

Universidad del Bío Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Industrial

Profesor Guía:
Sr. Carlos Torres N.



**Modelo Matemático para Predecir el
Comportamiento del Silicio en el Proceso de
Obtención del Arrabio en el Departamento de
Altos Hornos en la Compañía Siderúrgica
Huachipato S.A.**

“Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Civil Industrial Mención Gestión”

Concepción, Noviembre 2007

Karina Sepúlveda Pino

Índice de Contenidos

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.....	9
1.1 ORIGEN DEL TEMA	9
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	10
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 ALCANCES O ÁMBITOS GENERALES	11
1.5 METODOLOGÍA PROPUESTA	11
1.6 DESCRIPCIÓN DE LA COMPAÑÍA SIDERÚRGICA HUACHIPATO	12
1.7 IDENTIFICACIÓN DE LA VISIÓN Y MISIÓN DE LA CSH S.A.....	13
1.7.1 Visión.....	13
1.7.2 Misión	13
1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SIDERÚRGICO	13
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ARRABIO EN LOS ALTOS HORNOS.....	15
2.1 OBJETIVO DEL PROCESO EN ALTOS HORNOS	15
2.2 SECCIÓN MATERIAS PRIMAS	15
2.2.1 Preparación de las Materias Primas.....	15
2.2.1.1 Mineral de Hierro	16
2.2.1.2 Coque Metalúrgico.....	17
2.2.1.3 Funciones del Coque.....	18
2.2.1.4 Óxidos de Calcio y Óxidos de Magnesio (CaO y MgO)	18
2.2.2 Proceso de Descarga	19
2.2.3 Reproceso de Materias Prima	19
2.2.4 Recuperación de Materia Primas	20
2.2.5 Bines de Producción	21

2.3 SECCIÓN ALTOS HORNOS.....	24
2.3.1 Descripción General del Proceso	24
2.3.2 Descripción de los Altos Hornos y sus Partes Principales.....	26
2.3.2.1 Altos Hornos	26
2.3.3 Partes Principales de los Altos Hornos.....	27
2.3.4 Carga de Materiales a los Hornos	28
2.3.6 Descripción de las Reacciones Principales	30
2.3.6.1 Proceso Interno del Horno	30
2.3.6.2 Zona Cohesiva.....	31
2.3.6.3 Zona Crisol – Toberas - Etalaje	31
2.3.6.4 Zona Frente a las Toberas	32
2.3.6.5 Zona de Reducción de los Óxidos.....	32
2.3.6.6 Primer Cuarto de la Cuba	33
2.3.7 Reducción de los Óxidos Principales	33
2.3.7.1 Zona Sobre la Isotherma de los 1200 °K.....	34
2.3.7.2 Reducción Indirecta de la Wustita	35
2.3.8 Productos que se obtienen de los Altos Hornos.....	36
2.3.8.1 Arrabio	36
2.3.8.1.1 El Silicio.....	37
2.3.8.2 Escoria.....	40
2.3.8.3 Polvillo y Gas de Alto Horno	41
CÁPITULO3: DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA	42
3.1 SERIE DE TIEMPO	42
3.1.1 Prueba de Estacionariedad	43
3.2 MODELOS DE RETARDOS DISTRIBUIDOS.....	46
3.2.1 Correlograma	46
3.2.1.1 La Función de Autocorrelación (Fac).....	47
3.2.2 La función de autocorrelación parcial (Facp).....	47
3.2.3 Función de Correlación Cruzada.....	47
3.3 TEST DE RESIDUOS	48

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	49
4.1 VARIABLES PRINCIPALES EN LOS ALTOS HORNOS	49
4.1.1 Variables a nivel de Carga	49
4.1.2 Variables a Nivel de Toberas	51
4.1.3 Variables del Estado Térmico del Horno	51
4.1.4 Variables de Análisis Químico del Arrabio.....	52
4.1.5 Variables de los Gases Topes.....	52
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	53
4.2.1 Análisis de Estacionariedad para el Silicio en el Alto Horno N°2.....	53
4.3 Procedimiento de Identificación de los Modelos.....	55
4.4 ANÁLISIS DE LAS SALIDAS	64
4.4.1 Salidas para el alto horno N°2.....	65
4.4.2 Salidas para el alto hornoN°1	68
CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN Y PRONÓSTICOS PARA EL COMPORTAMIENTO DEL SILICIO	72
5.1 VERIFICACIÓN.....	72
5.1.1 Modelo para el Alto Horno N°2.....	73
5.1.2 Modelo para el Alto Horno N°1	75
5.2 VALIDACIÓN.....	77
5.2.1 Grafico de Predicción para el Alto Horno N°2	78
5.3 TEST DE RESIDUOS	80
4.3.1 Test Residuos Alto Horno N°2.....	81
4.3.2 Test Residuos Alto Horno N°1.....	82
4.4 LA PREDICCIÓN DEL FUTURO	83
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
6.1 CONCLUSIONES	84
6.2 RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA	87

ANEXO A: MÉTODO DE LOS SEIS PUNTOS.....	89
ANEXO B: DEFINICIONES	90
ANEXO C: ESTACIONARIEDAD DE LAS VARIABLES	92
ANEXO D: CORRELACIÓN CRUZADA PARA EL ALTO HORNO N°1	99
ANEXO E: SEGUIMIENTO DEL SILICIO.....	103
ANEXO COMPLEMENTARIO: GRÁFICOS DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS.....	107

Índice de Figuras

Fig. 1.2: Diagrama Proceso Siderúrgico.....	14
Fig. 2.1: Descripción del Proceso de Descarga, Reproceso y Recuperación de las Materias Primas.	23
Fig. 2.2: Descripción del proceso en los Altos Hornos.	25
Fig. 2.3: Secuencia del Carguío de los Materiales a los Hornos	30
Fig. 4.1: Esquema Básico de las Variables Principales en los Altos Hornos.....	52
Fig. 4.2: Serie de Tiempo para el Silicio Alto Horno N°2	53
Fig.3.4: Modelo de Entrada $y(t) = k$ y Salida $y(t)$ de una variable en un tiempo t . .	55
Fig.4.4: Modelo de entrada y salida para los Altos Hornos	56
Fig. 4.6: Correlograma para el Silicio en el Alto Horno N°2.....	57
Fig. 4.9: Correlación Cruzada entre el Silicio y la Temperatura de Viento Insuflado Alto Horno N°2.....	61
Fig. 4.11: Correlación Cruzada entre la Razón Coque/ Mineral y el Silicio en el Horno N°2.	63
Fig. 4.12: Salida inicial para el Alto Horno N°2.....	65
Fig.4.13: Salida N° 1 para el Alto Horno N°2.....	66
Fig. 4.14: Salida N° 2 para el Alto Horno N°2.....	67
Fig. 4.15: Salida inicial para el Alto Horno N°1	68
Fig. 4.16: Salida N° 1 para el Alto Horno N°1	69

Fig. 4.17: Salida N° 2 para el Alto Horno N°1	70
Fig. 4.18: Salida N° 3 para el Alto Horno N°1	71
Fig. 5.1: Salida N° 2 para el modelo de comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2	73
Fig. 5.2: Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 2 y su Gráfico de Residual	74
Fig. 5.3: Salida N° 3 para el Alto Horno N°1	75
Fig. 5.4: Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 1 y su Gráfico de Residual	77
Fig. 5.5: Grafico de Predicción del Modelo del Silicio para el Alto Horno N°2	78
5.2.2 Grafico de Predicción para el Alto Horno N°1	79
Fig. 5.6: Gráfico de Predicción del Modelo del Silicio para el Alto Horno N°1	79
Fig. 4.7: Test de residuos para el Alto Horno N°2	81
Fig. 4.8: Test de residuos para el Alto Horno N°1	82

Índice de Tablas

Tabla 2.2: Toneladas de los materiales principales que se almacenan en sus respectivas canchas	20
Tabla 2.3: Asignación de los Materiales en sus correspondientes Bines, los cuales son transportados a sus respectivos Hornos.....	21
Tablas 2.4: Análisis Químico de los Materiales antes de ser ingresados a.....	22
Los Altos Hornos	22
Tabla 2.5: Cuadro Comparativo con las Principales diferencia de los Altos Hornos.	26
Tabla 2.6: Cuadro Comparativo de la Carga que es ingresada a los Altos Hornos...	29

Resumen

El siguiente proyecto tiene como finalidad diseñar un modelo matemático para predecir el comportamiento del Silicio en el proceso de obtención del arrabio en el departamento de Altos Hornos en la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.

La técnica de pronósticos que se utilizará en este proyecto será: Los Modelos Econométricos Dinámicos, más conocidos como Modelos de Retardos Distribuidos.

Los Modelos de Retardos Distribuidos tratan de explicar el comportamiento de una o más variables en función de la evolución de otras variables que se consideran explicativas.

Para lograr el propósito de este proyecto se realizó primeramente un estudio de la estacionariedad de las series de tiempo con el test de Dikey Fuller, ya que todas las variables del estudio tienen que ser estacionarias para poder realizar estos modelos, luego por medio de la función de autocorrelación y la función de correlación cruzada se realizó un análisis de como y cuánto se desfasa el silicio, y como es el comportamiento de las variables explicativas con respecto al silicio.

Posteriormente se realizaron y analizaron las salidas de los modelos, para finalmente por medio del test de residuos de L Jung Box demostrar por medio del correlograma que los residuos de los modelos obtenidos para los Altos Hornos son independientes, explicando así adecuadamente el comportamiento del silicio.

Se realizaron predicciones para los modelos escogidos por medio de un seguimiento para el comportamiento del silicio, por medio del cual se validó el modelo escogido. Llegando a pronosticar un modelo de retardos distribuidos de orden uno, RD (1), para el comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2, y un modelo de retardos distribuidos de orden tres, RD (3), para el comportamiento del silicio en el Alto Horno

A continuación se presentan los siguientes capítulos que se abordarán en este trabajo:

Capítulo I

Aquí se describe el porqué se quiere realizar un modelo estadístico predictivo para el comportamiento del Silicio en el arrabio. Luego se realiza una breve reseña de la Compañía Siderúrgica Huachipato.

Capítulo II

Se describe el proceso de obtención de arrabio en los Altos Hornos, los cuales se encuentra divididos en dos secciones: Sección Materias Primas y Sección Altos Hornos.

Capítulo III

Se presenta un análisis estadístico completo de comportamiento del silicio, y las variables que influyen en dicho comportamiento.

Capítulo IV

Se realiza una verificación y una validación de los modelos elegidos para cada Alto Horno, y se realiza un test de residuos para comprobación de éstos.

Capítulo V

Se presentan las conclusiones más relevantes e importantes del estudio, y algunas recomendaciones personales.

Capítulo 1: Antecedentes Generales

1.1 Origen del Tema

El tema surge en el Departamento de Altos Hornos de la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. por mejorar la obtención del arrabio, el cual es entregado al Departamento de Acería y Colada Continua obteniendo un acero de mejor calidad.

Lo que se busca es un modelo más eficiente de estimar el contenido de silicio en el arrabio, ya que el silicio es un buen indicador del estado térmico de los Altos Hornos y uno de los elementos más importantes y fundamentales en la formación del proceso de obtención de arrabio.

Uno de los objetivos principales de los Altos Hornos es mantener el porcentaje de silicio en el arrabio lo más próximo a un valor esperado de 0,5%, ya que el problema fundamental que ocasiona el silicio en los Altos Hornos, es cuando se produce un calentamiento o enfriamiento de estos, (% de silicio superior o inferior al valor esperado), ocasionando una alteración en la distribución del carguío, es decir la carga puede permanecer detenida en alguna parte del horno, por lo que se puede producir una solidificación de los materiales que van descendiendo, provocando una distorsión química del arrabio.

Si el % de silicio es superior al valor esperado significa un aumento de temperatura y/o un mayor consumo de coque y minerales en los Altos Hornos. Por otra parte un % de silicio bajo, si bien produce una disminución tanto de temperatura como del consumo de combustible en los Altos Hornos, implica una situación de riesgo por eventuales enfriamientos de éstos, frente a cualquier tipo de perturbaciones.

1.2 Justificación del Tema

El arrabio es la materia prima en el Departamento de Acería y Colada Continua, el cual al ser utilizado debe cumplir con ciertas características de calidad como condición de temperatura y con ciertos % de elementos químicos.

El silicio es el principal problema de acería ya que si bien este elemento es importante para el proceso, es fuertemente exotérmico es decir aporta mucha energía a los convertidores, a los cuales se les agrega chatarra para controlar la temperatura en el proceso, ya que esta alcanza aproximadamente los 1650°C.

Es por eso que se ha llegado a un común acuerdo entre el Departamento de Altos Hornos y el Departamento de Acería y Colada Continua en tener un silicio con un mínimo de 0,35% y un máximo de 0,65%, con una meta o valor esperado de 0,50%.

El modelo predictivo para estimar el comportamiento del silicio que se ocupa en el Departamento de Altos Hornos es un modelo estadístico llamado “Modelo de los Seis Puntos”. Para mayor detalle consultar [Anexo A: Método de los Seis Puntos](#).

El cual no está siendo efectivo y mucho menos predictivo. Es por eso que el Departamento necesita contar con un nuevo modelo predictivo más eficiente que cumpla con las condiciones de especificación esperadas. Para mayor detalle consultar [Anexo B: Definiciones](#).

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Obtención de un Modelo Matemático para Predecir el Comportamiento del Silicio, en el Proceso de Obtención de Arrabio en el Departamento de Altos Hornos en la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A..

1.3.2 Objetivos Específicos

- ❖ Identificar el tipo de modelo adecuado para cada Altos Hornos.
- ❖ Identificar las variables relevantes que influyen en el comportamiento del silicio.
- ❖ Conocer la ecuación matemática asociada a la predicción del silicio en cada uno de los Altos Hornos.

1.4 Alcances o Ámbitos Generales

- ❖ El Proyecto de título se llevó a cabo a partir del mes noviembre del año 2006 hasta el mes de junio del año 2007, desarrollado en la Empresa y hasta el mes de septiembre en la Universidad del Bío-Bío.
- ❖ El Tema es dirigido por el profesor guía Sr. Carlos Torres Docente del Departamento de Ingeniería Civil Industrial de la Universidad del Bío-Bío y por un Co- Guía el Sr. Sergio Contreras Profesor y Doctor en Estadística, del Departamento de Matemáticas de la Universidad del Bío-Bío.
- ❖ La Metodología a seguir se aplicó en el Departamento de Altos Hornos, este estudio fue propuesto y guiado por Don Bernardino Henríquez, Superintendente del Departamento de Altos Hornos y por Don Pedro Contreras, Ingeniero en Producción. Los cuales serán responsables de la supervisión.

1.5 Metodología Propuesta

Para la realización de este proyecto fue necesario primero conocer todo el procedimiento de obtención del arrabio, desde la llegada de las materias primas al muelle, hasta la obtención de este en el patio de colada de los altos hornos, para ello se realizaron salidas a terreno durante un período aproximado de un mes y medio,

luego se procedió a recopilar toda la información de datos, los cuales fueron de un año (2006).

Se aplicaron herramientas matemáticas para encontrar posibles soluciones al problema en cuestión, y en particular se utilizó el software estadístico Ewiews para poder llegar a generar un modelo que ayude al Departamento de Altos Hornos a entregar un arrabio con un óptimo contenido de silicio.

1.6 Descripción de la Compañía Siderúrgica Huachipato

La Compañía Siderúrgica Huachipato esta ubicada en Avenida Gran Bretaña 2910. Situada en la Bahía de San Vicente, Km. 14, al noroeste de la ciudad de Concepción, Octava Región, Chile. Comenzó a ser construida a mediados de 1947, siendo oficialmente inaugurada el 25 de Noviembre de 1950.

Siderúrgica Huachipato es una "planta integrada", esto quiere decir que a partir de minerales de hierro fabrica acero laminado, para utilización directa o para transformaciones posteriores.

Fig. 1.1: Vista de la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.



1.7 Identificación de la Visión y Misión de la CSH S.A.

1.7.1 Visión

"Liderar en Chile el negocio del acero en todas sus formas y desarrollar nuevas oportunidades en el área de tecnologías siderúrgicas".

1.7.2 Misión

"Producir y proveer productos y soluciones en acero de excelente calidad y servicio, que superen las expectativas de sus clientes, privilegiando el desarrollo del recurso humano como factor determinante del éxito. Desarrollar ventajas competitivas, que generen rentabilidad, a través de la innovación de sus procesos mediante el uso de tecnologías sustentables".

