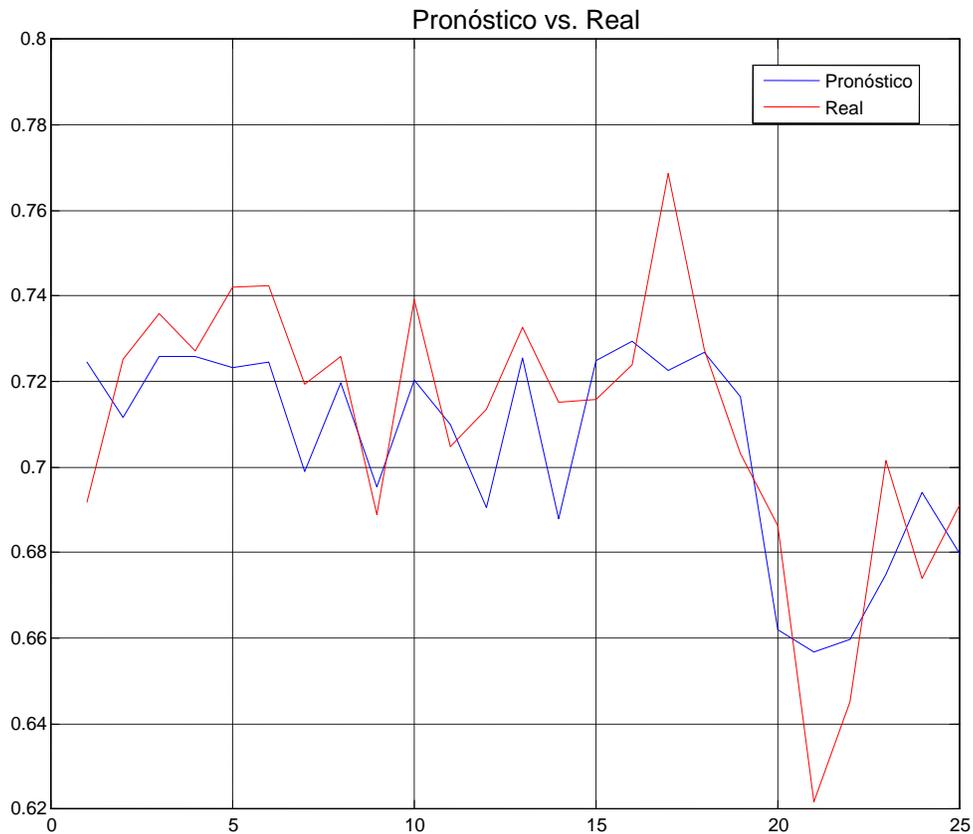


Figura 3.13 Comportamiento en el tiempo del factor de insumo pronosticado por el modelo y el real.

En la figura 3.13 se presenta el comportamiento del factor de insumo pronosticado por el modelo y el factor de insumo real que se encontraba en la base de datos. Se aprecia que en este caso el insumo real está por encima de los valores pronosticados pero se acepta porque su valor máximo en la diferencia entre ellos es de 0.05.

### 3.2.2 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 3B.

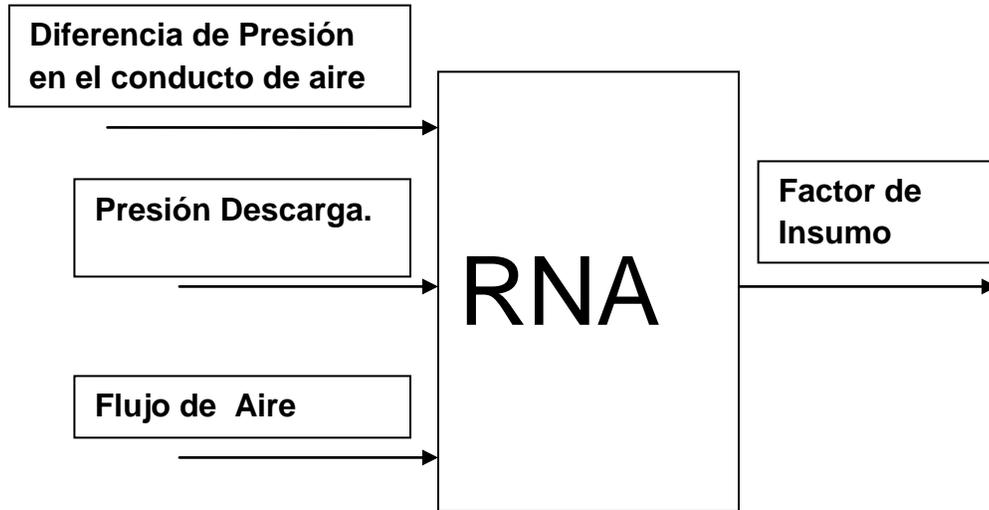


Figura 3.14 Esquema del modelo desarrollado con inteligencia artificial para el control diario del insumo del V.T.F 3B.

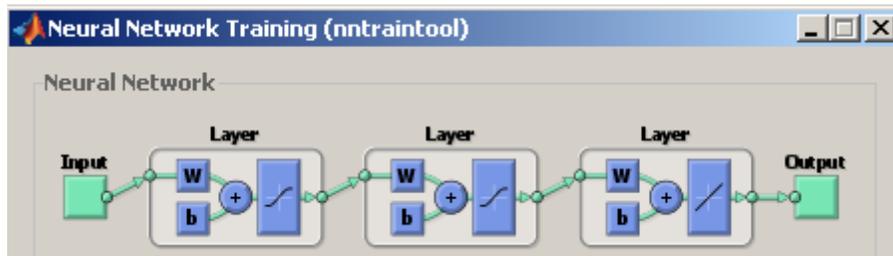


Figura 3.15 Arquitectura general de la RNA utilizada para controlar el insumo del V.T.F 3A.

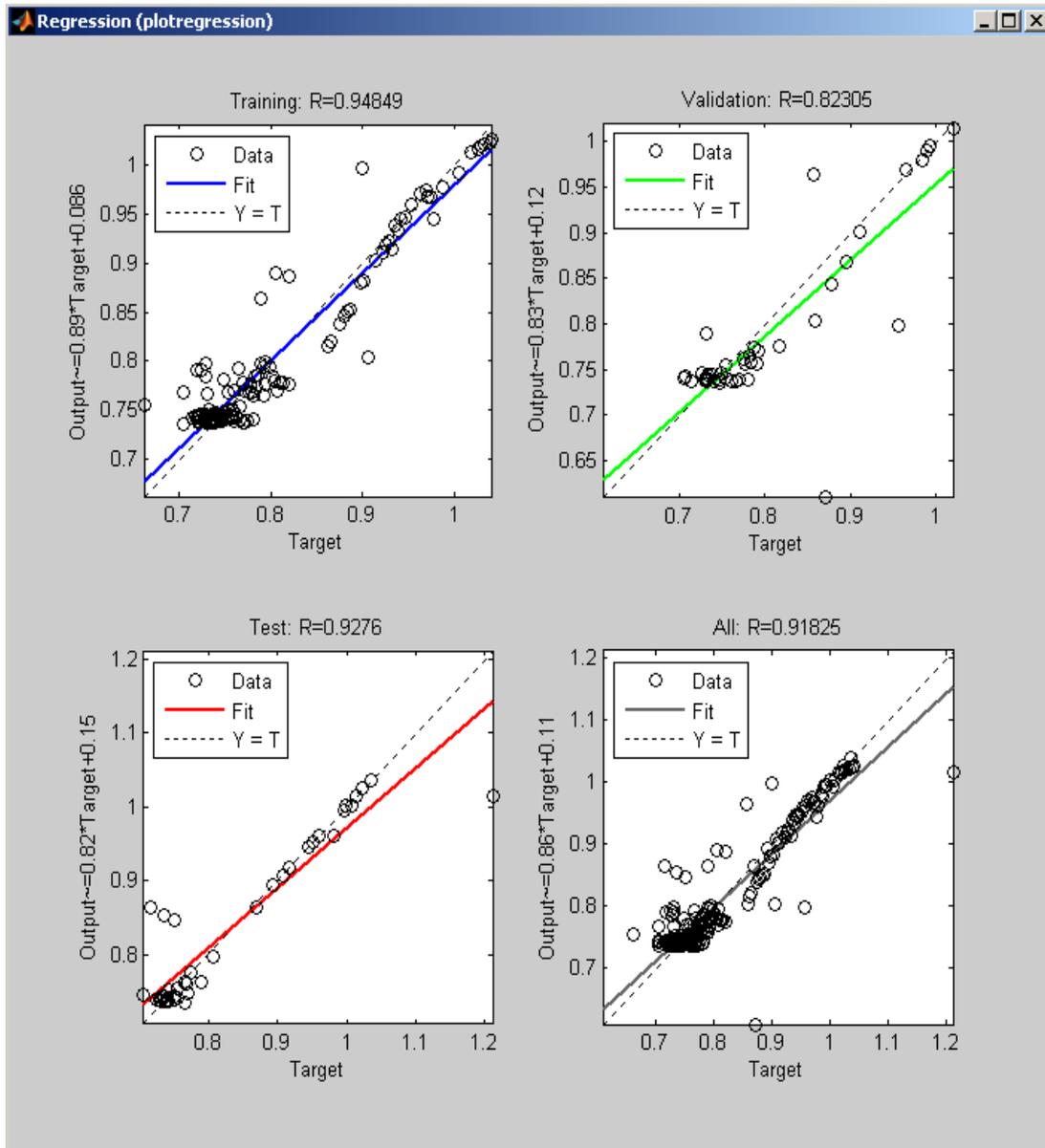


Figura 3.16 Resultados del modelo realizado para el V.T.F 3A.

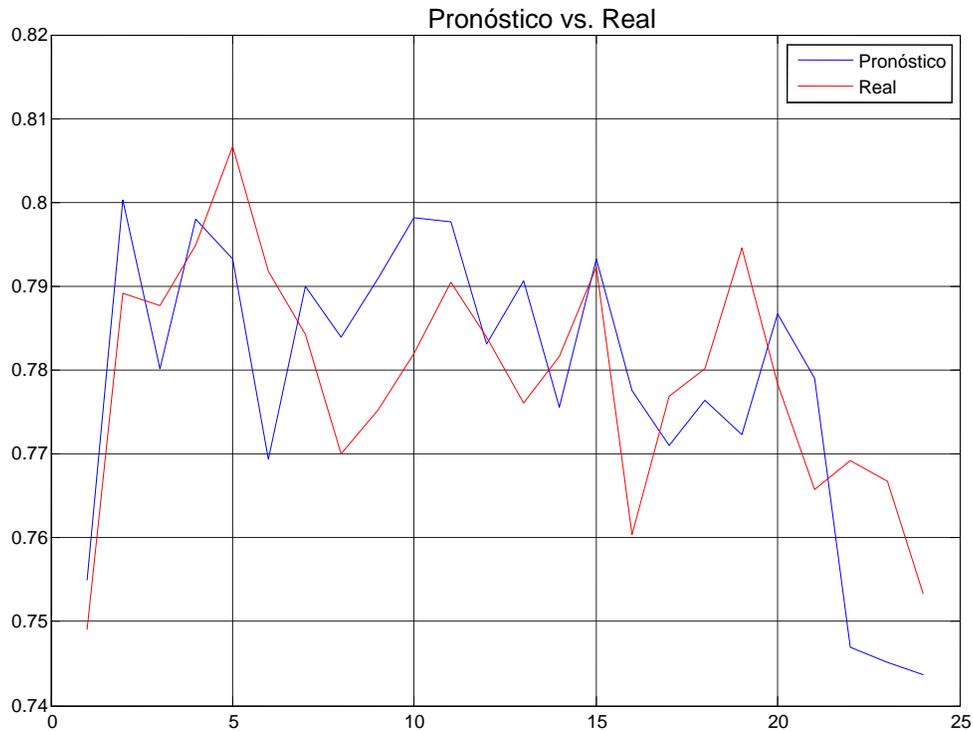


Figura 3.17 Comportamiento en el tiempo del factor de insumo pronosticado por el modelo y el real.

En la figura 3.17 se presenta el comportamiento del factor de insumo pronosticado por el modelo y el factor de insumo real que se encontraba en la base de datos. Se puede apreciar que la curva del insumo pronosticado en casi todo el tiempo tiene un comportamiento por encima de los valores reales, cual significa que el modelo es óptimo para este ventilador.

### 3.2.3 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 4A.

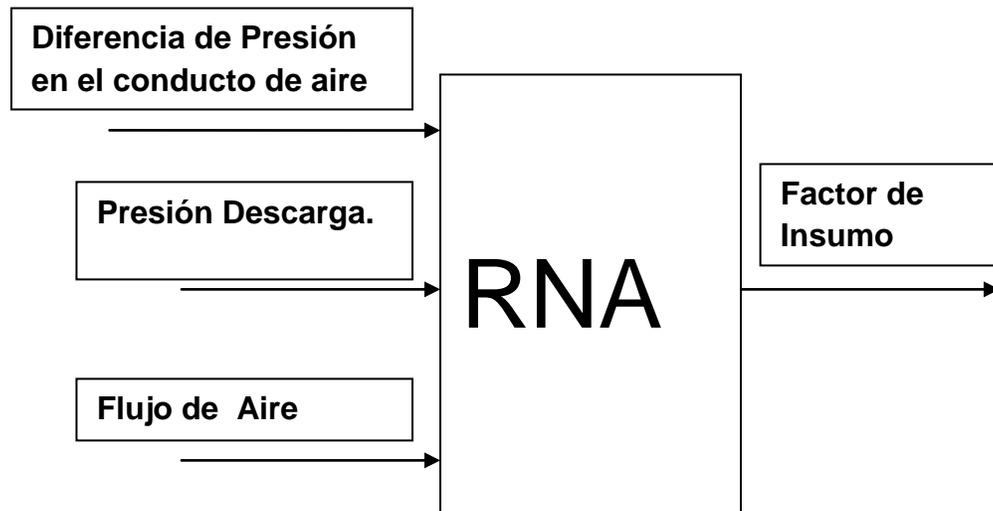


Figura 3.18 Esquema del modelo desarrollado con inteligencia artificial para el control diario del insumo del V.T.F 4A.

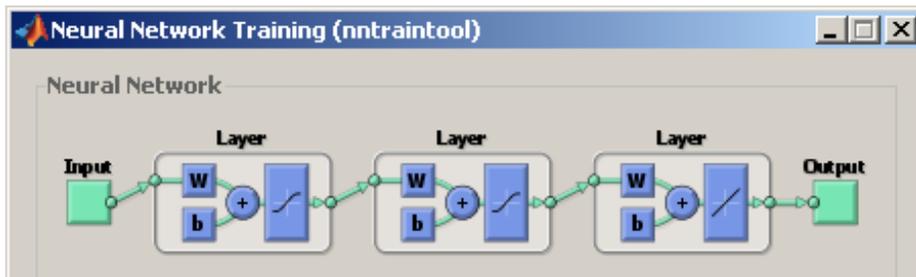


Figura 3.19 Arquitectura general de la RNA utilizada para controlar el insumo del V.T.F 4A.