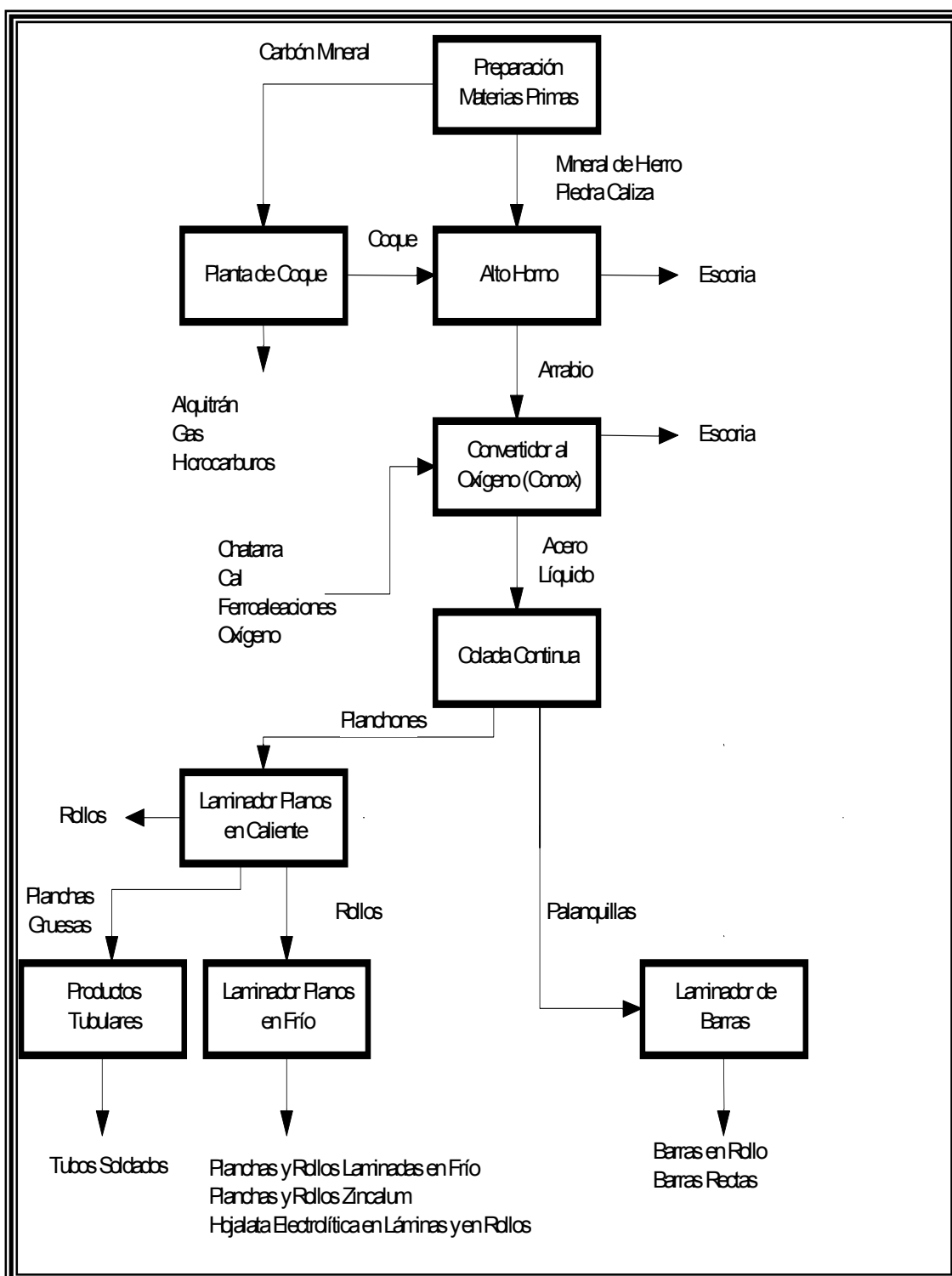
1.8 Descripción del Proceso Siderúrgico

La Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. es una industria integrada, que produce arrabio por reducción del mineral en los Altos Hornos; transforma ese arrabio en acero líquido en la Acería del que obtiene planchones y palanquillas de colada continua, (productos semi-terminados).

Posteriormente estos productos los laminan para entregar al mercado productos de mayor valor agregado, tales como barras, planchas laminadas en caliente y frío, tubos, planchas zincalum y hojalata.

Fig. 1.2: Diagrama Proceso Siderúrgico

Fuente: Departamento de Altos Hornos



Capítulo 2: Descripción del proceso de obtención de arrabio en los Altos Hornos.

2.1 Objetivo del Proceso en Altos Hornos

Satisfacer los requerimientos de arrabio de la Planta, haciendo un uso óptimo de las instalaciones y de la tecnología disponible, para entregar oportunamente a la acería un producto dentro de una cierta especificación.

El proceso en Altos Hornos se divide en dos secciones que son:

- ❖ Sección Materias Primas
- ❖ Sección Hornos

2.2 Sección Materias Primas

2.2.1 Preparación de las Materias Primas

Esta etapa incluye la descarga, pesaje y almacenamiento de las materias primas necesarias para la fabricación del acero, que básicamente son:

- Mineral de Hierro (granzas y pellets).
- Caliza.
- Carbón Mineral.

Tabla 2.1: Procedencia de las Principales Materias Primas.

Fuente: Propia

Materias Primas	Origen	Punto de Embarque
Mineral de hierro (pellets). III Región	Yacimiento El Algarrobo Planta Huasco	Puerto Huasco
Mineral de hierro (granzas). Hematita III Región	Yacimiento El Algarrobo	Puerto Huasco

Magnetita IV Región	Yacimiento El Romeral	Puerto Guayacán
Caliza. XII Región	Isla Guarello	Puerto Guarello
Carbones Importados	Canadá Australia	Vancouver Gladstone Haypoint

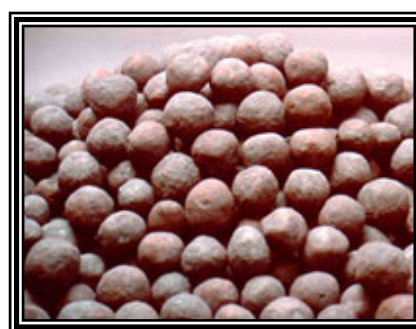
2.2.1.1 Mineral de Hierro

Se utilizan 2 tipos de Minerales de Hierro, las Granzas y los Pellets Básicos, ambos producidos íntegramente por CMP, empresa del Grupo CAP. En la forma de Pellets de 5 a 20 mm de diámetro producidos en la planta de Pellets de Huasco, a partir de concentrados del mineral el Algarrobo.

Se caracterizan por tener un 65% de Fe en la forma de Hematita (Fe_2O_3) y de 2 a 3% de SiO_2 (sílice) más Al_2O_3 (alúmina), granzas harneadas provenientes del mineral el Romeral con un 62% de Fe presente como Magnetita (Fe_3O_4) y con un 6 % de SiO_2 más Al_2O_3 .



Granza de Mineral Romeral



Pellets

2.2.1.2 Coque Metalúrgico

Los carbones importados se someten a un proceso de destilación seca que lo transforma en coque metalúrgico. Este proceso se realiza en la Planta de Coque, la cual cuenta con 58 hornos.

La coquificación del carbón mineral deja un subproducto, denominado gas coque de un alto poder calorífico (aprox.5000 Kcal.), que es utilizado como combustible en algunos procesos de la industria.

Con una composición de 90% de C, 10% de cenizas y 0.5% de S que genera la mayor parte del gas reductor y el calor necesario para la reducción y fusión de los minerales. El coque es cargado al horno en trozos de 2 a 8 cm.

La característica principal de este material, es que es el único utilizado en los Altos Hornos que se puede mantener en estado sólido y permitir el flujo en contracorriente, entre los gases y los sólidos (el gas se distribuye y penetra en las capas de mineral).



2.2.1.3 Funciones del Coque

- ❖ El coque actúa como gas reductor.
- ❖ El coque permite la permeabilidad de la carga.
- ❖ El coque aporta calor para las reacciones de reducción y para la fusión del material reducido y la escoria.
- ❖ El coque se utiliza en la carburación del Arrabio.

2.2.1.4 Óxidos de Calcio y Óxidos de Magnesio (CaO y MgO)

Cuya función es lograr la fusión de la sílice y alúmina, presente en la ganga de los minerales y en la ceniza del coque produciendo una escoria fluida de bajo punto de fusión. El CaO se carga incorporado en los Pellets y principalmente en la forma de caliza (CaCO_3).



Caliza

En el sistema de manejo de materias primas se pueden distinguir tres procesos: descarga, reproceso y recuperación, los cuales pueden ocurrir en forma simultánea.

2.2.2 Proceso de Descarga

Se inicia en el muelle con la llegada de los barcos que contienen las materias primas, donde son descargadas mediante grúas que se introducen a las bodegas de éstos. Para este efecto existen 2 torres de descarga, las que entregan el material a sus propias tolvas que alimentan un sistema de correas transportadoras.

Si el material que se descarga es carbón, es transportado hacia las canchas de acopio (sector norte) donde se encuentra la planta de coque.

Si los materiales descargados son hierro, pellets o caliza son llevados a canchas de almacenamiento primario (L - Sur) donde son apilados con una máquina llamada *Stacker*. Si el mineral es manganeso, es descargado por las correas a una tolva, desde donde es retirado por camiones hacia otros puntos de almacenamiento.

2.2.3 Reproceso de Materias Prima

Consiste en recuperar el material que se encuentra almacenado en las canchas de almacenamiento primario (mineral de hierro, pellet y caliza) y llevarlo hacia las canchas de consumo, que son canchas donde se encuentra el material listo para alimentar a los Altos Hornos o para entregarlo a demandantes externos.

El material es tomado por los cargadores frontales desde la cancha de almacenamiento primario y depositado en las tolvas móviles que mediante sus vibradores alimentan las correas que transportarán el material hacia los harneros (si corresponde) y luego a las canchas de consumo. Existen 12 canchas de homogeneización o de consumo.

Las distintas materias primas que se almacenan en canchas de almacenamiento primario alimentan a las canchas de consumos mediante un sistema de correas transportadoras, chutes de traspaso y stackers.

Todas las correas transportadoras usadas, tanto en el proceso de descarga como en el reproceso, son aéreas.

Tabla 2.2: Toneladas de los materiales principales que se almacenan en sus respectivas canchas.

Fuente: Propia

Cancha	Material	Toneladas
1	Pellets	6.000
2	Romeral(mineral de hierro)	8.800
3	Romeral(mineral de hierro)	8.800
4	Romeral(mineral de hierro)	8.800
5	Caliza	6.000
6	Caliza	6.000
7	Pellets	5.000
8	Caliza	8.000
9	Pellets	6.000
10	Pellets	6.000
11	Pellets	6.000
12	Caliza	10.000

2.2.4 Recuperación de Materia Primas

Este proceso de recuperación de materias primas para el consumo de los Altos Hornos se utiliza la máquina denominada reclaimer, que permite recuperar el material desde las canchas de consumo hacia las correas subterráneas, que conducen el material hasta los bins de consumo de los Altos Hornos.

A los bins también se les entrega otras materias primas, las que no se encuentran almacenadas en las canchas de consumo. Estas materia primas son denominadas misceláneas (mineral de manganeso, cuarzo, coque nuez y scrap), las que se encuentran almacenadas en las proximidades del Alto Horno N° 2.

2.2.5 Bines de Producción

Son recipientes donde se depositan las materias primas (provenientes de las canchas de consumo). Cada materia prima tiene asignado su propio bin, los que luego alimentarán a los Altos Hornos en el proceso de producción. Sus contenidos se presentan a continuación:

Tabla 2.3: Asignación de los Materiales en sus correspondientes Bines, los cuales son transportados a sus respectivos Hornos.

Fuente: Propia

Horno	Bin	Material
1	1	Cuarzo
1	2	Manganeso
1	3	Coque Arveja
1	4	Caliza
1	5	Scrap
1	6	Pellets
1	7	Romeral (mineral de hierro)
1	8	Romeral (mineral de hierro)
1	9	Pellets
1	10	Pellets
1	11	Pellets
2	12	Vacio
2	13	Coque Nuez
2	14	Cuarzo
2	15	Manganeso
2	16	Romeral (mineral de hierro)

2	17	Romeral (mineral de hierro)
2	18	Caliza
2	19	Pellets
2	20	Pellets
2	21	Pellets

Antes de transportar los materiales a los respectivos hornos, a cada bin se le hace un respectivo análisis químico, en los cuales cada material debe cumplir ciertas especificaciones de insumos antes de ser ingresados a los hornos. Las cuales se darán a conocer en la siguiente tabla:

Tablas 2.4: Análisis Químico de los Materiales antes de ser ingresados a Los Altos Hornos

Fuente: Propia

Material	MgO	C	Na ₂ O + K ₂ O
Romeral (mineral de hierro)	SE	N	0.21% máx.
Pellets	SE	N	0.25% máx.
Caliza	SE	N	SE
Coque	SE	SE	SE
Cuarzo	SE	N	0.10% máx
Coquecillo	SE	SE	SE
Scrap	SE	N	0.20 % máx.
Manganeso	0.70 % - 0.99%	N	SE

Material	S	P	Mn
Romeral (mineral de hierro)	0.085% máx.	0.160% máx.	N
Pellets	0.030 % máx	0.050 % máx.	N
Caliza	1.25% máx.	0.05 % máx.	27% min.
Coque	SE	SE	SE
Cuarzo	N	N	N
Coquecillo	0.5% máx.	SE	N
Scrap	SE	SE	N
Manganeso	0.010% - 0.030%	0.010% - 0.030%	N

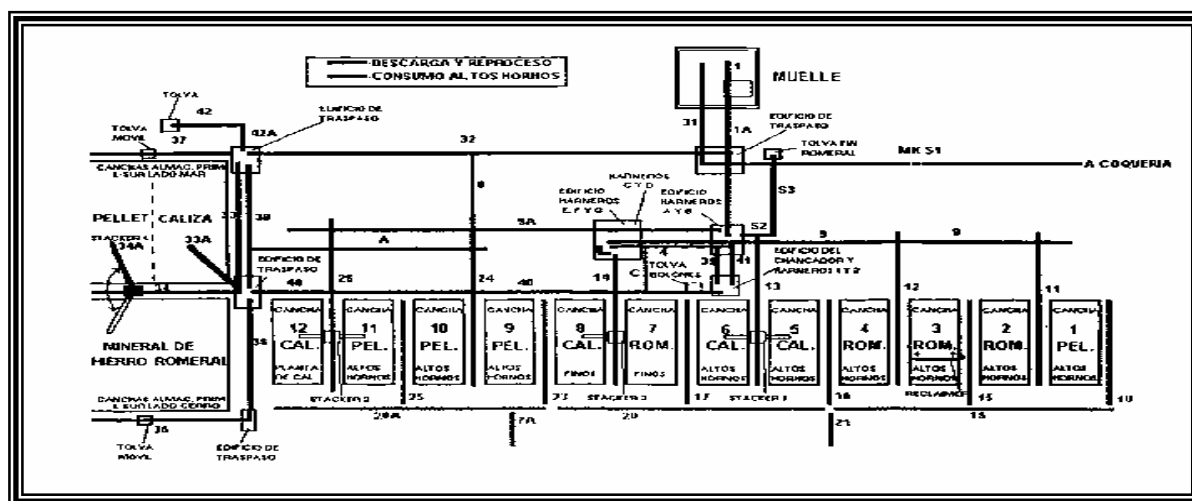
Material	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
Romeral (mineral de hierro)	62 % min.	7% máx.	2% máx.	SE
Pellets	65 % min.	3.5% máx.	1.25% máx.	SE
Caliza	SE	SE	SE	SE
Coque	SE	SE	SE	SE
Cuarzo	SE	96% min.	SE	SE
Coquecillo	SE	SE	SE	SE
Scrap	65 % min	SE	SE	SE
Manganeso	0.5 % - 1 %	1 % - 2.5 %	0.5 % - 1 %	52 % - 55 %

De la tabla anterior se puede apreciar el análisis químico de los materiales que serán ingresados a los Altos Hornos respectivos, La sigla (N) significa simplemente que el material no posee en su contenido dicho elemento La sigla (SE) significa sin especificación, es decir no se requiere un contenido máximo o mínimo del elemento.

Antes de pasar a la segunda sección Altos Hornos se mostrará un layout del proceso descrito anteriormente, descarga, reproceso y recuperación de las materias primas hasta llegar a sus respectivos bins.

Fig. 2.1: Descripción del Proceso de Descarga, Reproceso y Recuperación de las Materias Primas.

Fuente: Departamento de Altos Hornos



2.3 Sección Altos Hornos

La Sección Altos Hornos dispone de dos unidades de producción de arrabio, o sea dos Altos Hornos. Estos desarrollan sus procesos en forma independiente.

Existe una unión sólo en la salida de los gases con destino a los departamentos que usan el gas: Departamento de Combustible y Coquería.

2.3.1 Descripción General del Proceso

Las materias primas del proceso son granzas y pellet de mineral de hierro, coque como agente reductor y caliza como fundente y escorificante.

Estas se transportan a la zona superior del horno y se cargan a través del tragante, descendiendo por la zona de cuba, la carga llega al etalaje del Alto Horno.

En la parte superior del horno, cuya altura es aprox. de 30 metros, contiene respiraderos para los gases escape (pantalones), y un par de tolvas redondas, cerradas por válvulas en forma de campana, por las cuales se introduce la carga en el horno.

Junto a cada Alto Horno hay estufas de precalentamiento de aire, este aire precalentado a 1050°C, se insufla al horno a través de las toberas para quemar el coque.

El aire con los combustibles líquidos y el coque liberan la energía necesaria para fundir la masa metálica. A su vez, producto de la combustión del coque, se produce monóxido de carbono, el cual al ascender con el aire a través de las capas de óxido de hierro actúa como agente reductor captando oxígeno y reduciendo los óxidos a hierro metálico.