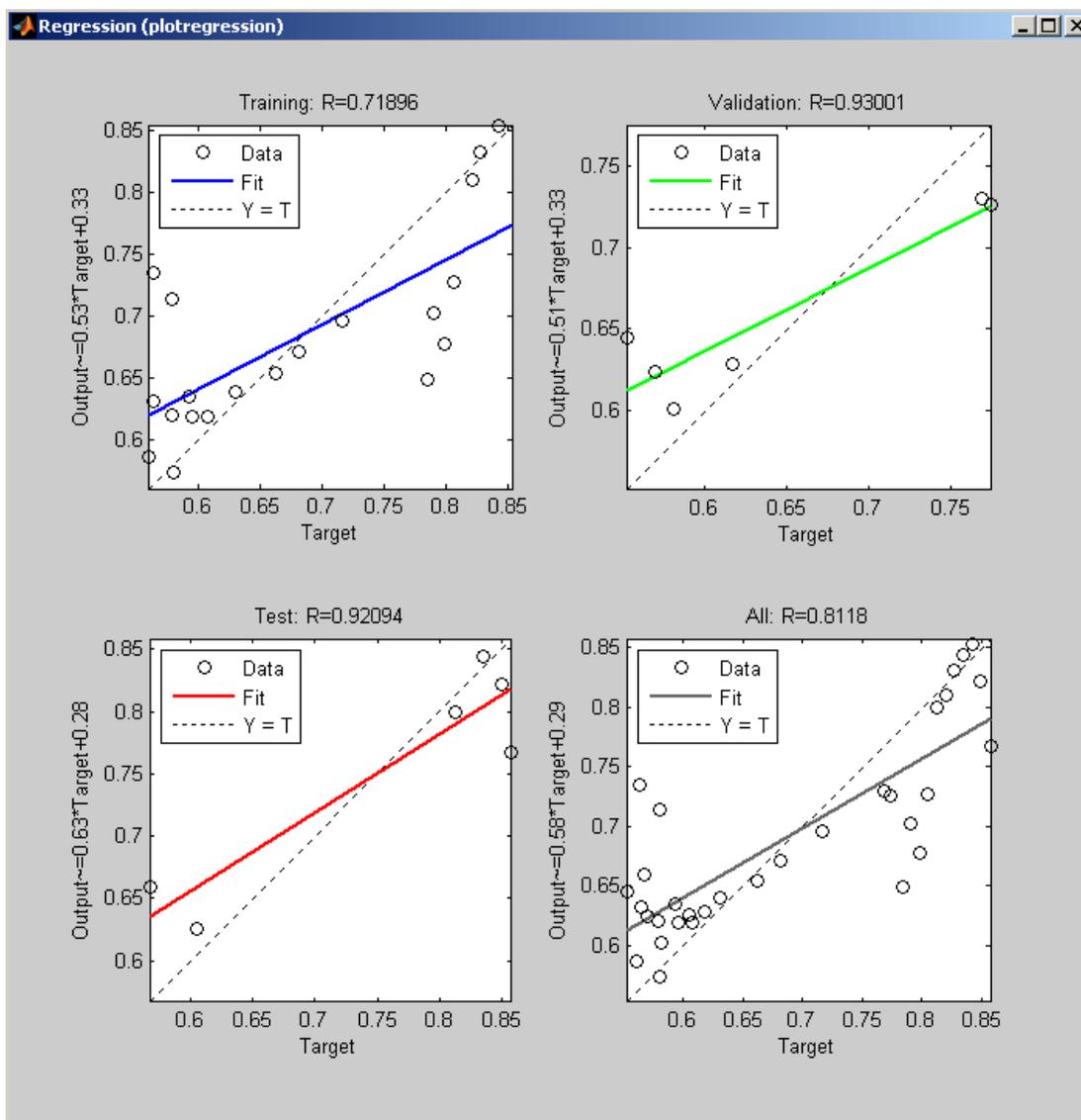


Figura 3.20 Resultados del modelo realizado para el V.T.F 4A.

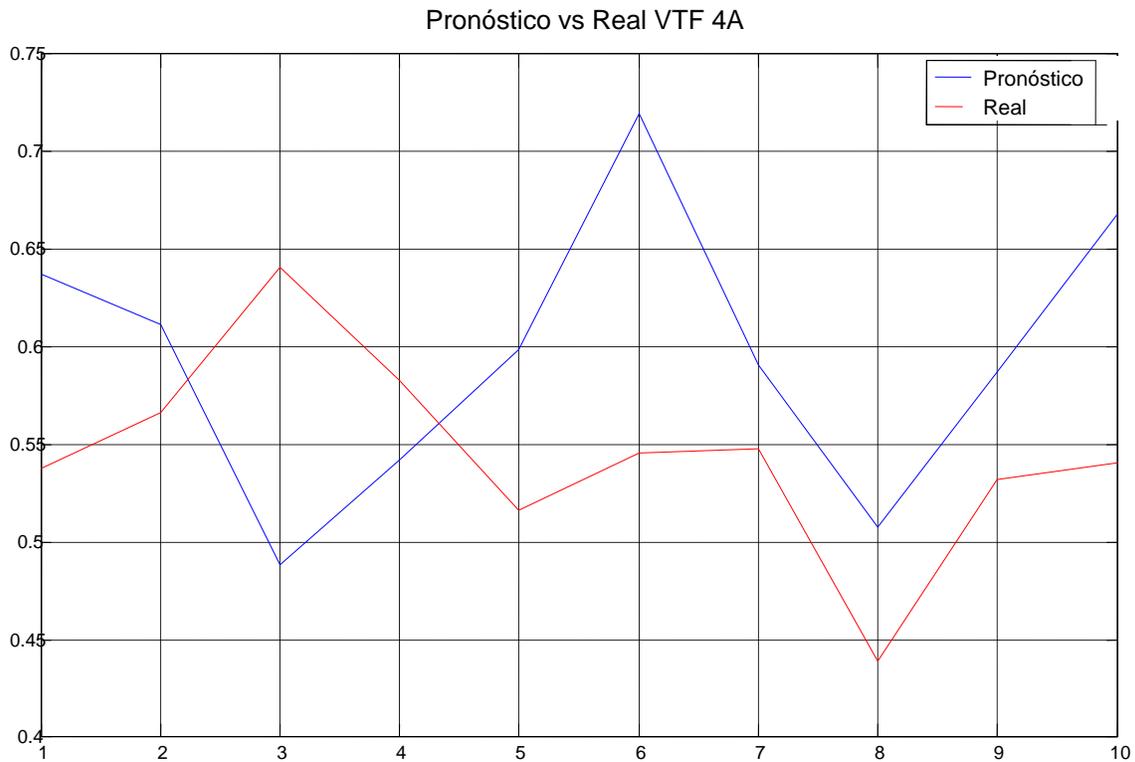


Figura 3.21 Comportamiento en el tiempo del factor de insumo pronosticado por el modelo y el real.

El gráfico presentado en la figura 3.21 muestra el comportamiento en el tiempo del insumo pronosticado por MATLAB para el V.T.F 4A y el insumo real, donde se puede apreciar que el pronóstico casi siempre está por encima del insumo real, lo que significa que el modelo es adecuado para este V.T.F.

### 3.2.4 Modelo realizado para el ventilador de tiro forzado 4B.

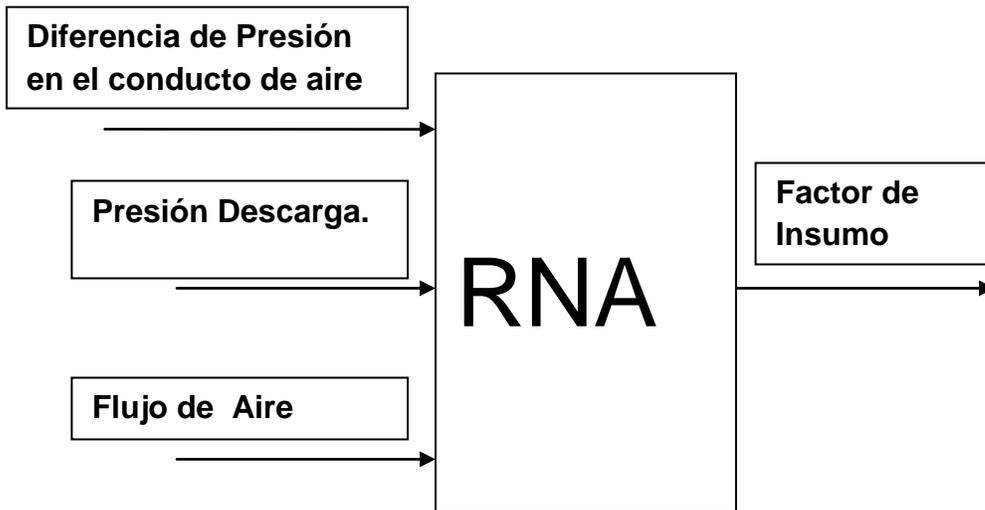


Figura 3.22 Esquema del modelo desarrollado con inteligencia artificial para el control diario del insumo del V.T.F 4A.

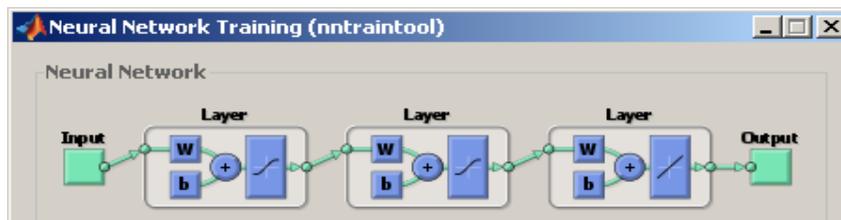


Figura 3.23 Arquitectura general de la RNA utilizada para controlar el insumo del V.T.F 4B.

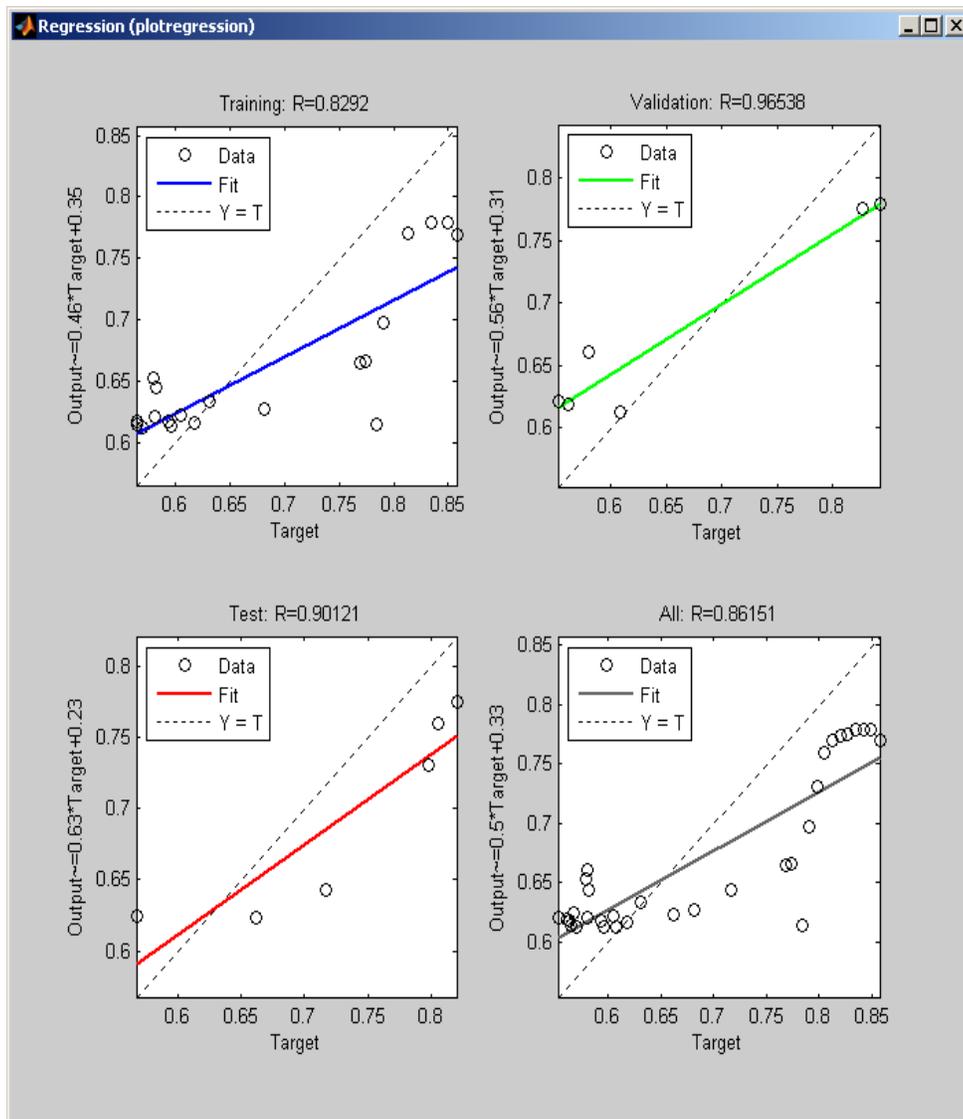


Figura 3.24 Resultados del modelo realizado para el V.T.F 4B.

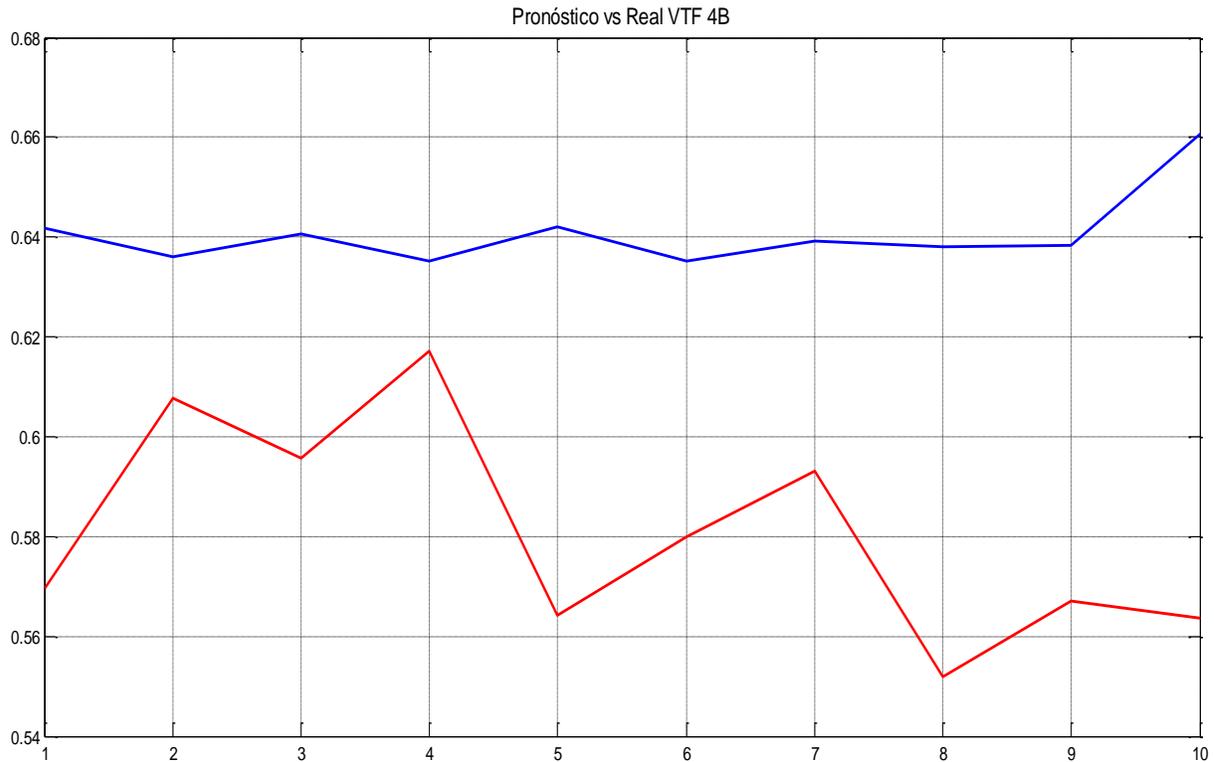


Figura 3.25 Comportamiento en el tiempo del factor de insumo pronosticado por el modelo y el real.