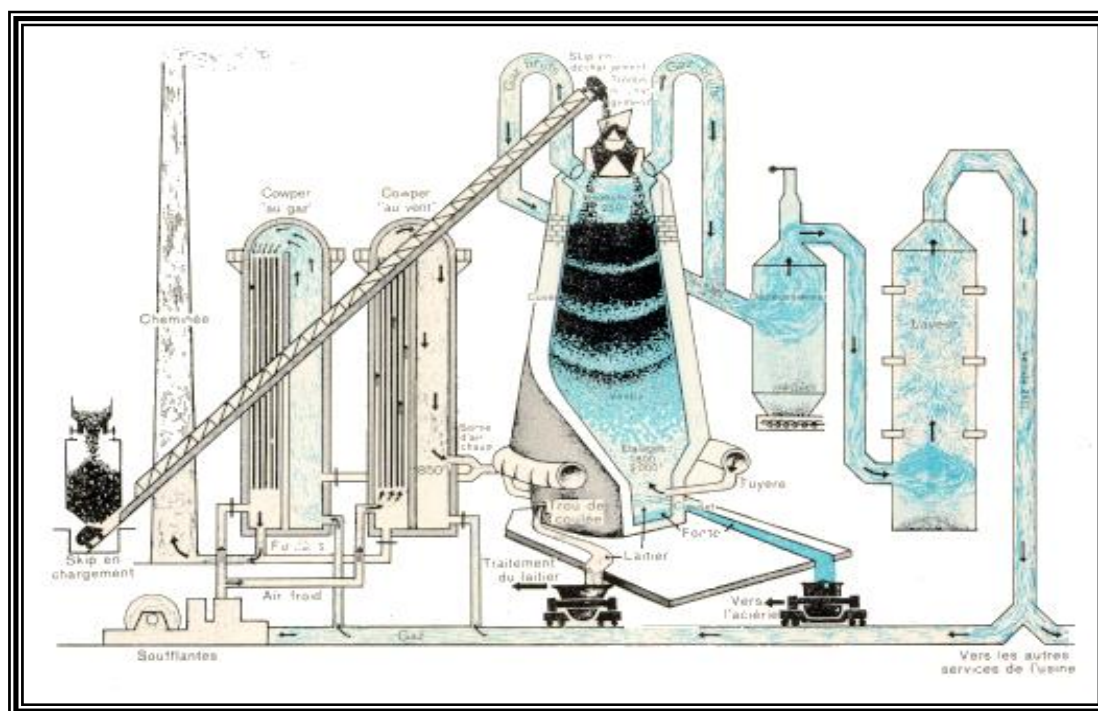
Específicamente, el ablandamiento y la fusión de la carga, se produce en la zona de la cuba y etalaje, zona desde la cual el hierro fundido gotea al crisol del horno.

El hierro fundido o arrabio, que se extrae del Alto Horno cada dos horas y a una temperatura entre 1400 a 1500°C, con un contenido de 4.2 a 4.8 % de carbono, 0.35 a 0.65 % silicio, 0.090 % máx. de azufre. Escurriendo por las canales del patio de colada y se acumula finalmente en una cuchara torpeda.

La escoria del proceso, obtenida por acción de la caliza, se convierte en cal la cual se combina con azufre y otras impurezas. Se separa naturalmente del arrabio por su menor densidad cayendo a un foso donde es apagada y granulada por un chorro de agua. Esta escoria de los Altos Hornos es importante materia prima para la industria del cemento.

Fig. 2.2: Descripción del proceso en los Altos Hornos.

Fuente: Departamento Altos Hornos



2.3.2 Descripción de los Altos Hornos y sus Partes Principales

2.3.2.1 Altos Hornos

El Alto Horno es un horno de reducción que emplea fundamentalmente coque, para reducir hierro a partir de sus óxidos. Además el Alto Horno puede considerarse como un intercambiador de calor y materia en contracorriente: el calor se transfiere desde el gas hacia la carga, y la materia (oxígeno) desde la carga hacia el gas. El gas asciende por el horno mientras la carga y el coque descienden. El gas transfiere calor hacia la carga y, simultáneamente, el oxígeno se transfiere desde la carga de mineral hacia el gas.

Tabla 2.5: Cuadro Comparativo con las Principales diferencia de los Altos Hornos.

Fuente: Propia

	Alto Horno 1	Alto Horno 2
Diseño	Brassert 1950	Koppers 1966
Capacidad nominal	1650 ton/día	1800 ton/día
Nº de Toberas	12	14
Volumen de trabajo	755 m ³	881 m ³
Purificación primaria de gases	Torre Lavadora	Torre Lavadora
Purificación secundaria de gases	Torre Lavadora	Torre Lavadora
Nº de recuperadores de calor	3	3
Inyección de combustible	Petróleo	Alquitrán
Operación de estufas	Manual	Automático

2.3.3 Partes Principales de los Altos Hornos

En ellos podemos distinguir cinco secciones que serán descritas a continuación:

❖ **Tragante**

Es la parte superior del Alto Horno (sector cilíndrico), donde se produce la distribución del carguío.

Posee un recubrimiento interior de planchas resistentes al desgaste, con lo que se evita un excesivo desgaste de las paredes por la acción del choque y roce de la carga al caer al interior del horno, desde la campana grande.

A través de los pantalones circulan los gases de Alto Horno con destino a los procesos de limpieza en seco y húmedo.

❖ **Cuba**

Es un tronco de cono superior que alcanza su máximo diámetro en la parte inferior de la cuba del horno y que se va ensanchando desde el tragante.

Esta forma permite un fácil descenso de la carga a medida que se expande, debido al aumento de temperatura comunicado por los gases reductores que circulan en contracorriente.

❖ **Vientre**

Parte de mayor diámetro del horno que permite la unión del cono superior (cuba) con el cono inferior (etalaje), actúa de regulador en el descenso de la carga. En esta zona parte de los materiales comienzan a fundirse.

❖ **Etalaje**

Tronco de cono inferior que llega hasta la zona de las toberas. En esta zona ocurre una reducción del volumen útil del horno con el objeto de acompañar a la contracción derivada de la fusión parcial de la carga y de permitir que la pared refractaria soporte el peso del material almacenado en la cuba.

Al final del etalaje se sitúan las toberas a través de las cuales se inyecta aire precalentado (viento caliente que proviene de las estufas) para producir la gasificación del coque.

❖ **Crisol**

Es un depósito cilíndrico de carbono en donde se acumulan los materiales fundidos (arrabio y escoria). Al nivel de toberas se mantiene la refrigeración del crisol (duchas) en perfectas condiciones para evitar diferencias de temperatura que pueden significar un desgaste.

2.3.4 Carga de Materiales a los Hornos

Existe un programa en el sistema de pesaje, donde los materiales se van retirando de los diferentes bins, por medio de carros romana, los materiales son cuidadosamente pesados y luego cargados en carros skip, que los llevan al tope del horno. Todos los materiales son previamente procesados antes de ser cargados.

Los minerales, caliza son chancados para darles un tamaño adecuado de fácil reducción, fusión y permeabilidad en el horno. El coque es harneado, evitando así que se cargue coque demasiado pequeño, asegurando que el coque llegue al nivel de toberas con un tamaño grande para usarlo en la reducción directa.

Tabla 2.6: Cuadro Comparativo de la Carga que es ingresada a los Altos Hornos.

Fuente: Propia

Componentes	Alto Horno N°1	Alto Horno N°2
Mineral de hierro Romeral (kg/carga)	5090	6120
Mineral de hierro Romeral (kg/carga)	9060	-
Pellet(kg/carga)	14150	24490
Mineral total	28300	30610
Coque (kg/carga)	8360	9200
Caliza(kg/carga)	2240	1850
Coquecillo(coque arveja)	400	-
Coquecillo (coque nuez)	-	300
Cuarzo(kg/carga)	180	250
Manganeso(kg/carga)	400	450
Scrap(kg/carga)	250	-
Tiempo entre coladas (min.)	60	50
Combustible (kg/min.)	min38–max44	min43-max 49
T. del Viento Insuflado(°C)	min1085-max1100	min1080-max1095
V. del Viento Insuflado (m3/min.)	1230	1530

Este proceso se realiza las 24 horas del día, a menos que éste en mantención, se produzca alguna falla del horno o por una parada de éste. Para tal efecto estas paradas se realizan en forma programada cada 15 días en forma alternada.

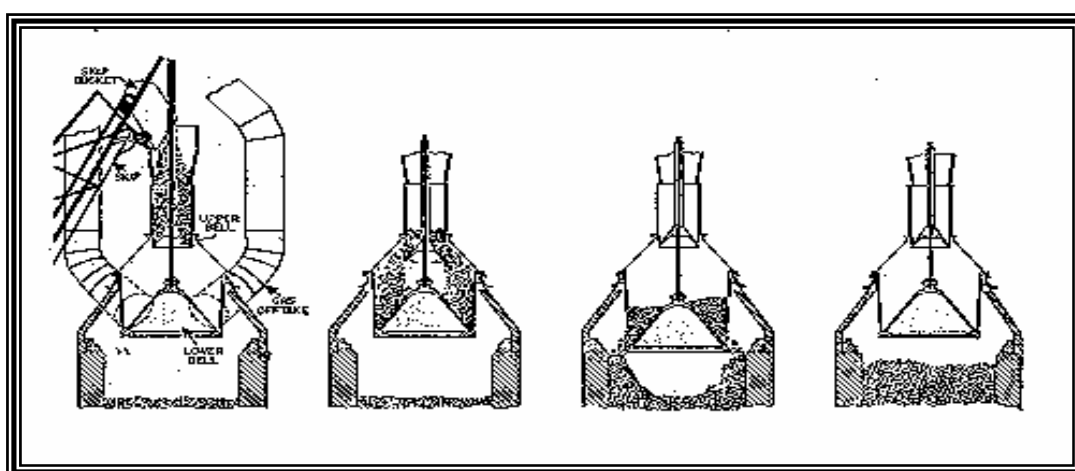
2.3.5 Ciclo de Carga

Se denomina ciclo de carga a la secuencia de carguío que ingresa a los hornos y esta compuesto de dos partes:

la primera está formada por 4 skip de coque y la segunda esta formada también por 4 Skip los cuales contienen mineral de hierro, pellets, caliza, y otros materiales (misceláneos) que son el cuarzo, manganeso, coquecillo y scrap (CCCC / MPPF).

Fig. 2.3: Secuencia del Carguío de los Materiales a los Hornos

Fuente: Departamento Altos Hornos



2.3.6 Descripción de las Reacciones Principales

2.3.6.1 Proceso Interno del Horno

En el proceso interno del horno ocurren reacciones por las cuales va descendiendo la carga que se describen a continuación:

El O_2 del viento caliente al entrar por las toberas reacciona con el carbono del coque. El carbono se quema parcialmente formado anhídrido carbónico (CO_2), produciendo altas temperaturas al generar calor $C + O_2 = CO_2$ (Reacción Exotérmica). Al aumentar la temperatura (1800-2500 °C), y en presencia de más carbono, este CO_2 penetra más en el horno transformándose totalmente en

monóxido de carbono (CO) con lo cual va a ocurrir $C + CO_2 = 2CO$ (Reacción Endotérmica).

Junto con la formación de monóxido, el carbono desintegra el vapor de agua, formando hidrógeno $H_2O + C = H_2 + CO$. El gas producido asciende por la columna sólida del horno donde se encuentra con el mineral el cual reacciona con los óxidos de hierro.

El monóxido de carbono (CO) y muy en especial el H_2 tienen la particularidad de extraer el O_2 de los óxidos y oxidarse con ayuda de él a anhídrido carbónico (CO_2) y agua (H_2O). Transformándose los óxidos de hierro ($Fe_2O_3 - Fe_3O_4 - FeO$) en hierro.

2.3.6.2 Zona Cohesiva

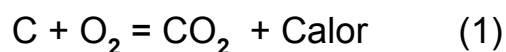
Formada por capas alternadas de coque y de mineral y caliza ablandados y fundidos su forma de U invertida y la presión bajo ella tienden a soportar la carga del horno. Las capas de coque permiten distribuir radialmente el gas reductor a través del horno.

El principal proceso físico-químico es la fusión del metal y la escoria. Cualquier óxido de hierro presente, será reducido durante su descenso a través del percolador de coque.

2.3.6.3 Zona Crisol – Toberas - Etalaje

Casi todo el material sólido que está en esta zona es coque. El arrabio líquido y la escoria percolan a través del coque hacia el crisol.

Los gases desde las toberas ascienden a través de la zona de coque activo, transfiriendo calor al coque descendente y fundiendo el hierro y la escoria.



2.3.6.4 Zona Frente a las Toberas

El ingreso a alta velocidad del viento, crea frente a cada tobera una zona o bolsón de gas, conocido como "Raceway" y rápidamente consume el coque del frente de cada tobera.

Los "Raceway" están limitados por el frente, por los lados y por debajo por regiones firmes de trozos de coque. Para mayor detalle consultar [Anexo 2: Definiciones](#).

También están limitados por arriba por trozos de coque, pero compactados libremente debido al rápido ascenso del gas entre las partículas.

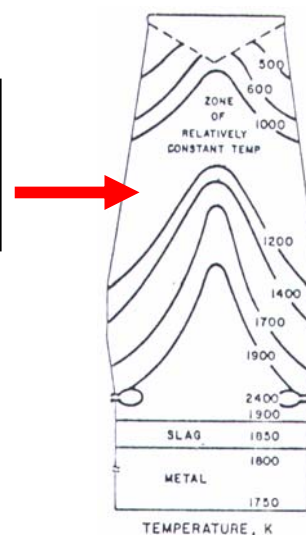
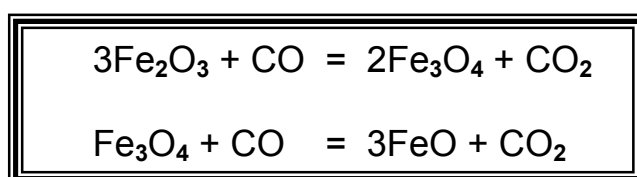
El principal proceso físico-químico de esta zona es la transferencia de calor desde los gases a las piezas descendentes de coque y a las gotas de arrabio y escoria.

2.3.6.5 Zona de Reducción de los Óxidos

El proceso presenta cambios de fases a medida que el mineral y el coque descienden a través de su estructura.

2.3.6.6 Primer Cuarto de la Cuba

El CO desarrollado en la Zona de Wustita – Fe es utilizado para la reducción de Óxidos superiores (hematita y magnetita) a Wustita. En esta zona el gas reductor toma contacto con la Hematita (Fe_2O_3) y se genera una zona de óxidos mixtos.



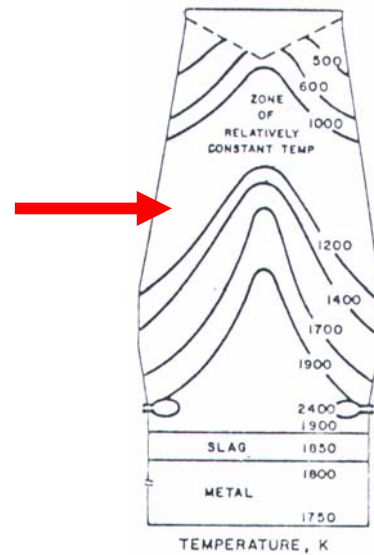
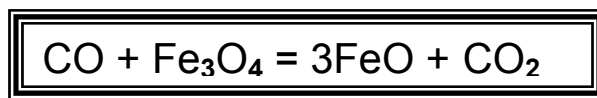
En esta zona la temperatura de los gases desciende rápidamente, ocurre una evaporación de la humedad, y se producen reacciones de reducción endotérmicas, las cuales van generando monóxido de carbono.

2.3.7 Reducción de los Óxidos Principales

En esta zona el gas ascendente demasiado pobre en CO para reducir la FeO , Pero es lo suficientemente energético para reducir magnetita a wustita.

Se crea región vertical donde los óxidos superiores (hematita y magnetita) son reducidos a wustita, y donde el gas no es capaz de reducir cantidades suficientes de wustita a Fe.

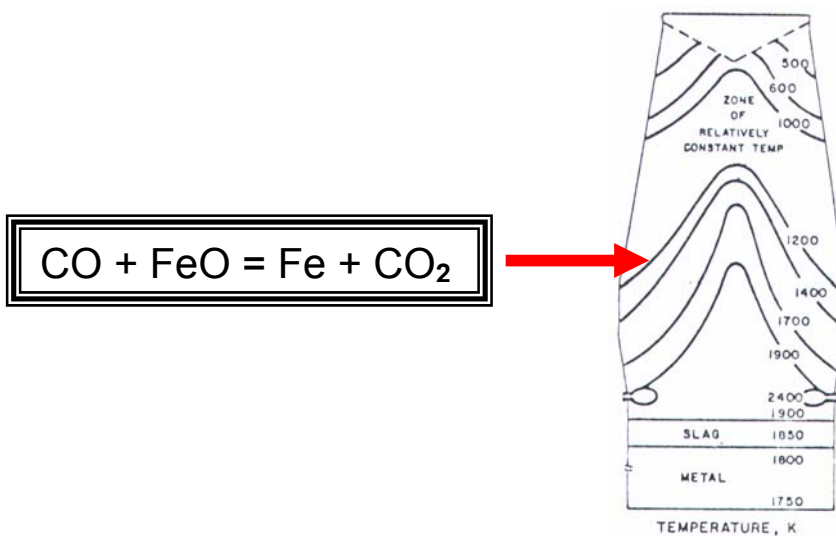
Restricción de los óxidos superiores a una pequeña zona cerca del tope del horno (primer cuarto de la cuba), que tiene solo el espesor suficiente para que su grado de producción de wustita sea igual al grado de reducción de Wustita en la zona inferior del horno.



La región donde el material férrico es virtualmente todo Wustita (FeO) es conocida como "Zona de Reserva Química" y es también una zona de temperatura constante.

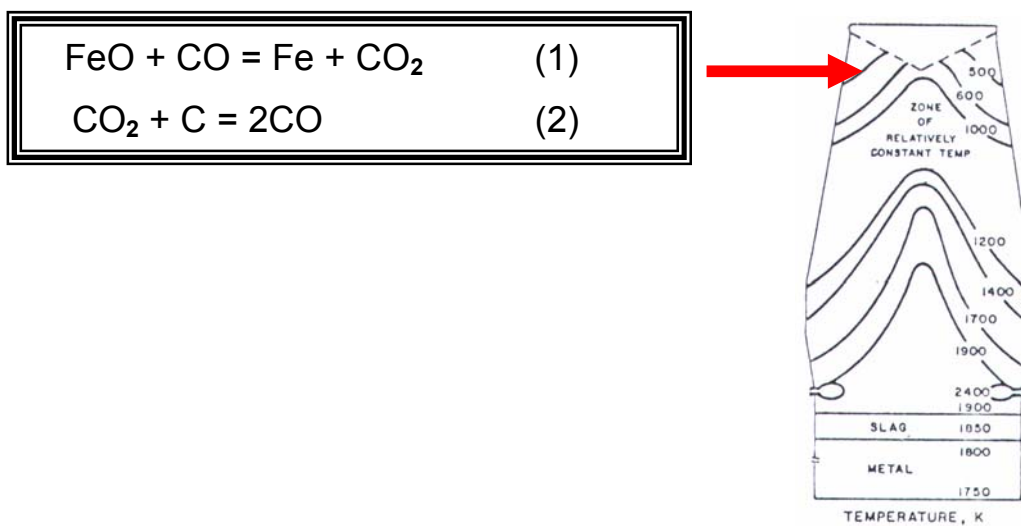
2.3.7.1 Zona Sobre la Isoterma de los 1200 °K

El CO del gas que asciende sobre la isoterma de los 1200 °K reacciona con la wustita, esta reacción es altamente exotérmica. Los gases prácticamente no se enfrían durante su ascenso a través de esta región, conocida como "Zona de Reserva Térmica".