De las curvas presentadas en la figura 3.25 se aprecia como el insumo al comienzo presenta un comportamiento en ascenso hasta aproximadamente 0.04 % del comienzo, estando asociado esto a un ensuciamiento en el C.A.R, entonces la caída del insumo hasta el 0.56 % está dado por una limpieza de este equipo. A pesar de este comportamiento el modelo logrado para el V.T.F 4B es óptimo ya que el insumo real nunca sobrepasa el pronosticado.

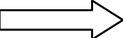
### 3.3 Comparación entre la diferencia del factor de insumo Real y Planificado que se utiliza por la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos, y los valores obtenidos por el modelo de R.N.A.

El factor de insumo de los V.T.F hoy en día en las centrales termoeléctricas es un gran problema, ya que existe una tendencia al aumento del mismo. Si además de eso se les añade una deficiente planificación a estos equipos puede existir un incumplimiento de los planes por diseño. Actualmente el modelo para la planificación del consumo promedio de los V.T.F se calcula por la ecuación 2.1. Teniendo este parámetro entonces se determina en factor de insumo mediante la ecuación 2.2.

$$=SI(T6="","", (0.629657+0.008152*T6+0.0000000702737*T6^3-0.0000000000023855*T6^5)*D6)$$

ecuación 2.1

donde:

T6  Carga Promedio (MW).

D6  Horas de Operación.

---

ecuación 2.2

El siguiente epígrafe tiene como objetivo analizar el comportamiento del factor de insumo Real y Planificado que utiliza la empresa, además de hacer una comparación con los valores obtenidos por los modelos de Inteligencia Artificial de

Redes Neuronales. Para hacer dichas comparaciones se tomaron aleatoriamente los meses de mayo y julio de los años 2004 y 2010 respectivamente.

### 3.3.1 Comportamiento del factor de insumo en el mes de mayo para los años 2004 y 2010.

En las figuras 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29 está presentado el comportamiento del factor de insumo real y planificado de los ventiladores de las unidades 3 y 4 que actualmente se manejan en la ETE “Carlos M. de Céspedes”. Como se puede apreciar el factor de insumo real generalmente está muy por encima del planificado, lo que puede estar asociado a una incorrecta planificación del insumo para estos equipos.