2.3.7.2 Reducción Indirecta de la Wustita

Sobre la zona de fusión la presencia de Fe sólido, en la forma de Wustita (FeO), son capas alternadas de coque y minerales. El gas que ingresa a esta zona es virtualmente todo CO.



La reacción (2) altamente endotérmica, y produce un rápido enfriamiento de los gases ascendentes. La reacción (1) es altamente exotérmica, pero su calor no alcanza para compensar el efecto de la reacción de gasificación del coque (2).

La temperatura de los gases tiene un marcado descenso, hasta que se enfrían bajo los 1200°K, temperatura a la cual la reacción (2) prácticamente deja de ocurrir.

2.3.8 Productos que se obtienen de los Altos Hornos

2.3.8.1 Arrabio

El Arrabio es el resultado de un proceso complejo de mezcla de minerales y coque, el cual es vaciado a uno o más carros torpedos para ser trasladado al área de acería, cada carro es capaz de contener 200 toneladas de arrabio.



A continuación se mostrará un análisis químico del arrabio de un día cualquiera.

Tabla 2.7: Análisis Químico del Arrabio en Condiciones Normales de Operación.

Fuente: Propia

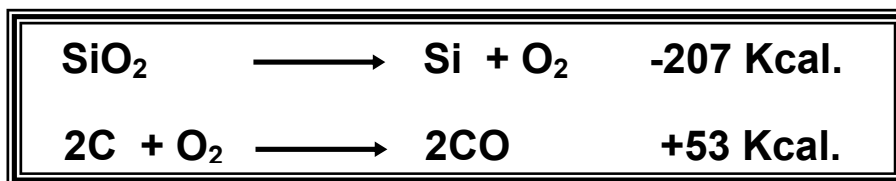
Elemento	Cantidad
Fe	93.85 %
Si	0.45 %
S	0.060 %
P	0.150 %
Mn	0.40 %
C	4.65 %
V	0.365 %
Ti	0.082 %

2.3.8.1.1 El Silicio

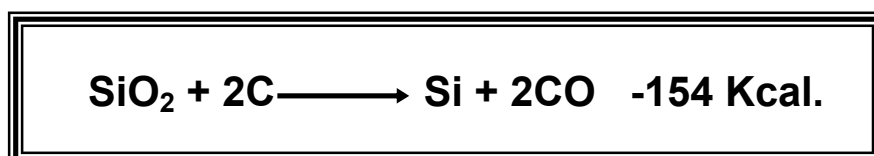
Lo contiene siempre el lecho de fusión, en estado de sílice que forma parte de todos los minerales; la reducción de ella requiere elevada temperatura y gran cantidad de calor. En determinadas circunstancias, dicha reducción se intensifica elevando la temperatura.

En el Alto Horno se consigue, sobre todo, aumentando la proporción de coque, para quemar la cual habrá que inyectar mayor cantidad de aire por las toberas (que incrementará el volumen de gases y el desarrollo de calor). De este modo, la temperatura en el tragante llega a subir tanto, que es imposible seguir aumentando la proporción de coque.

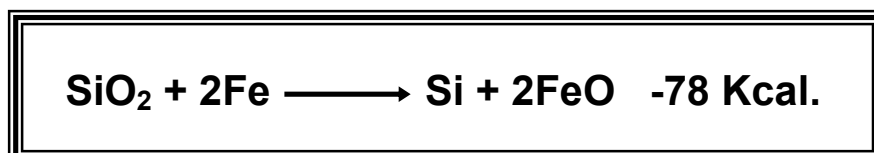
Para disociar del anhídrido silícico (sílice) sus elementos, hacen falta unas 207 Kcal. por molécula-gramo. Si se reduce con carbono, hay que emplear carbono precisamente, y no el óxido de carbono. Se obtiene:



Por lo tanto la ecuación principal de reducción del silicio es la siguiente:



La reducción de la sílice se produce entre el anhídrido silícico, de una parte y el carbón, por otra; también el hierro, dado su menor afinidad para el oxígeno (comparada con el silicio), participa tanto más activamente en dicha reducción cuanto más elevada es su concentración. La reducción de la sílice por el hierro responde a la reacción:



En presencia de carbón solo la reducción comienza, prácticamente, a unos 1500 °C, pero si hay hierro presente, puede iniciarse ya a 1100 °C.

Alrededor de esta temperatura comienza la reducción en el Alto Horno, por encima de toberas donde todavía no ha entrado en fusión el hierro, que en dicho estado disuelve al silicio.

La reducción del anhídrido silícico se debe, en parte a que disuelve silicio en estado de siliciuro férrico:



Los óxidos de silicio, se reducen a través de la reducción directa. Las reacciones del silicio son de particular interés, ya que el contenido del silicio en el arrabio es un buen indicador sensible del estado térmico del alto horno.

El contenido de silicio puede ser manipulado mediante la razón coque/mineral en la carga (CCCC / MPPF). Un aumento de esta, causa una disminución en el valor estacionario del silicio.

2.3.8.2 Escoria

La escoria se forma a partir del material de la ganga de la carga metálica, las cenizas del coque y de los combustibles, y es controlada para:

- ❖ Remover parte del Azufre de la carga, introducido principalmente como impureza en el coque y en el mineral.
- ❖ Absorber K_2O y Na_2O los cuales tienden a entorpecer el trabajo del Alto Horno debido a su papel de agentes formadores de adherencias.
- ❖ Controlar el contenido de Silicio en el metal.

A continuación se mostrará un análisis químico de la escoria de un día cualquiera.

Tabla 2.8: Análisis Químico de la Escoria en Condiciones Normales de Operación

Fuente: Propia

Elemento	Cantidad
Fe	2.69 %
SiO ₂	38.60 %
Al ₂ O ₃	11.24 %
CaO	39.14 %
MgO	5.89 %
S	0.883 %
P	0.008 %
Na ₂ O	0.265 %
K ₂ O	0.609 %
IB	1.273 %

Existen dos tipos de escorias:

❖ Escorias Básicas

Es una escoria corta, liviana, esponjosa. Predominan elementos básicos como CaO. A altas temperaturas tienen un rango de fusión muy pequeño en que se presenta con su mejor fluidez. Si las temperaturas de fusión en el horno quedan bajo esta zona de mayor fluidez, de inmediato se pone viscosa dificultando su extracción del horno.

❖ Escorias Ácidas

Es una escoria larga pesada, hilachenta. Domina la sílice y alúmina. Estas escorias tienen un alto rango de fusión a baja temperatura y fluyen con facilidad. En los Altos Hornos la escoria sacada es de tipo ácida, tiene rangos entre 1.2 y 1.4, y se trabaja con IB que es el índice de basicidad el cual tiene la siguiente formula:

$$IB = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}$$

2.3.8.3 Polvillo y Gas de Alto Horno

Los gases del alto horno van arrastrando polvillo pasando a través de los siguientes equipos:

❖ Captador de Polvillo

Cumple con la misión de acumular el máximo de polvillo que arrastra el gas en un Alto Horno. Al existir una brusca pérdida de presión las partículas más pesadas se precipitan al fondo.

❖ Lavador Primario y Lavador Secundario

El gas que sale del captador se va al lavador primario y luego al lavador secundario, el polvillo se decanta en el fondo de los lavadores los cuales siguen limpiando el gas hasta dejarlo completamente limpio, para enviarlo posteriormente una parte a las estufas y la otra al gasómetro.

Cápítulo3: Discusión Bibliográfica

En este capítulo define una serie de tiempo y se identifican las posibles técnicas estadísticas a utilizar las cuales se analizan para explicar el comportamiento de los datos con el fin de obtener información útil en la toma de decisiones, y así poder llegar a pronosticar un modelo estadístico para el comportamiento del silicio.

Lo primero que se hizo fue definir lo que es una serie de tiempo, para luego analizar los tipos de métodos que se pueden aplicar a las series de tiempo.

3.1 Serie de tiempo

Una serie de tiempo esta dado por un conjunto de observaciones que están ordenadas en el tiempo, el objetivo del análisis de una serie de tiempo es el conocimiento de su patrón de comportamiento, para así poder prever su evolución en el futuro cercano, suponiendo por supuesto que las condiciones no variarán significativamente.

Un concepto fundamental para el estudio de las series de tiempo es el concepto de estacionariedad, nuestras series de estudio deben ser series estacionarias, sino cumplen con esta condición se procederá a convertirlas, por medio de diferenciación.

El concepto de estacionariedad es importante, ya que el estudio de las propiedades estadísticas de una serie de tiempo, sólo puede ser hecho cuando la serie es estacionaria.

Una serie de tiempo es una realización de un proceso estocástico. Un proceso estocástico es estacionario en el sentido débil, si su media y su varianza son constantes en el tiempo, y el valor de la covarianza entre dos períodos depende sólo de la distancia entre estos dos períodos de tiempo y no del tiempo en el cual se ha

calculado la covarianza. Es decir, un proceso estocástico será estacionario débil cuando se cumplieran las tres condiciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 1. \mu_y(t) &= E(Y_t) \\
 2. \sigma^2 Y(t) &= \text{VAR}(Y_t) \\
 3. \gamma Y(r,s) &= \text{Cov}(Y_r, Y_s)
 \end{aligned}$$

Sin embargo es necesario realizar un test o prueba de estacionariedad, para verificar realmente que las series son estacionarias.

3.1.1 Prueba de Estacionariedad

El test más habitual a la hora de determinar la estacionariedad de una serie temporal, es el test de Dickey–Fuller (Test DF) o Dickey - Fuller Ampliado (Test ADF).

El test de Dickey–Fuller consiste en estimar mediante mínimos cuadrados ordinarios si existe o no estacionariedad de la serie, o si esta posee una raíz unitaria (integrada) es decir:

- ❖ La hipótesis nula $H_0: \gamma = 0$
- ❖ La hipótesis alternativa $H_1: \gamma < 0$

El rechazo de la hipótesis nula en estas regresiones ($\gamma = 0$, y_t contiene una raíz unitaria) en favor de la alternativa ($\gamma < 0$), implica que y_t es integrada de orden cero, es decir, y_t es estacionaria.

La hipótesis nula se acepta al 1%, 5% y 10% de niveles de confianza. Es decir:

- ❖ Si el estadístico t calculado es menor en términos algebraicos que el valor crítico para el número de observaciones correspondiente, la hipótesis nula (la hipótesis de la raíz unitaria) debe ser rechazada en favor de la hipótesis alternativa de estacionariedad de Y_t (Y_t es $I(0)$).
- ❖ Si el estadístico t calculado es mayor que el valor crítico, la hipótesis nula no puede ser rechazada y la variable puede ser integrada de un orden superior a uno o no estar integrada.

Existen diferentes modelos aplicados a las series de tiempo estos son:

- ❖ Modelos de Suavizamiento Exponencial
- ❖ Modelos de Box Jenkins
- ❖ Modelos Econométricos

❖ Modelos de Suavizamiento Exponencial

Los Modelos de Suavizamiento Exponencial utilizan observaciones presentes y pasadas de una variable (serie temporal) para obtener predicciones de valores futuros. Existen tres tipos de suavizamiento exponencial:

- Suavizamiento Exponencial Simple
- Suavizamiento Exponencial Doble
- Suavizamiento Exponencial Triple

La diferencia de estos tipos de suavizamiento es que el suavizamiento simple se utiliza para datos horizontales, el suavizamiento doble se utiliza para datos con

tendencia, y el suavizamiento triple se utiliza para datos con tendencia y estacionalidad de ciclos.

❖ **Modelos de Box Jenkins**

Esta metodología de Box Jenkins se utiliza para predecir el comportamiento de una variable y en un momento futuro t , a partir del comportamiento que la variable tuvo en un momento pasado.

Esta metodología utiliza técnicas de autoregresión como de promedios móviles para pronosticar, es decir el modelo a generar es un modelo ARIMA (modelo autorregresivo integrado a media móvil).

Para utilizar la metodología de Box Jenkins, la serie de tiempo de interés debe ser estacionaria.

❖ **Modelos Econométricos**

Los modelos econométricos utilizan variables de predicción para pronosticar el valor de una variable dependiente, cuando hay una relación lineal significativa entre las variables dependientes y de predicción. Cuando la variable dependiente esta en una serie de tiempo el análisis de regresión se conoce como un modelo econométrico.

Dentro de estos modelos encontramos los modelos de retardos distribuidos los cuales se caracterizan por explicar la relación entre las variables endógenas y las variables exógenas en diferentes momentos del tiempo.

Luego de este breve análisis se optó por trabajar con modelos de retardos distribuidos.

3.2 Modelos de retardos distribuidos

Los modelos de retardos distribuidos generan una nueva variable de predicción usando la variable dependiente o endógena (y) atrasada uno o más períodos, además de depender no solo de estas sino también de las variables explicativas.

En este caso el silicio es la variable dependiente, la cual se verá afectada en distintos períodos de tiempo.

La variable silicio depende, no sólo de las variables explicativas, sino también de la cantidad de silicio en otros períodos anteriores, así como también depende del valor actual de éste.

A continuación se muestra un típico modelo de retardos distribuidos con k períodos:

$$y_t = \alpha + \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \dots + \beta_k y_{t-k}$$

Para poder generar estos modelos es necesario conocer como se relaciona la variable endógena (silicio) con sus correspondientes desfases, es por eso que se necesita conocer la función de autocorrelación y la función de autocorrelación parcial.

3.2.1 Correlograma

El correlograma es una herramienta gráfica para desplegar autocorrelaciones para distintos atrasos de una serie de tiempo. Este tiene una escala hacia la derecha (facp) la cual muestra el número de períodos de atraso, y una escala hacia la izquierda (fac) muestra los coeficientes de autocorrelación (las correlaciones entre y_t y y_{t-k}). Correspondiente al número de períodos de atraso a la derecha.

3.2.1.1 La Función de Autocorrelación (Fac)

La función de autocorrelación y la función de autocorrelación parcial (facp) miden la relación estadística entre las observaciones de una serie temporal. La función de autocorrelación mide la correlación entre una variable, atrasada uno o más períodos, y ella misma. Por ejemplo, el coeficiente de autocorrelación entre la variable y_t y la misma variable un período antes, y_{t-1} .

3.2.2 La función de autocorrelación parcial (Facp)

La función de autocorrelación parcial (facp) mide la aportación que a las variaciones de una variable como y_t tiene otra variable, digamos y_{t-2} , aislados los efectos de las posibles restantes variables, por ejemplo y_{t-1} . Por el contrario, la función de autocorrelación ignora el hecho de que parte de la correlación que pueda existir entre, por ejemplo y_t y y_{t-2} , se debe a que ambas están correlacionadas con y_{t-1} .

El coeficiente de autocorrelación ρ_k se encuentra entre -1 y +1, igual que el coeficiente de correlación.

Otra herramienta básica que se emplea en estos modelos es la función de correlación cruzada entre la variable endógena (silicio), y las variables explicativas.

3.2.3 Función de Correlación Cruzada

La función de correlación cruzada es una medida muy útil de la fuerza y la dirección de la relación entre dos variables aleatorias.

Se deben usar series estacionarias ya que las correlaciones cruzadas sólo podrán interpretarse cuando se efectúen sobre series estacionarias.

3.3 Test de Residuos

Estos test tiene la finalidad de demostrar que los modelos obtenidos explican adecuadamente el comportamiento de la variable dependiente.

Como primera medida de precaución conviene, chequear los residuos del modelo descartando correlación serial, por lo que se realizó el test de residuos de Ljung -Box, para analizar el correlograma del modelo final.

El contraste de Ljung-Box.

Si los residuos son independientes sus primeras m autocorrelaciones son cero, para cualquier valor de m . Se elige un m suficientemente grande pero que se pueda estimar $\rho_m = \rho(m)$ de forma razonable, entonces, el contraste de Ljung-Box (chi-cuadrado) contrasta la hipótesis nula de que las primeras m autocorrelaciones son cero. Esto es

$$\begin{cases} H_0 : \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_m = 0 \\ H_1 : \rho_i \neq 0 \text{ para algún } i \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases}$$

El estadístico del contraste de Ljung-Box es el siguiente:

$$Q_{LB} = n(n+2) \sum_{k=1}^m \frac{r(k)^2}{n-k} \sim \chi_{m-1}^2,$$

Bajo la hipótesis nula este estadístico se distribuye aproximadamente según una chi-cuadrado con $m - 1$ grados de libertad. El valor de m puede ser fijado arbitrariamente.

Capítulo 4: Discusión y Análisis de los Resultados

En este capítulo se realizará un análisis de las variables que intervendrán en etapas posteriores de modelación, luego de esto se analizará las autocorrelaciones y correlaciones cruzadas entre el silicio y las variables independientes, con el fin de mostrar las posibles salidas de los modelos de ambos Altos Hornos.

Los datos que se utilizaron para analizar las variables del estudio son la base de datos de todo el año 2006. Los datos para cada Alto Horno se analizaron mediante coladas, obteniéndose aproximadamente 12 coladas diarias.