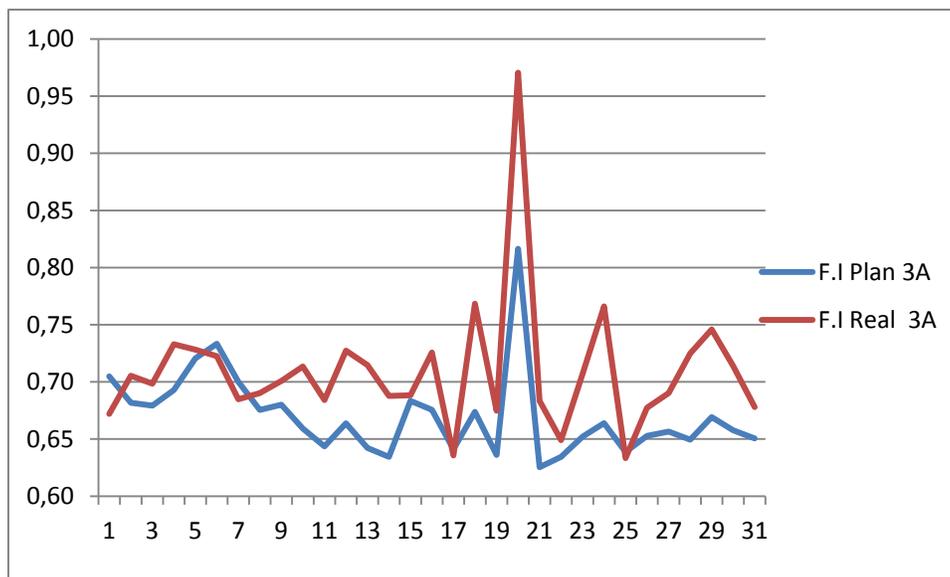


Figura 3.26. Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

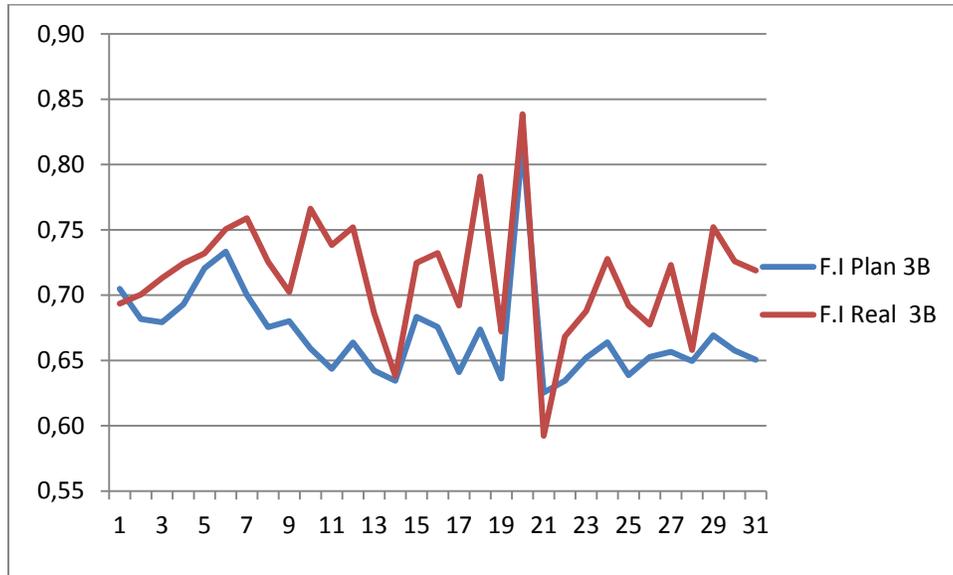


Figura 3.27 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

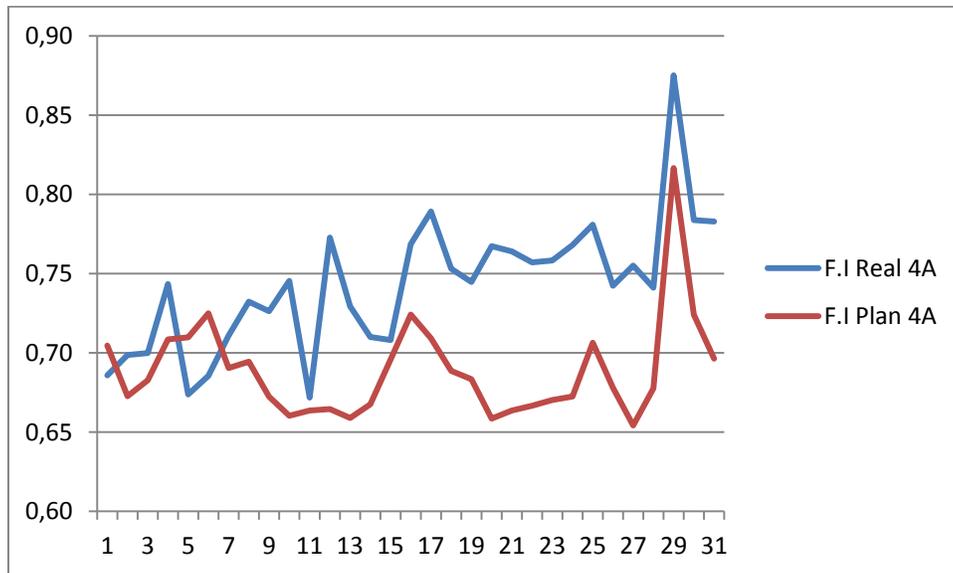


Figura 3.28 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

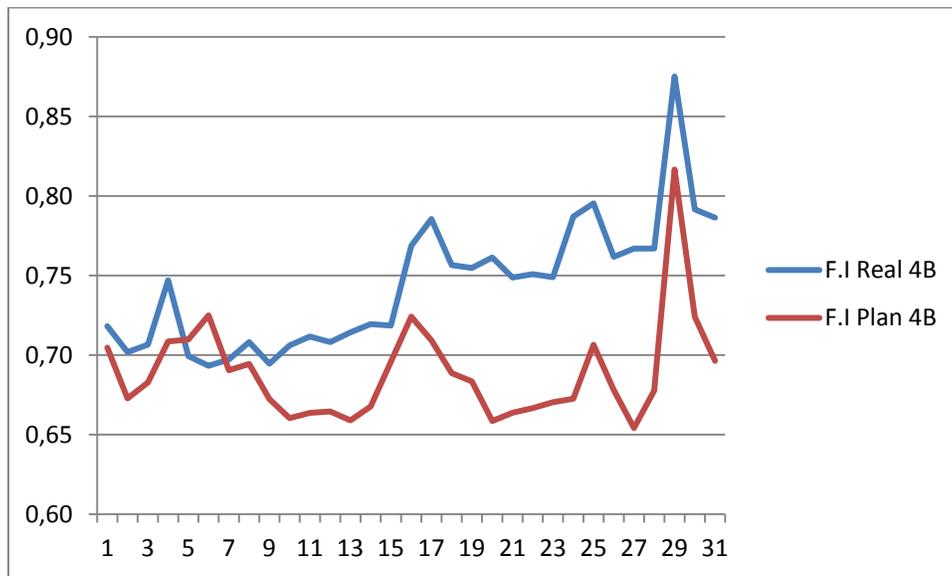


Figura 3.29 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

### 3.3.2 Comportamiento del factor de insumo en el mes de julio de los años 2004 y 2010.

En las figuras 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33 está presentado el comportamiento del factor de insumo real y planificado de los ventiladores de las unidades 3 y 4 que actualmente se manejan en la ETE “Carlos M. de Céspedes”. Como se puede apreciar el factor de insumo real generalmente está muy por encima del planificado, lo que puede estar asociado a una incorrecta planificación del insumo para estos equipos.