Cabe señalar que se realizan paradas programadas de los Altos Hornos, en forma alternada cada 15 días para hacer reparaciones necesarias, durando aproximadamente 18 horas, luego se procede en forma normal.

4.1 Variables Principales en los Altos Hornos

Las variables que se utilizaron para un posterior análisis se nombran a continuación:

4.1.1 Variables a nivel de Carga

Dentro de las variables de carga que se estudiaron se encuentran todos materiales que se cargan y se depositan en los hornos, como lo son: romeral, pellets, caliza, coque, cuarzo, manganeso, coquecillo y scrap (solo para el Alto Horno N° 1). Para mayor detalle consultar [Anexo 2: Definiciones](#).

A estas variables se les hizo un estudio de su análisis químico ya que todas estas contienen SiO₂ (sílice), la que posteriormente y por medio de reacciones

químicas pasan a transformarse en silicio, es por eso que las materias primas o materiales fueron fundamentales para el estudio.

Además de su análisis químico se estudió su consumo, con lo cual se determinó una relación entre el consumo del material y la cantidad de sílice presente en cada uno.

Cabe señalar que si bien el cuarzo es el material que posee mayor cantidad de sílice en su composición química con un 96%, su consumo es muy bajo de aproximadamente unos 22 kg., en cambio para los materiales romeral, pellets y coque aunque no poseen un % elevado de sílice en sus composiciones químicas, su consumo es casi total para alimentar a los Altos Hornos.

La razón mineral/coque es uno de los índices de eficiencia más importantes del horno. Esta relación determina, además, el estado estacionario del proceso que tiene una duración aproximada de 7 a 8 horas en bajar la carga sólida desde el tragante hasta salir convertida en arrabio líquido por el crisol.

Es por eso que se ocupó esta relación, pero con la cantidad de sílice presente en la suma del consumo del romeral más el pellets, dividida por la cantidad de sílice presente en el coque y se denotó como Razón.

Los datos que se utilizarán para la razón serán cada 27 round de carga, ya que el efecto del cambio de carga en silicio se ve reflejado en el arrabio cada 27 round de carga.

La cantidad de carga de mineral (romeral, pellets) que se deposita en los Altos Hornos es diferente, para el Alto Horno N°1 se deposita un 50% de romeral y un 50% de pellets, en cambio para el Alto Horno N°2 se deposita un 20% de romeral y un 80% de pellets, por lo que con estos porcentajes se produce un efecto similar.

4.1.2 Variables a Nivel de Toberas

Dentro de las variables a nivel de toberas que se estudiaron se encuentran las que resultan determinantes en el control dinámico del silicio. Estas comprenden el aire o viento insuflado (flujo o volumen, temperatura y presión) y la inyección de combustibles.

Una de las variables manipuladas es la temperatura del viento insuflado, la cual produce variaciones en el estado térmico del horno afectando directamente al silicio.

La inyección de combustible es diferente para cada horno, es decir para el Alto Horno N°1 se inyecta petróleo, en cambio para el Alto Horno N°2 se inyecta alquitrán.

4.1.3 Variables del Estado Térmico del Horno

Una variable importante en la operación de los Alto Horno es la temperatura del arrabio, ya que aporta información del estado térmico del horno. Esta variable es medible sólo durante la colada.

Se mide de dos formas: por un instrumento (Pirómetro), el cual se encuentra en la sala de controles y se ingresa a un programa de operación diario. Y también se mide por medio de una lanza (Termocupla). Ambas formas de medir arrojan valores similares de temperatura de arrabio.

4.1.4 Variables de Análisis Químico del Arrabio

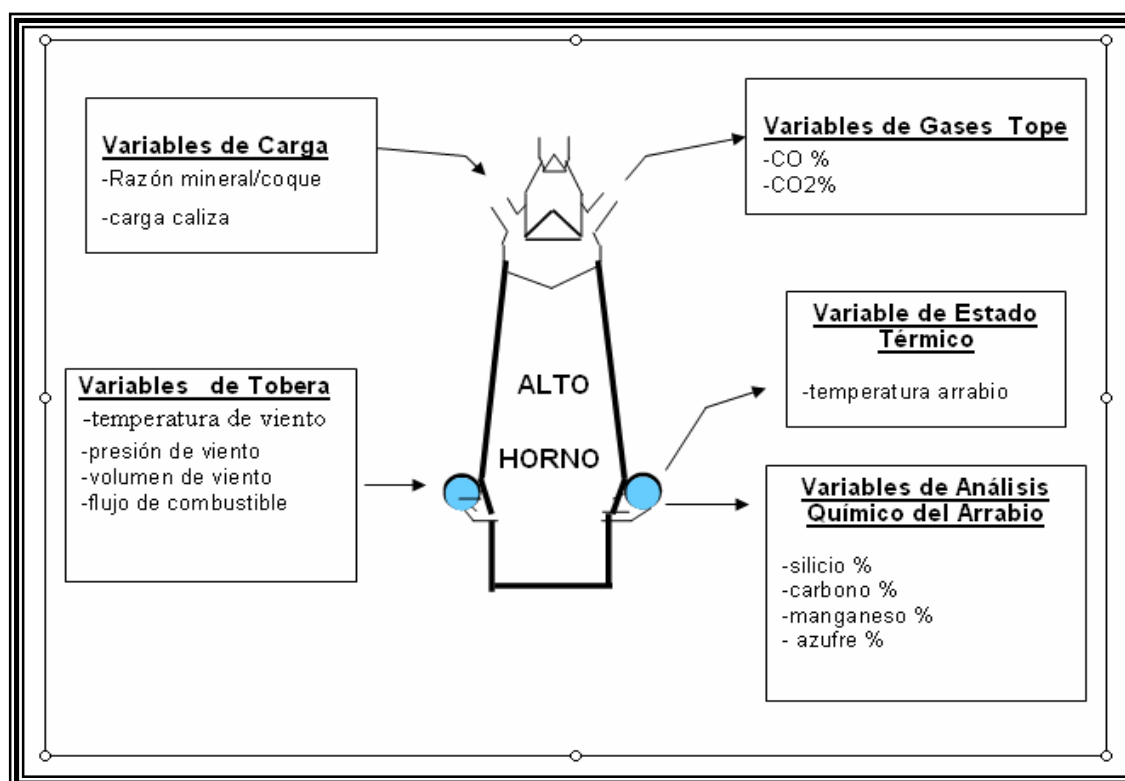
Estas variables incluyen todas las variables del análisis químico del arrabio, es decir el silicio que es nuestro objetivo, además del azufre, carbono, manganeso, fósforo titanio, vanadio, cobre, etc.

4.1.5 Variables de los Gases Topes

Dentro de estas variables se eligieron dos gases que son los más importantes para nuestro estudio, estos gases son los que expulsan los Altos Hornos y son el monóxido de carbono (%CO) y el dióxido de carbono (%CO₂). Además de estos dos gases existe otro gas presente, el hidrógeno (%H₂), el cual no es relevante para el estudio ya que se volatiliza en la parte superior del horno.

Fig. 4.1: Esquema Básico de las Variables Principales en los Altos Hornos.

Fuente: Propia



4.2 Análisis de los Resultados

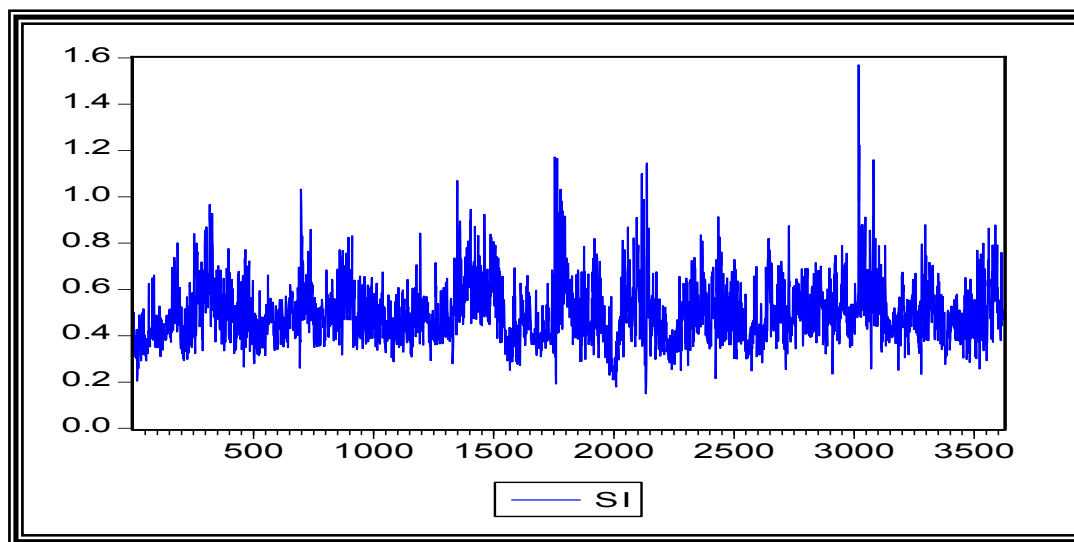
Para el análisis de las variables se tomó la serie de tiempo Silicio y se analizó su estacionariedad. Cabe señalar que este procedimiento se hará para todas las variables en estudio. Para mayor detalle consultar Anexo 3: "Estacionariedad del las Variables"

Como el departamento de Alto Horno posee dos hornos se procedió a analizar primero el Alto Horno N°2.

4.2.1 Análisis de Estacionariedad para el Silicio en el Alto Horno N°2.

Fig. 4.2: Serie de Tiempo para el Silicio Alto Horno N°2

Fuente: Propia



El gráfico de la Fig.4.2 Muestra la serie de tiempo para el comportamiento del silicio, la cual presenta alrededor de unos 3500 datos aproximados (coladas).

Cabe señalar que la serie para el comportamiento del silicio presenta algunos valores atípicos por ejemplo para el valor cercano al dato 3000, el cual puede ser producto de algún calentamiento del horno por lo que el comportamiento del silicio se ve reflejada por medio de un aumento en su valor.

La serie presenta un valor medio constante en todo el período muestral, es decir, oscila en torno al mismo valor. Por tanto, podemos suponer que, probablemente, sea estacionaria.

Al parecer la serie silicio (yt) cumple con la condición de estacionariedad, ya que los datos arrojados son similares en media y varianza, no importando el momento en el cual se midan. Sin embargo es necesario realizar el test estacionariedad de Dickey–Fuller.

Fig.4.3: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad

Fuente: Propia

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Dependent Variable: D(SI)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-9.276624	0.0000
Test critical values: 1% level	-3.431964	
5% level	-2.862138	
10% level	-2.567132	

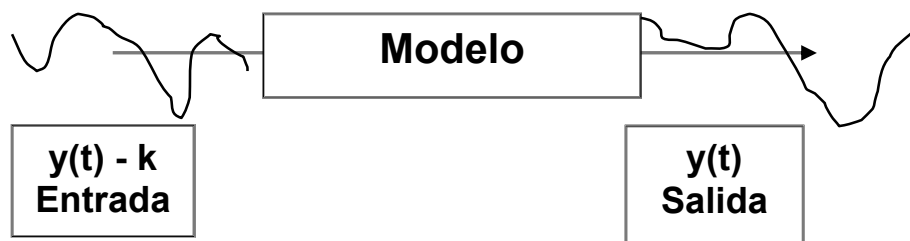
Según la Fig. 4.3 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico ADF = -9.276624 es inferior a los valores críticos

(t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir, para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie es estacionaria.

Para el Alto Horno N°1 se realizó el mismo procedimiento. Para mayor detalle consultar Anexo 3: "Estacionariedad de las variables"

Los modelos de retardos distribuidos tienen por objetivo relacionar dos ó más series temporales elaborando modelos causales de predicción. Se considera la forma de relacionar una serie temporal, denominada salida, para este caso una de las variables de salida será el silicio en función de una u otras series temporales, que se denominan entradas como lo son, por ejemplo, la temperatura de viento insuflado. Es decir, el modelo a generar tendrá más o menos la siguiente forma:

Fig.4.4: Modelo de Entrada $y(t) - k$ y Salida $y(t)$ de una variable en un tiempo t .



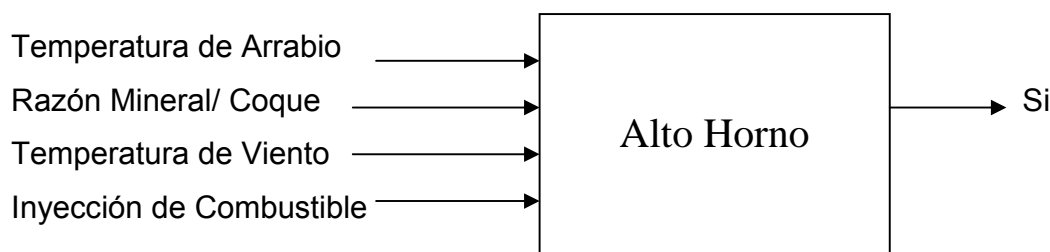
Para este caso todas las variables de entrada son controlables, es decir cuando ingresan a los Altos Hornos, se lleva una medición ya sea en Kg. (razón mineral/coque), °C (temperatura de viento insuflado), etc.

4.3 Procedimiento de Identificación de los Modelos

El problema básico en la identificación de sistemas dinámicos consiste en estimar el modelo de un sistema basándose en datos de entrada (independientes) y

datos de salida (dependientes). A continuación se muestran todos los datos que se analizaron:

Fig.4.5: Modelo de entrada y salida para los Altos Hornos



Este tipo de modelo corresponde a un modelo univariado con una salida, donde se tiene una variable dependiente, para este caso es el silicio.

Las variables de entrada para efectos de modelación que se muestran en el esquema son: Temperatura de Arrabio (TA), Razón Mineral/ Coque (R), Temperatura de Viento (TVI), Inyección de Combustible (COMB). Las variables de salida son: Silicio (Si).

Se escogieron estas cuatro variables explicativas por las siguientes razones:

1. Temperatura de Arrabio (TA): La temperatura de arrabio aumenta al aumentar el porcentaje de silicio presente el en arrabio y viceversa, es decir la temperatura de arrabio es directamente proporcional al porcentaje de silicio.
2. Razón Mineral/ Coque (R): La razón mineral/coque es la variable más importante en la formación de arrabio, ya que las materias primas ingresadas a los hornos y por medio de reacciones químicas convierten la sílice (presente en ellas) en silicio (presente en el arrabio).

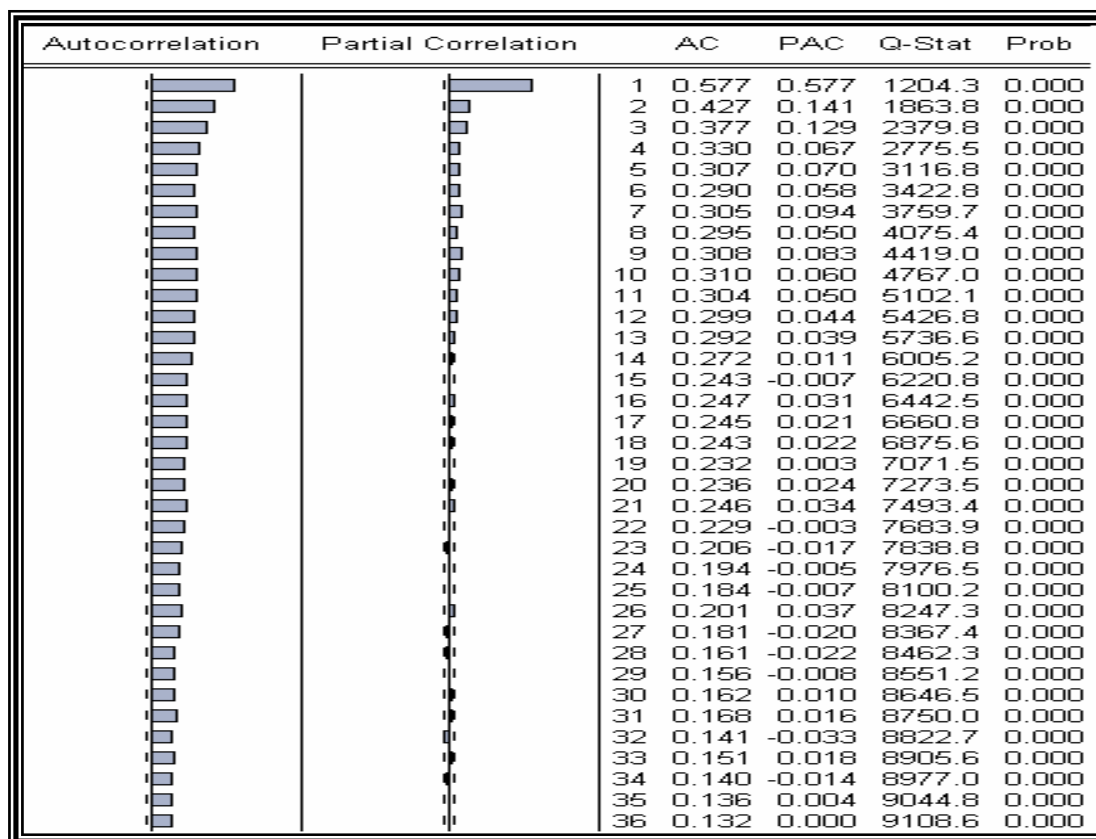
3. Temperatura de Viento (TVI): El silicio depende de la temperatura de viento insuflado, ya que un aumento de esta, provoca un aumento del silicio, en otras palabras el silicio es directamente proporcional a la temperatura de viento insuflado.

4. Inyección de Combustible (COMB): El combustible y la temperatura de viento están relacionados entre sí, ya que si se produce un aumento de uno de estos, el otro también aumenta y viceversa.

A continuación se analizará la función de autocorrelación (Fac), y la función de autocorrelación parcial (Facp), para la serie de tiempo Silicio en el Alto Horno N°2.

Fig. 4.6: Correlograma para el Silicio en el Alto Horno N°2

Fuente: Propia



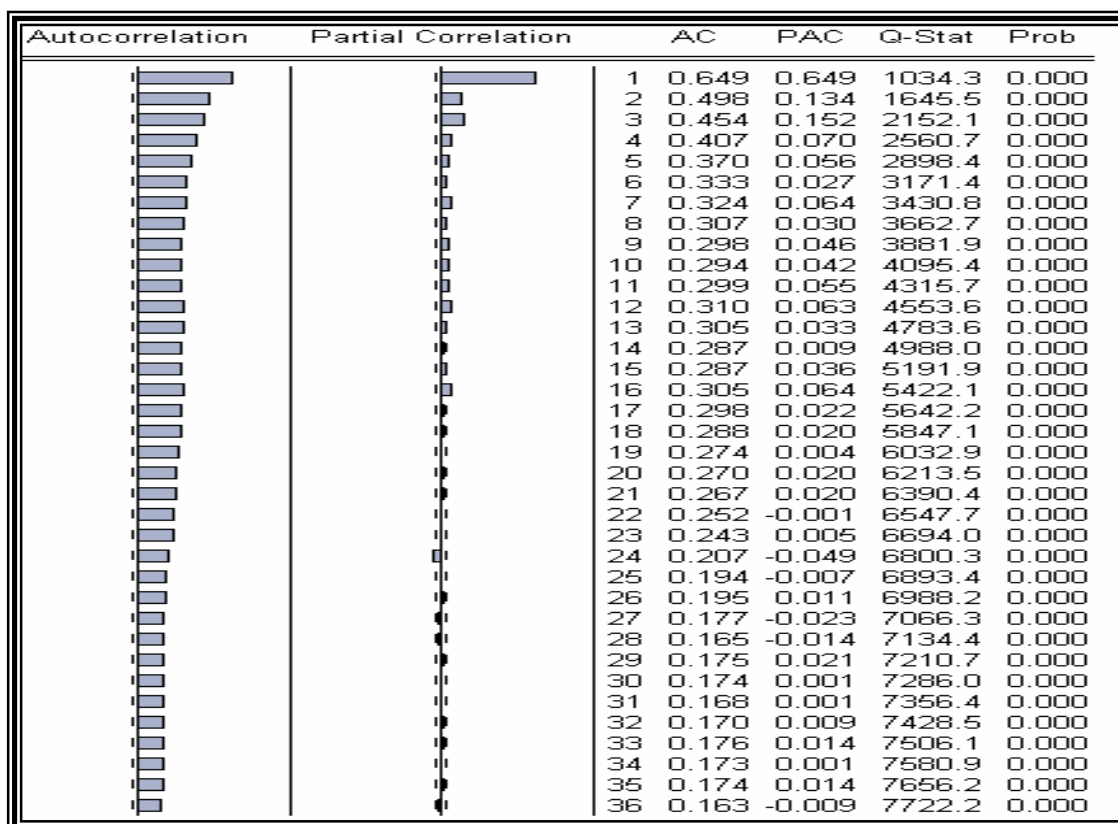
La figura 4.6 presenta el correlograma de la Serie de Tiempo Silicio, se muestra hasta el rezago 36. El correlograma empieza con un valor de 0.577 y va disminuyendo gradualmente, mientras que la función de autocorrelación parcial presenta un valor significativo en el retardo uno, aquí se ve claramente que la serie para el silicio presenta un desfase o retardo.

El comportamiento del silicio para este caso presenta un retardo. Es decir, se distribuye a lo largo de un periodo de retraso. Por lo tanto el valor del silicio en el tiempo t depende de su valor en el periodo de tiempo anterior.

Ahora analizaremos la función de autocorrelación para el silicio en el Alto Horno N°1, para el cual se utilizó el mismo procedimiento que para el Alto Horno N°2.

Fig. 4.7: Correlograma para el Silicio en el Alto Horno N°1

Fuente: Propia



La figura 4.7 presenta el correlograma de la Serie de Tiempo Silicio, se muestra también hasta el rezago 36. El correlograma empieza con un valor de 0.655 hasta llegar a un valor de 0.145, la función de autocorrelación no se anula, pero va decayendo hacia cero.

Aquí se observa que la serie para el silicio (Y_t) presenta más de un desfase o retardo. Se puede observar fácilmente que el comportamiento del silicio para el Alto Horno N°1 obedece a un modelo de retardos distribuidos con un período de tres desfases.

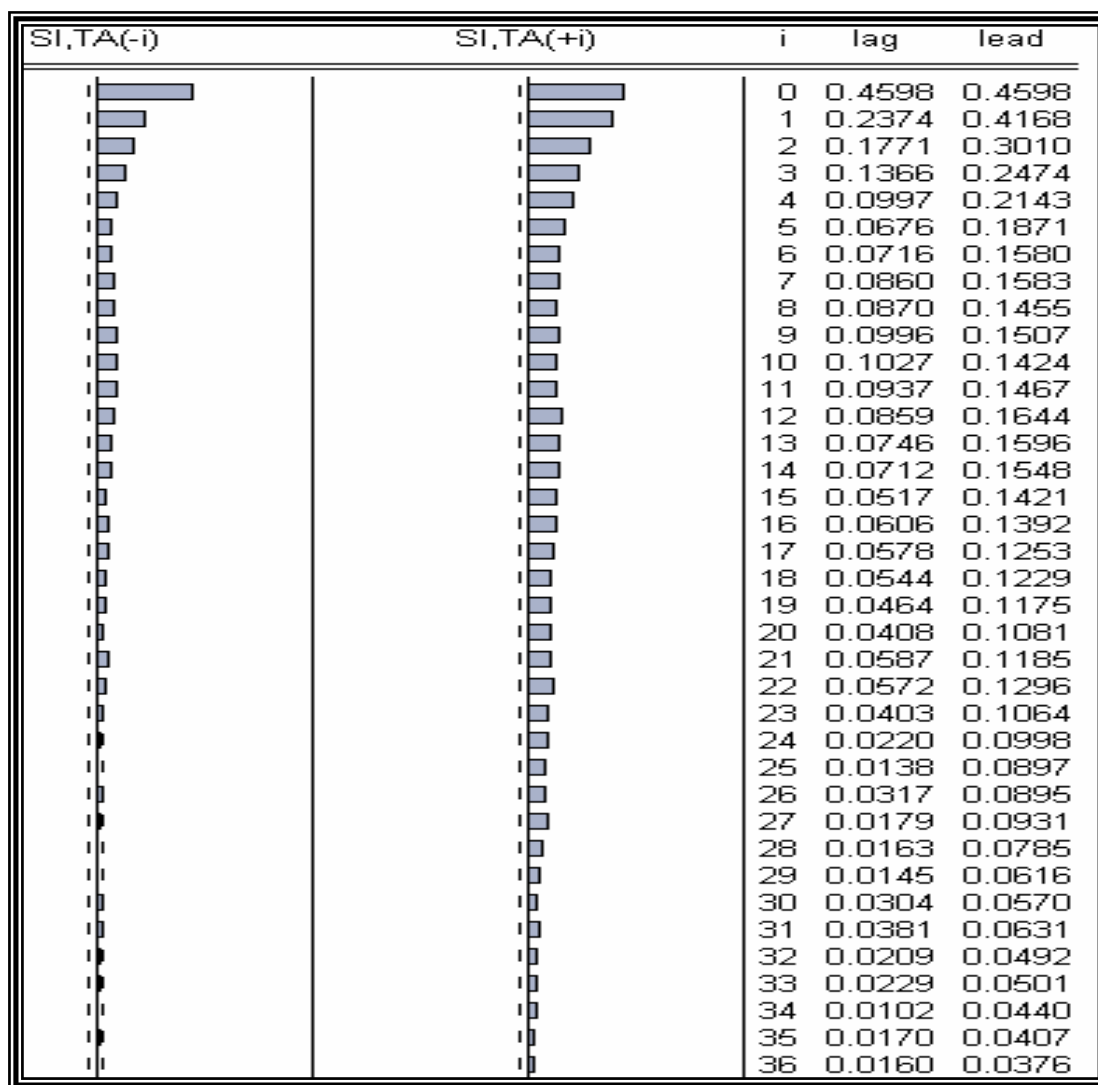
Se hace notar que no necesariamente se deben incluir los tres valores de los retardos, es decir, para este caso puede que sólo se incorporen dos valores al modelo, eso va a depender de otros factores.

A continuación se muestra un análisis de las correlaciones cruzadas para el Alto Horno N°2, para este caso se analizaron todas las variables y su posible relación con el Silicio.

Se analizó primero la correlación cruzada entre la temperatura de arrabio y el silicio, dicho anteriormente la temperatura es un buen estimador del estado térmico del horno.

Fig.4.8: Correlación Cruzada entre el Silicio y la Temperatura de Arrabio Alto Horno N°2.

Fuente: Propia



El gráfico de la figura 4.8 muestra que para el caso de la correlación cruzada entre la temperatura de arrabio y el silicio, se puede observar que la función de correlación cruzada tiene un decaimiento exponencial, existiendo , al parecer una correlación positiva entre estas dos variables, principalmente en los primeros rezagos. No existiendo un valor que sea mucho mayor que los otros.

Luego se analizó las correlaciones cruzadas para las variables a nivel de tobera, como lo son la temperatura de viento insuflado y la inyección de combustible.

Fig. 4.9: Correlación Cruzada entre el Silicio y la Temperatura de Viento Insuflado Alto Horno N°2.

Fuente: Propia

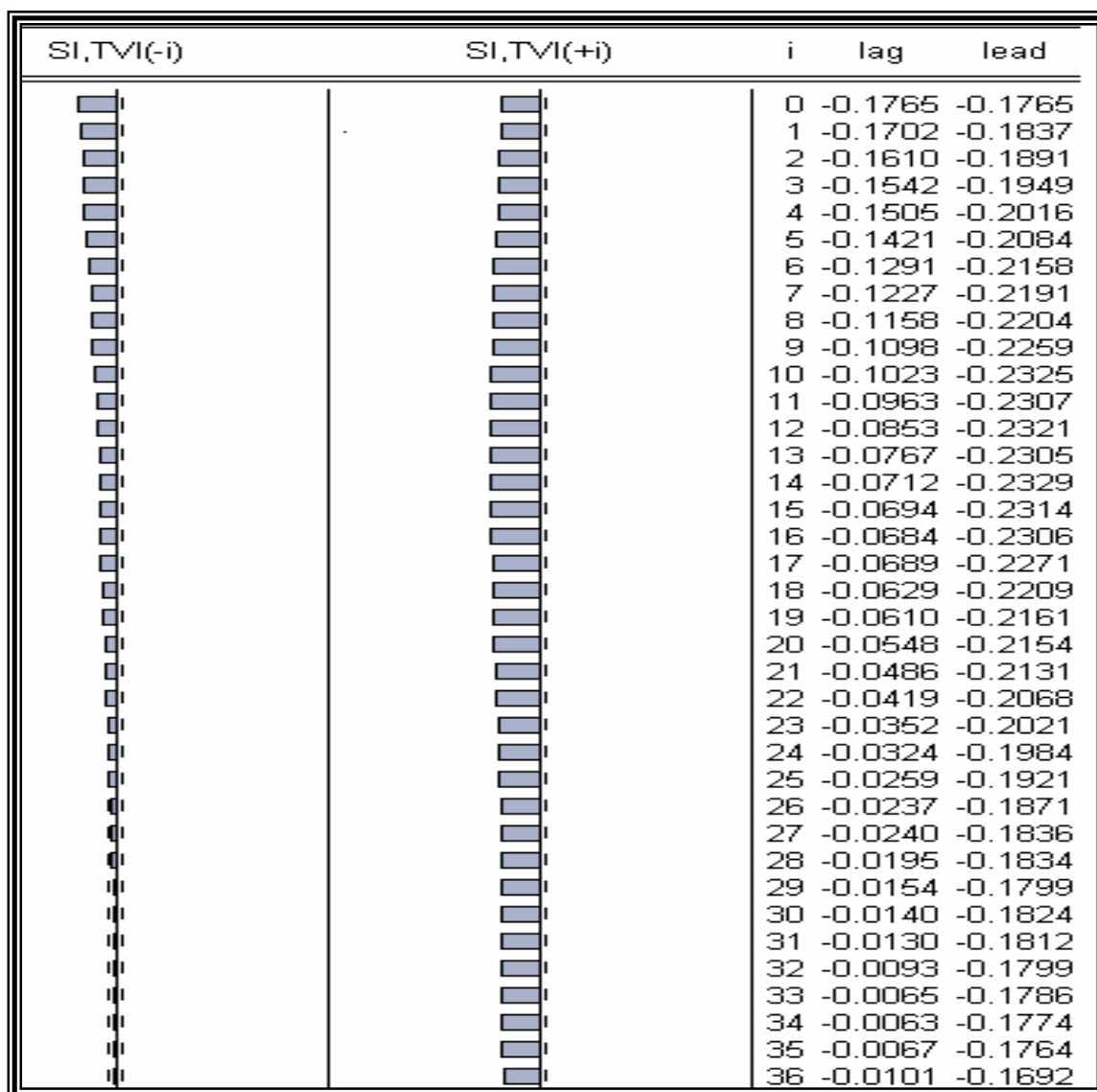
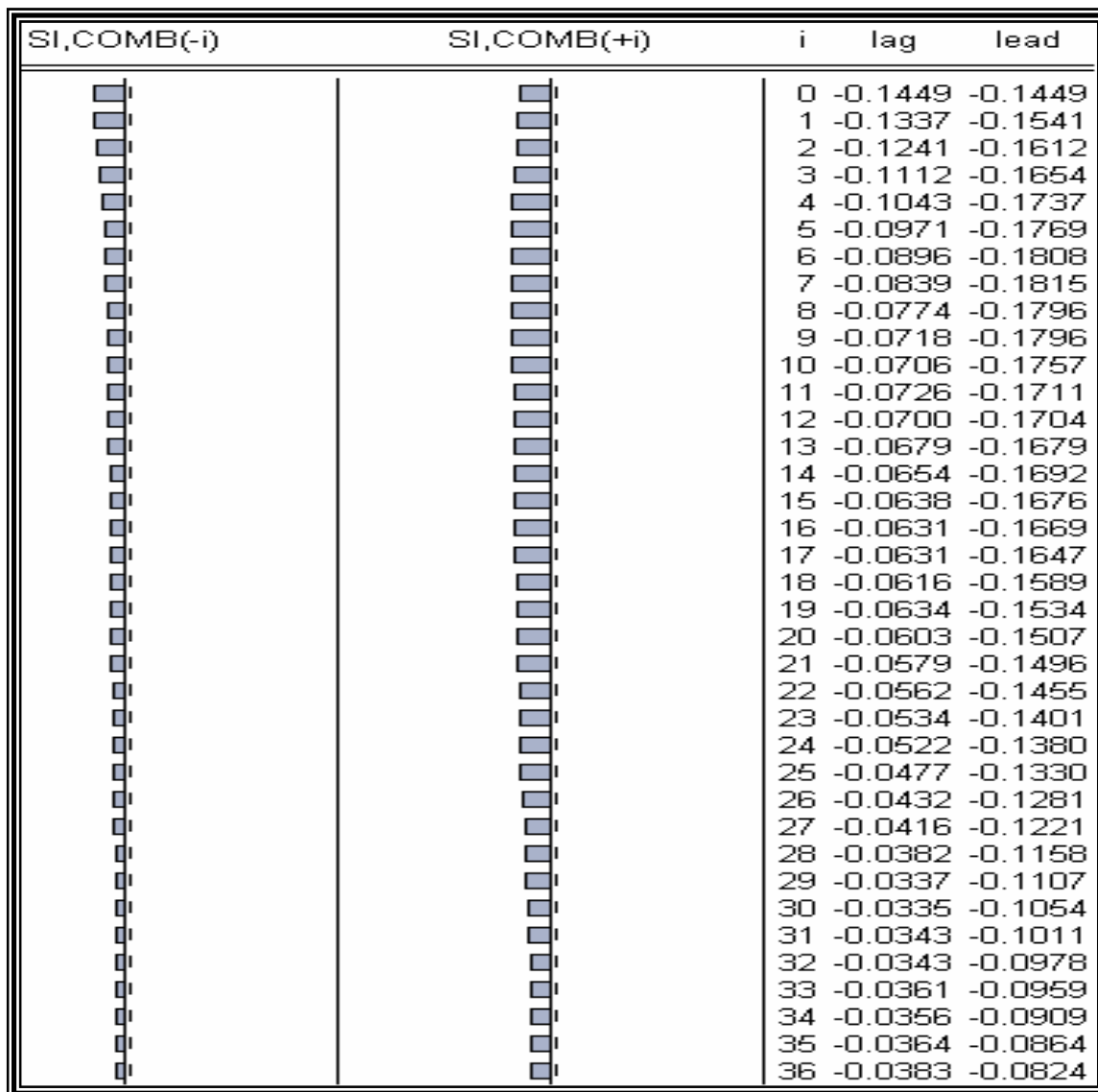


Fig. 4.10: Correlación Cruzada entre el Silicio y el Combustible Alquitrán Alto Horno N°2.

Fuente: Propia



De los gráficos de las Fig. 4.9 y 4.10 para las variables a nivel de tobera se desprende que tanto para la correlación cruzada entre la temperatura de viento y el silicio, como la correlación cruzada entre el alquitrán y el silicio se puede observar que la función de correlación cruzada de ambos gráficos presenta un decaimiento exponencial, existiendo, una correlación negativa entre ambos pares de variables,

principalmente en los primeros rezagos. No existiendo un valor que sea mucho mayor que los otros. Finalmente se analizó la correlación cruzada para la razón coque/ mineral (R).

Fig. 4.11: Correlación Cruzada entre la Razón Coque/ Mineral y el Silicio en el Horno N°2.