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

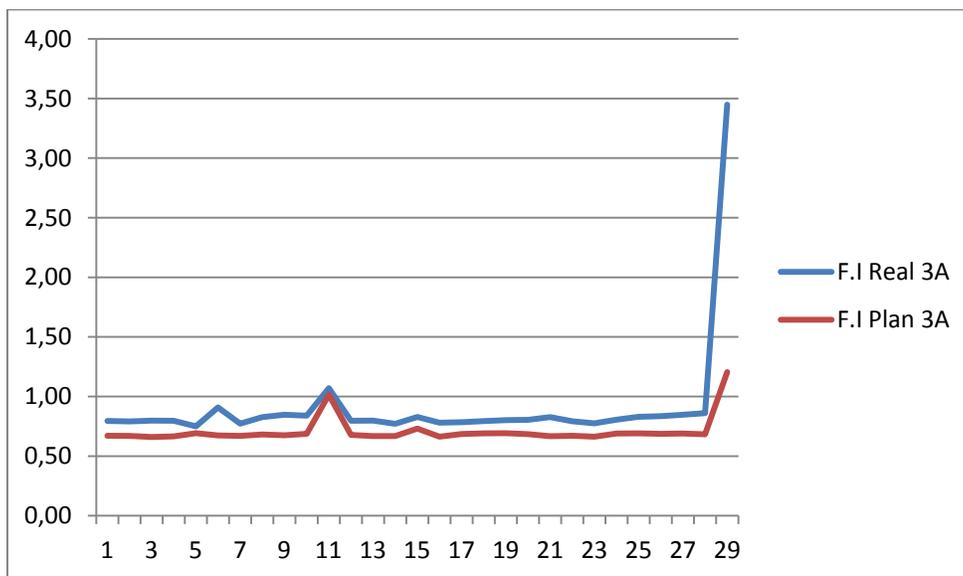


Figura 3.30 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

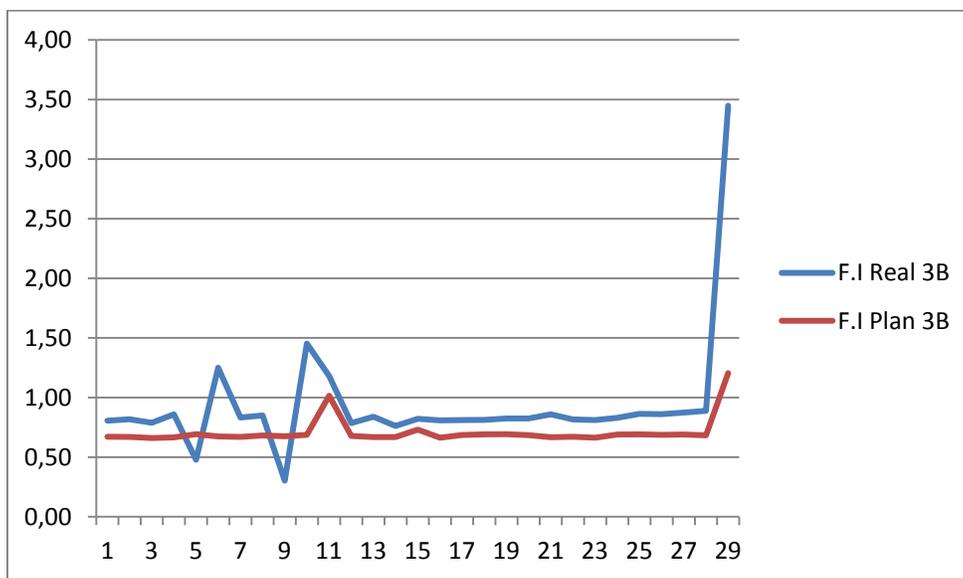


Figura 3.31 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

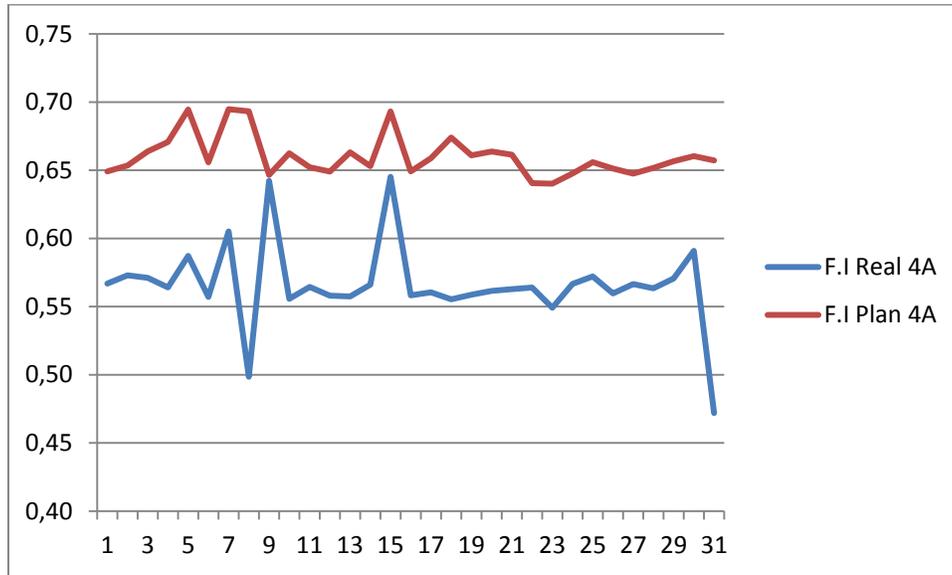


Figura 3.32 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

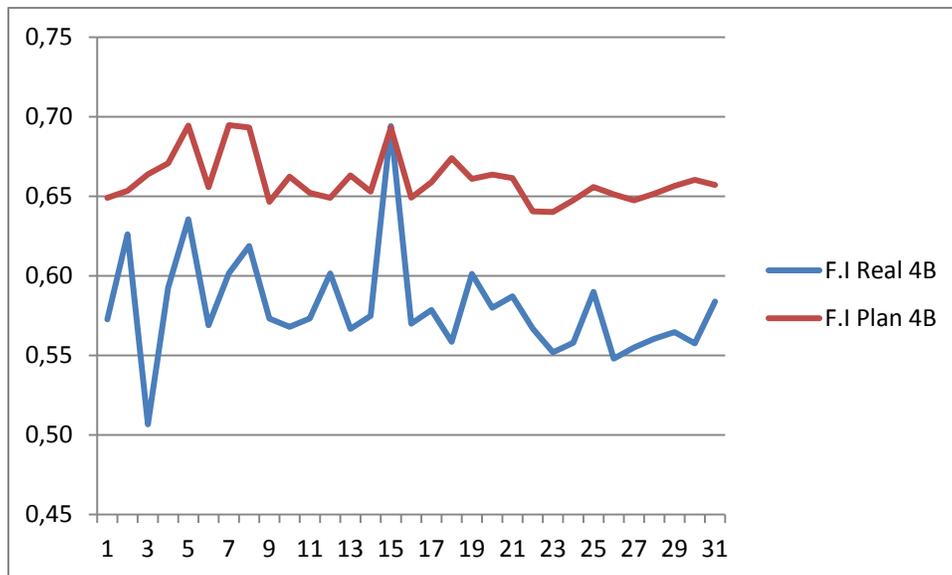


Figura 3.33 Comportamiento del factor de insumo planificado y el real.

### 3.3.3 Comportamiento de las diferencias de insumo.

Se pretende hacer una comparación entre los valores de las diferencias que existen en los insumos planificado que se utilizan en la ETE “Carlos M. de Céspedes” con las diferencias de los valores que se obtubieron como resultado de la modelación en RNA. Para hacer esta comparación se tomaron los mismos meses que se presentaron anteriormente, es decir, mayo y julio de los años 2004 y 2010 respecticavente.

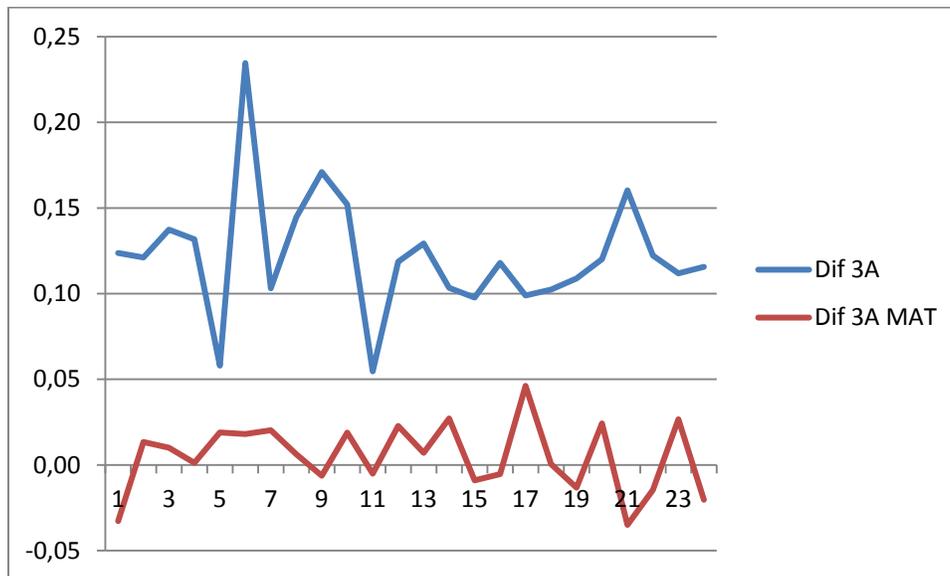


Figura 3.34 Comportamiento de la diferencia por los valores de insumo que se utilizan actualmente y los obtenidos por RNA del ventilador 3A.

La figura 3.34 presentan las curvas de diferencia entre el insumo pronosticado y el real, obtenidas por MATLAB y la real para el V.T.F 3A, donde se aprecia que la diferencia que se obtiene en RNA es mucho menor que el que actualmente existe. Esto permite una mejor planificación para estos equipos.

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

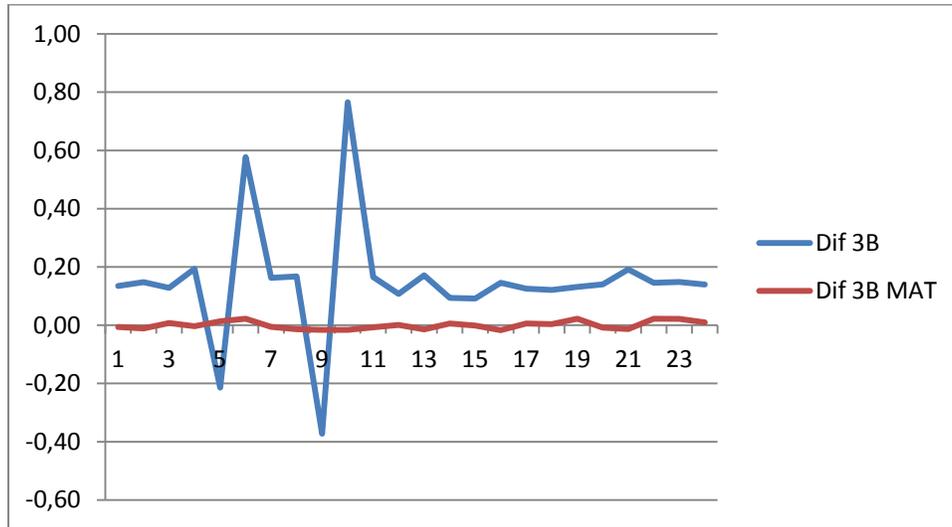


Figura 3.35 Comportamiento de la diferencia por los valores de insumo que se utilizan actualmente y los obtenidos por RNA del ventilador 3B.

En la figura 3.35 se aprecia un comportamiento casi lineal del modelo de pronóstico obtenido en MATLAB, lo que permite decir que cuando su tendencia es casi cero, es el modelo óptimo.

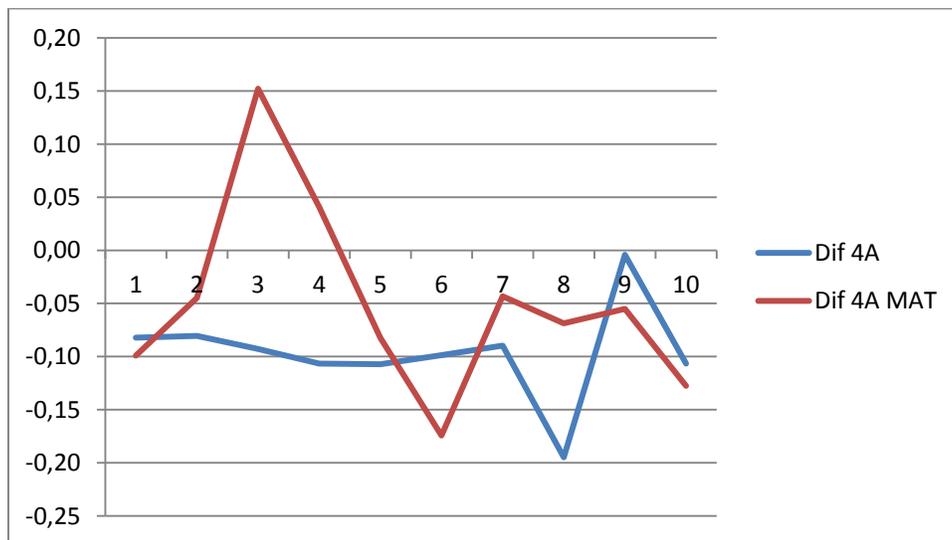


Figura 3.36 Comportamiento de la diferencia por los valores de insumo que se utilizan actualmente y los obtenidos por RNA del ventilador 4A.

### Capítulo III: Estudio del insumo de los ventiladores de tiro forzado con el uso de la inteligencia artificial.

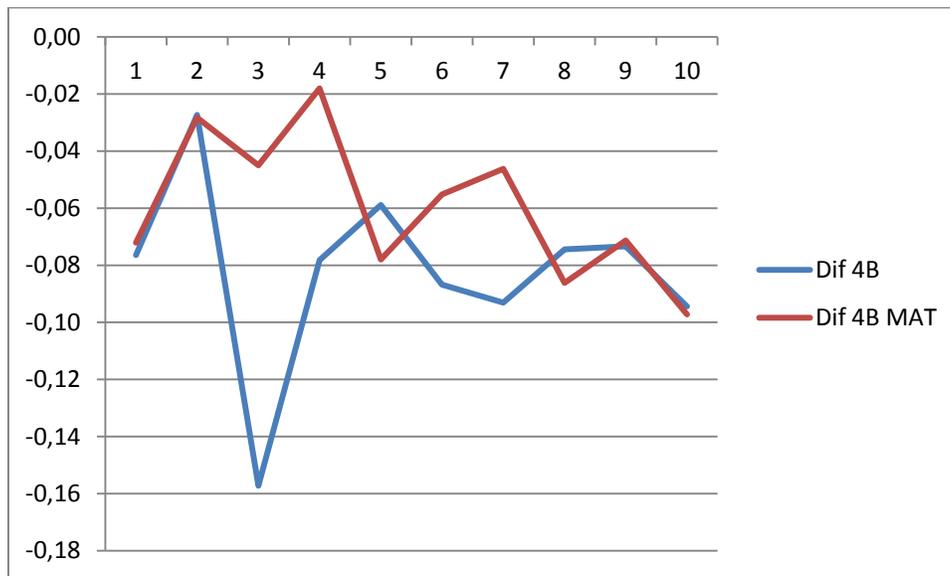


Figura 3.37 Comportamiento de la diferencia por los valores de insumo que se utilizan actualmente y los obtenidos por R.N.A del ventilador 4B.

Las figuras 3.36 y 3.37 muestran el comportamiento en el tiempo de la diferencia que existe entre el insumo pronosticado por el modelo de RNA y el insumo real de los V.T.F para la unidad 4, siendo estos los modelos menos exactos que se obtuvieron con la ayuda de la inteligencia artificial. Es menos eficiente porque los valores de la diferencia de los de los insumos obtenido en MATLAB casi siempre son mayores que los reales, pudiendo esto estar asociado a fueron pocos los parámetros de operación de los V.T.F que presentaban comportamiento parecido con el insumo para un mismo instante de tiempo, lo que pudo ser provocado por una mala recopilación de los datos o también por errores de los instrumentos de medición que se utilizaron para obtener estos parámetros.

### CONCLUSIONES PARCIALES III

1. Haciendo una comparación con los valores de insumo (Real y Planificado) que actualmente se utilizan en la ETE “Carlos M. de Céspedes” se pudo concluir que el insumo real generalmente está por encima del insumo planificado.
2. Se logró obtener un modelo en R.N.A para cada uno de los V.T.F de las unidades 3 y 4.
3. Los modelos en R.N.A permiten planificar y pronosticar a corto y mediano plazo el factor de insumo para los V.T.F, teniendo en cuenta solamente parámetros anteriores del sistema de aire para la combustión.
4. La comparación de la diferencia de los factores de insumo (Real y planificado) recogidos por la base de datos de la ETE “Carlos M. de Céspedes” y los valores obtenidos en la R.N.A se obtuvo como resultado que para el ventilador 3A es favorable la diferencia para el modelo de MATLAB en 0,115, para el 3B 0,10 también favorable para le modelos de MATLAB, pero para la unidad 4 se comportó en 0,05 para el ventilador A y 0,03 para el B, favorable para el modelo utilizado en la ETE actualmente.
5. Los modelos obtenidos en la unidad 4 por la RNA, no fueron lo suficientemente optomos para establecer una planificación o un pronóstico del comportamiento del insumo de los V.T.F de dicha unidad.

## CONCLUSIONES

### CONCLUSIONES

1. La Unidad 3 alcanzó la Generación Bruta más alta de 941403 MWh y el menor Factor de Insumo de 5,92 % en el 2004, en el 2009 fue la menor Generación Bruta con 372 261 MWh y el mayor Factor de Insumo de 7,8 %.
2. La Unidad # 4 alcanzó la Generación Bruta más alta de 960094 MWh en el 2010 y el menor Factor de Insumo de 5,52 % en el 2005, en el 2 008 fue la menor Generación Bruta con 175 383 MWh y el mayor Factor de Insumo de 6,97%.
3. El mayor valor de insumo registrado para la unidad 3 fue de 2,26 %.
4. El valor más alto que se registró para la unidad 4 fue de 3,04 %.
5. El aumento del insumo en los V.T.F está asociando directamente a la diferencia de presión en los conductos de aire y gas.
6. Se logró obtener un modelo en R.N.A para cada uno de los V.T.F de las unidades 3 y 4 que permite planificar y pronosticar el comportamiento del insumo para los V.T.F a corto y mediano plazo, con una regresión de  $R^2$  entre 0.85 y 0.90.
7. Haciendo una comparación con los valores de insumo (Real y Planificado) que actualmente se utilizan en la ETE “Carlos M. de Céspedes” se pudo concluir que el insumo real generalmente está por encima del insumo planificado.
8. La comparación de la diferencia de los factores de insumo (Real y planificado) recogidos por la base de datos de la ETE “Carlos M. de Céspedes” y los valores obtenidos en la R.N.A se obtuvo como resultado que dicha diferencia es menor siempre en los modelos de R.N.A, en el caso de la unidad 3 con valores medios de 0,115 y 0,10 para los V.T.F A y B respectivamente.
9. En los modelos obtenidos en RNA para la unidad 4, los ventiladores A y el B presentaron una diferencia entre el insumo planificado y el real de 0,05 y

## Conclusiones

---

0,03 respectivamente que favorece el modelo que se utiliza actualmente en la ETE.

## RECOMENDACIONES

### RECOMENDACIONES

1. Estudiar otros factores que pueden provocar sobreconsumo en los V.T.F como desgaste interno, desbalance de masa, desalinamiento.
2. Aumentar la muestra de parámetros en la unidad 4 para mejorar la correlación lineal del modelo de RNA y minimizar la diferencia entre lo planificado con el modelo utilizado en la empresa y el propuesto.
3. Utilizar en la práctica los modelos obtenidos en MATLAB, con el objetivo de comprobar si el resultado obtenido es el óptimo, para cargas variables.

## **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA

Cherkasski, V, M, (1986). *Bombas ventiladores compresores*. URSS: MIR MOSCU.

Circuitos de aire. (n.d.). . Retrieved from

[http://ocw.uniovi.es/file.php/13/1C\\_C12757\\_0910/04\\_GT06.pdf](http://ocw.uniovi.es/file.php/13/1C_C12757_0910/04_GT06.pdf).

Domech, Williams Francisco. (1978). *Caldera Japonesa HITACHI*. La Habana.

Mur González Osvaldo. (011 2). *Determinación de las causas del incumplimiento de las normas de insumo de la CTE " Carlos M. de Céspedes"*. Carlos Rafael Rodríguez.

Programa de Redes Neuronales. (n.d.). . Retrieved from

[http://webdelprofesor.ula.ve/economia/gcolmen/programa/redes\\_neuronales/programa\\_de\\_rn\\_s\\_.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/economia/gcolmen/programa/redes_neuronales/programa_de_rn_s_.pdf).

REDES NEURONALES. (n.d.). . Retrieved from

<http://www3.fi.mdp.edu.ar/meschino/Presentaciones/>.

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

Rodríguez Nogueira Dra Teresita, Landa García MSc Juan, & Vizcón Toledo Dr. Roberto. (n.d.).

Metodologías a considerar para la aplicación del mantenimiento por diagnóstico de los Calentadores de Aire Regenerativos de Centrales Termoeléctricas.