Fuente: Propia

SI,R(-i)	SI,R(+i)	i	lag	lead
		0	-0.0459	-0.0459
		1	-0.0438	-0.0457
		2	-0.0441	-0.0447
		3	-0.0398	-0.0445
		4	-0.0364	-0.0350
		5	-0.0367	-0.0299
		6	-0.0402	-0.0227
		7	-0.0438	-0.0120
		8	-0.0459	-0.0005
		9	-0.0478	0.0140
		10	-0.0563	0.0286
		11	-0.0686	0.0409
		12	-0.0664	0.0392
		13	-0.0583	0.0364
		14	-0.0600	0.0306
		15	-0.0623	0.0321
		16	-0.0566	0.0304
		17	-0.0561	0.0274
		18	-0.0667	0.0193
		19	-0.0742	0.0216
		20	-0.0735	0.0236
		21	-0.0738	0.0175
		22	-0.0851	0.0123
		23	-0.0834	0.0097
		24	-0.0759	0.0111
		25	-0.0738	0.0165
		26	-0.0678	0.0102
		27	-0.0634	0.0041
		28	-0.0575	0.0074
		29	-0.0587	0.0097
		30	-0.0558	0.0079
		31	-0.0511	0.0059
		32	-0.0460	0.0087
		33	-0.0451	0.0138
		34	-0.0413	0.0140
		35	-0.0550	0.0143
		36	-0.0644	0.0117

Del gráfico de la Fig. 4.11 se observa la correlación cruzada entre Razón Coque/ Mineral y el silicio, se puede decir que la función de correlación cruzada del gráfico presenta un decaimiento exponencial, existiendo, una correlación negativa entre las variables. No existiendo un valor que sea mucho mayor que los otros.

A continuación se analizó las correlaciones cruzadas para el Alto Horno N°1. Para mayor detalle consultar Anexo 4: "Correlación Cruzada de las Variables Alto Horno N°1".

4.4 Análisis de las Salidas

El objetivo es generar un modelo del comportamiento del silicio para ambos Altos Hornos. Se pueden tener varios modelos con diferente orden y estructuras, siendo necesario escoger cual es el que se considera mejor o más adecuado para el propósito final.

No existe un procedimiento absoluto para obtener el mejor modelo, por lo cual es conveniente probar con una variedad de herramientas la evaluación de la calidad del mismo.

A continuación se presentaran para cada Alto Horno posibles salidas candidatas, con el fin de elegir para cada uno de ellos un modelo.

Por medio del software Ewiews, mencionado anteriormente se procedió a la formación de los modelos.

4.4.1 Salidas para el Alto Horno N°2

Fig. 4.12: Salida inicial para el Alto Horno N°2

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.436379	0.014486	30.12478	0.0000
TA	0.001987	9.97E-05	19.93499	0.0000
TVI	-0.000878	0.000176	-4.988157	0.0000
R	-0.037043	0.008586	-4.314140	0.0000
COMB	1.33E-05	0.000288	0.046352	0.9630
C	-1.663957	0.218759	-7.606341	0.0000
R-squared	0.401989	Mean dependent var	0.496140	
Adjusted R-squared	0.401166	S.D. dependent var	0.125541	
S.E. of regression	0.097149	Akaike info criterion	-1.823490	
Sum squared resid	34.31650	Schwarz criterion	-1.813275	
Log likelihood	3326.575	F-statistic	488.8307	
Durbin-Watson stat	1.955964	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig. 4.12 Muestra la salida inicial para el Alto Horno N°2, por el método de mínimos cuadrados se tiene como variable dependiente al silicio (Si) y como variables independientes a la temperatura de arrabio(TA), la temperatura de viento insuflado(TVI), la razón coque mineral (R) , el combustible alquitrán (COMB), el silicio con un rezago en un tiempo $t = 1$ (Si(-1)) y una constante aleatoria externa $c = -1.663957$.

En esta salida se aprecia que la variable combustible (COMB.) no rechaza la hipótesis nula H_0 a favor de la alternativa H_1 , por lo tanto la variable combustible no se debe incluir en el modelo, ya que estadísticamente es cero, en otras palabras no es significativa.

De la salida del modelo un R^2 ajustado de un 0.40, el cual nos indica que la variación del silicio es explicada en un 40%, por las variaciones de las variables independientes.

Se procedió a la formación del modelo para el Alto Horno N°2, para los cuales se probaron varios modelos con un sólido fundamento, pero al final se tuvo que elegir el que mejor se ajuste a los datos.

Fig.4.13: Salida N° 1 para el Alto Horno N°2

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.436368	0.014482	30.13199	0.0000
TA	0.001987	9.96E-05	19.95404	0.0000
TVI	-0.000873	0.000127	-6.874024	0.0000
R	-0.037069	0.008567	-4.327224	0.0000
C	-1.668896	0.191028	-8.736415	0.0000
R-squared	0.401988	Mean dependent var	0.496140	
Adjusted R-squared	0.401331	S.D. dependent var	0.125541	
S.E. of regression	0.097136	Akaike info criterion	-1.824039	
Sum squared resid	34.31652	Schwarz criterion	-1.815526	
Log likelihood	3326.574	F-statistic	611.2055	
Durbin-Watson stat	1.955938	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig. 4.13 muestra la primera salida propuesta para el Alto Horno N°2, la cual corresponde a un modelo de retardos distribuidos, en donde el silicio presenta un desfase de tiempo con $t = 1$.

La salida presenta un R2 ajustado = 0.40, el cual indica que en un 40% de la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado y razón. Con respecto al test de Durbin Watson con un valor de 1.95 cercano a 2.

Fig. 4.14: Salida N° 2 para el Alto Horno N°2

Dependent Variable: SI				
Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.505220	0.014519	34.79599	0.0000
TA	0.003148	0.000118	26.73399	0.0000
TA(-1)	-0.002053	0.000121	-16.98509	0.0000
TVI	-0.000808	0.000122	-6.607397	0.0000
R	-0.021460	0.008299	-2.585870	0.0098
C	-0.472813	0.196926	-2.400969	0.0164
R-squared	0.445996	Mean dependent var	0.496145	
Adjusted R-squared	0.445234	S.D. dependent var	0.125558	
S.E. of regression	0.093519	Akaike info criterion	-1.899656	
Sum squared resid	31.79106	Schwarz criterion	-1.889439	
Log likelihood	3464.323	F-statistic	585.2638	
Durbin-Watson stat	2.174445	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig.4.14 muestra la Salida N° 2 también se le asocia un modelo de retardos distribuidos, en donde el silicio presenta un desfase de tiempo con un $t=1$, pero a diferencia de la salida anterior esta presenta también un desfase de temperatura de arrabio en un instante de tiempo $t=1$.

Con respecto al R^2 ajustado = 0.44, el cual indica que un 44% de la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y temperatura de arrabio con retardo 1. Con respecto al test de Durbin Watson este presenta un valor de 2.17 cercano a 2.

1.4.2 Salidas para el Alto Horno N°1

Fig. 4.15: Salida inicial para el Alto Horno N°1

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.491519	0.017162	28.63971	0.0000
TA	0.001823	0.000117	15.60321	0.0000
TVI	0.000613	0.000381	1.608559	0.1078
COMB	0.000488	0.000846	0.576336	0.5644
R	-0.592223	0.044942	-13.17741	0.0000
C	-1.731961	0.408885	-4.235819	0.0000
R-squared	0.484446	Mean dependent var		0.619967
Adjusted R-squared	0.483393	S.D. dependent var		0.192932
S.E. of regression	0.138670	Akaike info criterion		-1.110992
Sum squared resid	47.09303	Schwarz criterion		-1.096802
Log likelihood	1369.743	F-statistic		460.2459
Durbin-Watson stat	1.979379	Prob(F-statistic)		0.000000

La Fig. 4.15 muestra la salida inicial para el Alto Horno N°2, por el método de mínimos cuadrados tenemos como variable dependiente al silicio y como variables independientes a la temperatura de arrabio, la temperatura de viento insuflado, la razón coque mineral, el combustible petróleo y una constante aleatoria externa $c = -1.731961$.

En esta salida se aprecia que la variable combustible (comb.) no rechaza la hipótesis nula H_0 a favor de la alternativa H_1 , por lo tanto la variable combustible no se debe incluir en el modelo, ya que estadísticamente es cero, en otras palabras no es significativa.

De la salida del modelo un R^2 ajustado de un 0.48, el cual nos indica que la variación del silicio es explicada en un 48%, por las variaciones de las variables independientes. Dicho de otro modo el modelo se ajusta a las demás variables en un 48%.

Se procedió a la formación del modelo para el Alto Horno N°1, para los cuales se probaron varios modelos con el fin de elegir el que mejor se ajuste a los datos.

Fig. 4.16: Salida N° 1 para el Alto Horno N°1

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.428720	0.020282	21.13784	0.0000
SI(-2)	0.025361	0.021760	1.165502	0.2439
SI(-3)	0.121669	0.019290	6.307281	0.0000
TA	0.001715	0.000115	14.96039	0.0000
TVI	0.001010	0.000246	4.109017	0.0000
R	-0.529418	0.044817	-11.81279	0.0000
C	-2.170644	0.342223	-6.342781	0.0000
R-squared	0.497005	Mean dependent var	0.620047	
Adjusted R-squared	0.495772	S.D. dependent var	0.192988	
S.E. of regression	0.137039	Akaike info criterion	-1.134250	
Sum squared resid	45.93526	Schwarz criterion	-1.117684	
Log likelihood	1398.157	F-statistic	402.8127	
Durbin-Watson stat	1.893051	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig. 4.16 muestra la salida N° 1 la cual indica que el silicio presenta más de un desfase por lo que el modelo de retardos distribuidos se distribuye a lo largo de tres períodos.,el cual presenta desfases de tiempo t=1, t=2 y t=3.

Presenta un R² ajustado = 0.49, el cual indica que en un 49% la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y por los silicios con retardos de tiempo 1,2 y 3. Con respecto al test de Durbin Watson presenta un valor de 1.89 cercano a 2.

En esta salida se aprecia que la variable silicio con período 2, es decir, (Si (-2)) no rechaza la hipótesis nula Ho a favor de la alternativa H1, por lo tanto esta variable no se debe incluir al modelo, su probabilidad de ser significativa y aportar al

modelo es de $1 - 0.2439 = 0.7561$. Por lo que no se refleja su participación ya que sólo está aportando un 75.6 % al modelo.

Fig. 4.17: Salida N° 2 para el Alto Horno N°1

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.439049	0.018244	24.06482	0.0000
SI(-3)	0.132250	0.017022	7.769500	0.0000
TA	0.001721	0.000114	15.03526	0.0000
TVI	0.001001	0.000246	4.073628	0.0000
R	-0.533298	0.044697	-11.93146	0.0000
C	-2.158885	0.342099	-6.310702	0.0000
R-squared	0.496726	Mean dependent var	0.620047	
Adjusted R-squared	0.495698	S.D. dependent var	0.192988	
S.E. of regression	0.137049	Akaike info criterion	-1.134510	
Sum squared resid	45.96077	Schwarz criterion	-1.120311	
Log likelihood	1397.476	F-statistic	483.0328	
Durbin-Watson stat	1.915306	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig. 3.17 muestra la salida N°2, para el silicio con más de un desfase, por lo que el modelo de retardos distribuidos se distribuye a lo largo de tres períodos. Presentando desfases en dos instantes de tiempo, con un $t = 1$ y $t = 3$.

Presenta un R^2 ajustado = 0.49, el cual indica que en un 49% la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y por los silicios con retardos de tiempo 1 y 3. Con respecto al test de Durbin Watson con un valor 1.91 cercano a 2.

Fig. 4.18: Salida N° 3 para el Alto Horno N°1

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.487884	0.017623	27.68446	0.0000
SI(-3)	0.165378	0.016326	10.12983	0.0000
TA	0.003579	0.000159	22.51136	0.0000
TA(-1)	-0.002663	0.000166	-16.04042	0.0000
TVI	0.000375	0.000237	1.580050	0.0000
R	-0.362041	0.043845	-8.257278	0.0000
C	-0.725574	0.337521	-2.149712	0.0317
R-squared	0.544627	Mean dependent var	0.620047	
Adjusted R-squared	0.543510	S.D. dependent var	0.192988	
S.E. of regression	0.130391	Akaike info criterion	-1.233712	
Sum squared resid	41.58631	Schwarz criterion	-1.217146	
Log likelihood	1520.147	F-statistic	487.5699	
Durbin-Watson stat	2.175545	Prob(F-statistic)	0.000000	

La Fig. 4.18 Muestra la salida N° 3. La cual indica que el silicio presenta más de un desfase por lo que el modelo de retardos distribuidos se distribuye a lo largo de tres períodos, presenta desfases en dos instantes de tiempo, con un $t=1$ y $t=3$.

Al igual que la salida anterior, con la diferencia de que en esta salida la temperatura de arrabio presenta un desfase, es decir, con un retardo de tiempo $t=1$.

Presenta un R^2 ajustado = 0.54, el cual indica que en un 54% la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y por los silicios con retardos de tiempo 1 y 3. Con respecto al test de Durbin Watson con un valor de 2.17 cercano a 2.

Capítulo 5: Estimación y Pronósticos para el Comportamiento del Silicio

Una de las tareas más importantes y difíciles en la realización de modelos predictivos que usan las series de tiempo es la verificación y validación de estos.

La salida de los modelos se utilizó para obtener conclusiones del sistema actual, por lo que es muy importante que se confíe en el modelo para garantizar que éste va a ser aplicado.

5.1 Verificación

Esta es la etapa de la confección del modelo, se ve si este se ajusta a la realidad que se desea representar.

La construcción del modelo significa encontrar el modelo adecuado para usarlo con los datos recogidos. Cuanto más sencillo sea el modelo, mayor será la oportunidad de que el proceso de pronósticos tenga aceptación.

Empezar con un modelo simple del sistema actual y añadiendo complejidad a éste hasta llegar a tener las variables necesarias para así obtener el modelo adecuado.

La verificación se refiere a la construcción de un modelo correcto, por medio del cual se determinó, si el modelo es una buena representación del sistema, en donde se hizo una comparación del modelo del comportamiento del silicio con el del sistema actual que se utiliza en los Altos Hornos.

Para cada Alto Horno se eligió el mejor modelo para el comportamiento del silicio, los cuales se presentarán continuación.

5.1.1 Modelo para el Alto Horno N°2

Después de identificar y estimar las salidas candidatas para el modelo de comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2. Se muestra la Salida N° 2 la cual es presentada a continuación:

Fig. 5.1: Salida N° 2 para el modelo de comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.505220	0.014519	34.79599	0.0000
TA	0.003148	0.000118	26.73399	0.0000
TA(-1)	-0.002053	0.000121	-16.98509	0.0000
TVI	-0.000808	0.000122	-6.607397	0.0000
R	-0.021460	0.008299	-2.585870	0.0098
C	-0.472813	0.196926	-2.400969	0.0164
R-squared	0.445996	Mean dependent var	0.496145	
Adjusted R-squared	0.445234	S.D. dependent var	0.125558	
S.E. of regression	0.093519	Akaike info criterion	-1.899656	
Sum squared resid	31.79106	Schwarz criterion	-1.889439	
Log likelihood	3464.323	F-statistic	585.2638	
Durbin-Watson stat	2.174445	Prob(F-statistic)	0.000000	

Se escogió la Salida N° 2, ya que si bien las salidas son similares ambas presentan un modelo de retardos distribuidos con un período de desfase de tiempo $t = 1$, la diferencia está en que la salida escogida presenta también un desfase de temperatura de arrabio en un instante de tiempo $t = 1$.

Esta salida presenta un mejor R^2 ajustado = 0.44, el cual indica que un 44% de la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables

temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y temperatura de arrabio con retardo 1.

Según los criterios de información Akaike y Schwarz son más pequeños en comparación con la Salida N° 1.

Por lo tanto el modelo a generar para el Alto Horno N°2 será el siguiente:

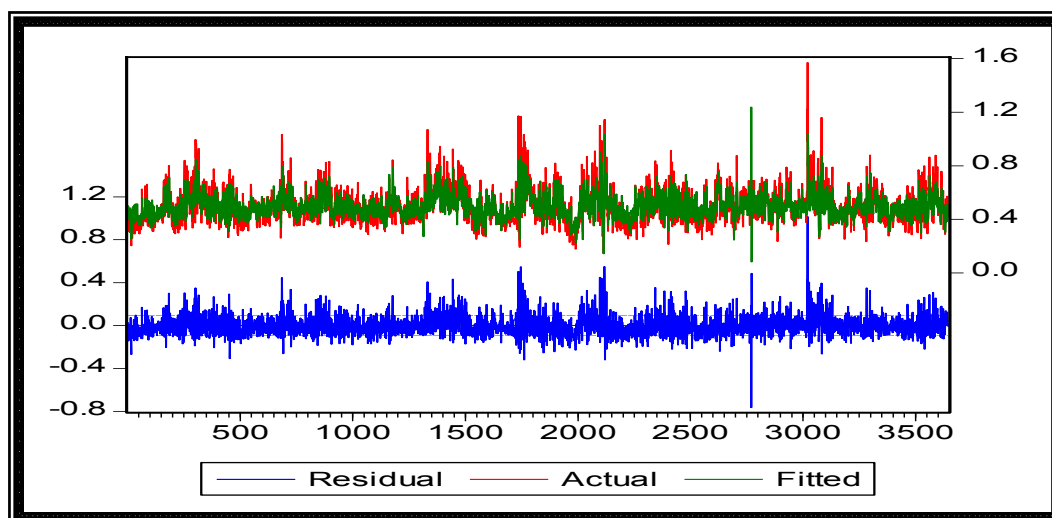
$$y_t = \alpha_1 \cdot TA - \alpha_2 \cdot TA(-1) - \beta_1 y_{t-1} - \gamma_1 \cdot TVI + \delta_1 \cdot R + c$$

Donde y_t es el silicio, TA es la temperatura de arrabio, $TA(-1)$ es la temperatura de arrabio con un desfase, y_{t-1} es el silicio con un desfase, TVI es la temperatura de viento insuflado, R es la razón coque/mineral, y c es una constante.

Para este modelo α_1 , α_2 , β_1 , γ_1 , y δ_1 son constantes.

A continuación se muestra el Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 2 y su Gráfico de Residual.

Fig. 5.2: Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 2 y su Gráfico de Residual



El gráfico de la Fig. 5.2 para el comportamiento del silicio sigue los movimientos a largo plazo de la serie, real (actual) y la tendencia propuesta (fitted).

El modelo se ajusta bien ya que los residuales entre los valores pronosticados y los datos históricos son pequeños, tienen una distribución aleatoria y son independientes.

El error porcentual absoluto medio MAPE nos arrojó un valor de un 17,74%, es decir, el modelo para el comportamiento del silicio para el Altos Hornos N° 2 posee un error de dicho valor.

5.1.2 Modelo para el Alto Horno N°1

Para el Alto Horno N°1 se eligió la Salida N° 3 que se muestra a continuación:

Fig. 5.3: Salida N° 3 para el Alto Horno N°1

Dependent Variable: SI Method: Least Squares				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SI(-1)	0.487884	0.017623	27.68446	0.0000
SI(-3)	0.165378	0.016326	10.12983	0.0000
TA	0.003579	0.000159	22.51136	0.0000
TA(-1)	-0.002663	0.000166	-16.04042	0.0000
TVI	0.000375	0.000237	1.580050	0.0000
R	-0.362041	0.043845	-8.257278	0.0000
C	-0.725574	0.337521	-2.149712	0.0317
R-squared	0.544627	Mean dependent var	0.620047	
Adjusted R-squared	0.543510	S.D. dependent var	0.192988	
S.E. of regression	0.130391	Akaike info criterion	-1.233712	
Sum squared resid	41.58631	Schwarz criterion	-1.217146	
Log likelihood	1520.147	F-statistic	487.5699	
Durbin-Watson stat	2.175545	Prob(F-statistic)	0.000000	

Se escogió la Salida N° 3 La cual indica que el silicio presenta más de un desfase por lo que el modelo de retardos distribuidos se distribuye a lo largo de tres períodos. En esta salida también se presenta un desfase en la temperatura de arrabio con un retardo de tiempo $t = 1$.

Esta salida presenta un mejor R^2 ajustado = 0.54, el cual indica que en un 54% la variación del silicio es explicado por las variaciones de las variables temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, razón y por los silicios con retardos de tiempo 1 y 3.

Por lo tanto el modelo a generar para el Alto Horno N°1 será el siguiente:

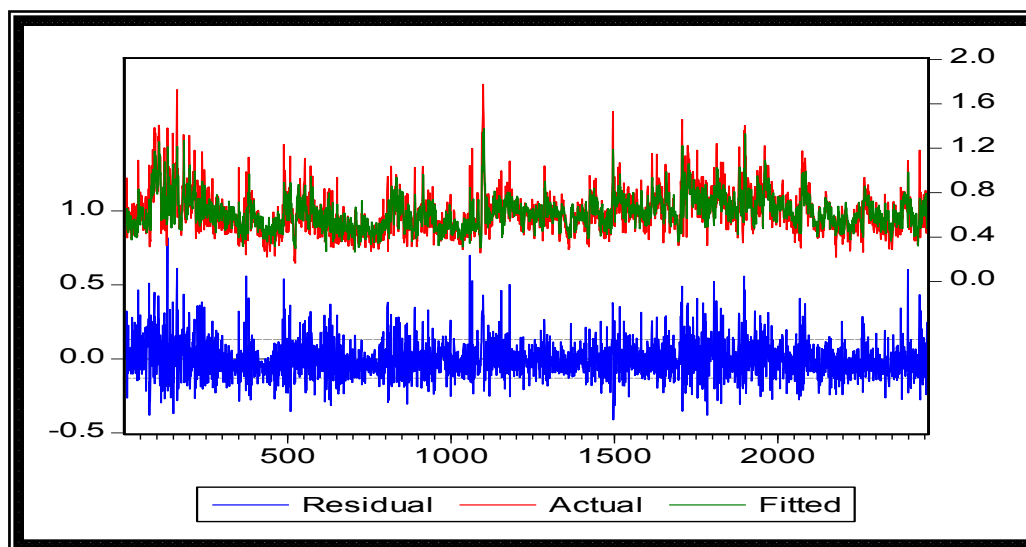
$$y_t = \alpha_1 * TA - \alpha_2 * TA(-1) + \beta_1 y_{t-1} + \beta_3 y_{t-3} + \gamma_1 * TVI - \delta_1 * R - c$$

Donde y_t es el silicio, TA es la temperatura de arrabio, $TA(-1)$ es la temperatura de arrabio con un desfase, y_{t-1} es el silicio con un desfase, y_{t-3} es el silicio con tres desfase, TVI es la temperatura de viento insuflado, R es la razón coque/mineral, y c es una constante.

Para este modelo α_1 , α_2 , β_1 , β_3 , γ_1 , y δ_1 son constantes.

A continuación se muestra el Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 2 y su Gráfico de Residual.

Fig. 5.4: Gráfico del modelo para Altos Hornos N° 1 y su Gráfico de Residual



El gráfico de la Fig. 5.4 para el comportamiento del silicio muestra un buen grado de acompañamiento de la serie real (actual) y la tendencia propuesta (fitted). No presentando valores demasiados alejados.

El modelo se ajusta bien ya que los residuales entre los valores pronosticados y los datos históricos son pequeños, tienen una distribución aleatoria y son independientes. Además estos se muestran alrededor de la media.

El error porcentual absoluto medio MAPE nos arrojó un valor de un 17,80%, es decir, el modelo para el comportamiento del silicio está errado en dicho valor, lo que nos indica que el modelo es bastante bueno dado que son una gran cantidad de datos.

5.2 Validación

Cuando se valida un modelo, se establece que el modelo es una representación creíble del sistema real. Para esta etapa se usaron datos actuales de

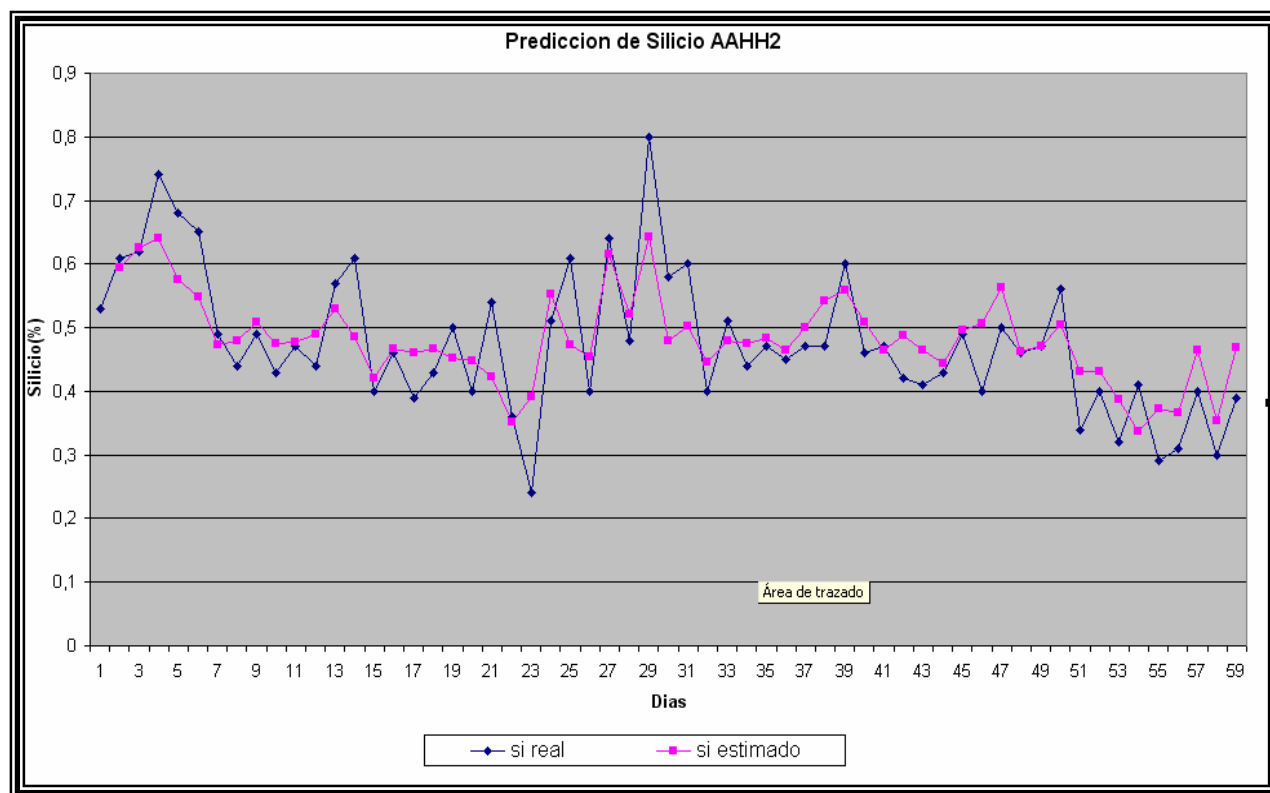
silicio, temperatura de arrabio, temperatura de viento insuflado, etc. de los días 06/06/2007 al 10/06/2007.

Se hizo un seguimiento para el comportamiento del silicio, en el cual se analizó el modelo escogido. Si el modelo se comporta de acuerdo a la realidad se podrá utilizar para experimentar con distintas situaciones a fin de observar los cambios en las respuestas del modelo. Para mayor detalle consultar Anexo 5: "seguimiento del Silicio".

A continuación se muestran los gráficos para las predicciones de cada Alto Horno.

5.2.1 Grafico de Predicción para el Alto Horno N°2

Fig. 5.5: Grafico de Predicción del Modelo del Silicio para el Alto Horno N°2



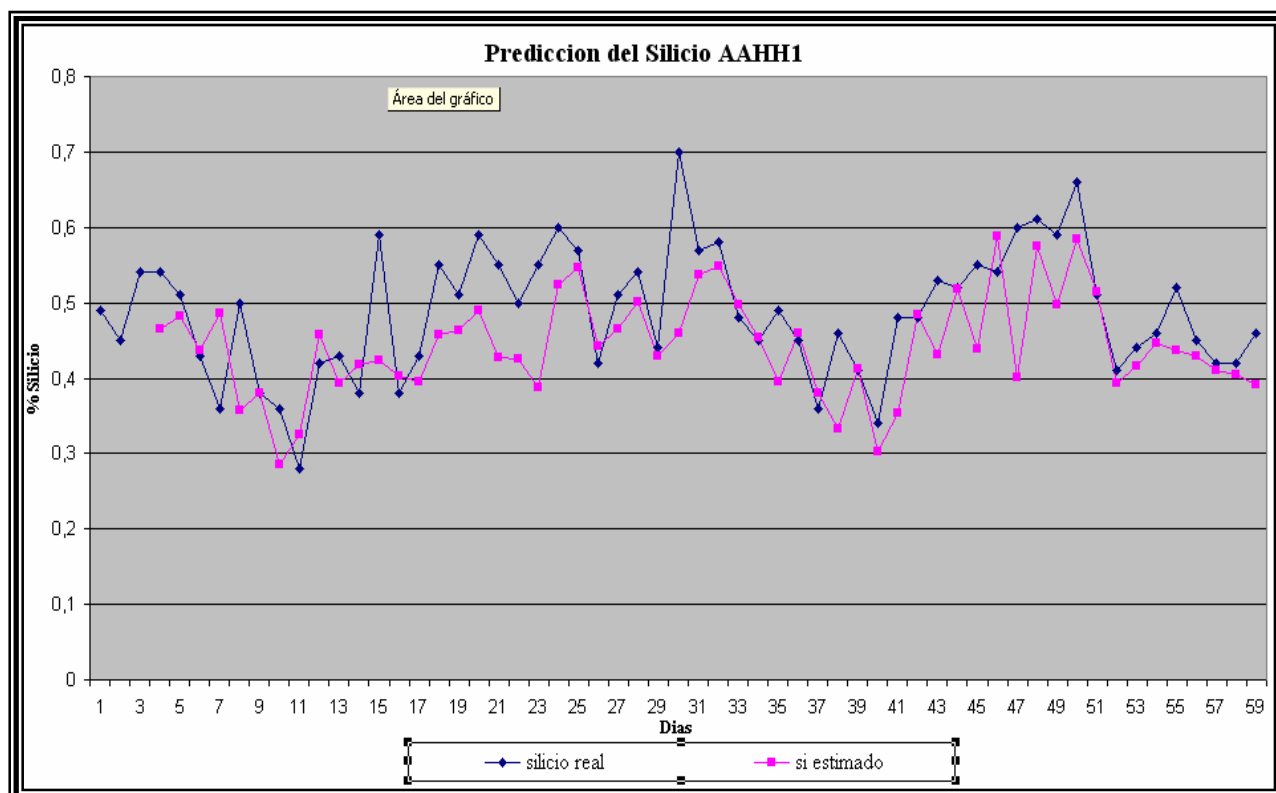
Del gráfico de la Fig. 5.5 se aprecian dos series de tiempo para el silicio, la primera (azul) corresponde a la serie de tiempo para el silicio real, es decir el silicio que se obtiene mediante el análisis químico del arrabio durante la colada.

La serie de tiempo para el silicio real fluctúa entre 0.24% a 0.8%, los cuales no cumplen con las especificaciones que se requieren, por lo cual se tiene que utilizar el método de los seis puntos para tomar alguna acción, si es que se necesita.

La serie de tiempo estimada fluctúa entre los valores de 0.35 % a 0.64%, los cuales cumplen con las especificaciones requeridas.

5.2.2 Grafico de Predicción para el Alto Horno N°1

Fig. 5.6: Gráfico de Predicción del Modelo del Silicio para el Alto Horno N°1



El gráfico de la Fig. 5.6 muestra dos series de tiempo para el silicio, la primera (azul) muestra la serie de tiempo real la cual fluctúa entre los valores 0.28% a 0.7%, los cuales no cumplen con las especificaciones requeridas.

La segunda serie de tiempo para el silicio fluctúa entre los valores 0.28% a 0.58%, el valor 0.28% es más bajo de lo requerido (0.35%), en cambio 0.58% cae en el rango de cumplir con lo requerido.

Los rangos de diferencia entre la serie de tiempo real y estimada para cada Alto Horno son relativamente bajas, se puede apreciar directamente de los modelos, como también del error porcentual absoluto MAPE. El cual fue medido en ambos Altos Hornos. Para mayor detalle consultar Anexo 5: "seguimiento del Silicio".

Para el Alto Horno N°2 el MAPE que se arrojó fue de un 12,04%, en cambio para el Alto Horno N° 1 el MAPE que se obtuvo fue de un 11,68%.

Esto significa que ambos son buenos modelos para predecir el comportamiento del silicio, ya que su porcentaje de error para una gran cantidad de datos es bastante aceptable.

5.3 Test de residuos

Estos test tiene la finalidad de demostrar que los modelos obtenidos para ambos Altos Hornos explican adecuadamente el comportamiento del silicio.

5.3.1 Test Residuos Alto Horno N°2

Fig. 5.7: Test de residuos para el Alto Horno N°2

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.022	0.022	1.8036	0.000
		2	0.078	0.078	24.138	0.000
		3	0.129	0.126	84.371	0.000
		4	0.120	0.113	137.04	0.000
		5	0.114	0.097	184.33	0.000
		6	0.068	0.038	201.01	0.000
		7	0.122	0.085	255.18	0.000
		8	0.108	0.071	298.09	0.000
		9	0.099	0.060	334.07	0.000
		10	0.119	0.075	386.15	0.000
		11	0.119	0.072	437.73	0.000
		12	0.109	0.057	481.13	0.000
		13	0.093	0.037	512.94	0.000
		14	0.095	0.032	545.96	0.000
		15	0.072	0.004	564.76	0.000
		16	0.059	-0.010	577.43	0.000
		17	0.073	0.005	596.96	0.000
		18	0.093	0.030	628.36	0.000
		19	0.071	0.012	646.77	0.000
		20	0.063	0.003	661.50	0.000
		21	0.100	0.038	698.04	0.000
		22	0.071	0.012	716.51	0.000
		23	0.061	0.002	730.02	0.000
		24	0.059	-0.001	742.68	0.000
		25	0.057	-0.003	754.60	0.000
		26	0.091	0.039	785.29	0.000
		27	0.046	0.000	792.93	0.000
		28	0.055	0.003	804.21	0.000
		29	0.055	-0.000	815.43	0.000
		30	0.048	-0.006	823.72	0.000
		31	0.088	0.038	852.22	0.000
		32	0.034	-0.011	856.59	0.000
		33	0.066	0.016	872.57	0.000
		34	0.036	-0.012	877.44	0.000
		35	0.062	0.016	891.81	0.000
		36	0.045	-0.001	899.39	0.000

5.3.2 Test Residuos Alto Horno N°1

Fig. 5.8: Test de residuos para el Alto Horno N°1

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.089	-0.089	19.237	0.000
		2	0.061	0.053	28.258	0.000
		3	-0.036	-0.027	31.503	0.000
		4	0.017	0.008	32.192	0.000
		5	0.072	0.079	44.998	0.000
		6	0.017	0.028	45.750	0.000
		7	0.061	0.059	55.056	0.000
		8	0.037	0.051	58.449	0.000
		9	0.041	0.042	62.562	0.000
		10	0.033	0.035	65.277	0.000
		11	0.038	0.039	68.866	0.000
		12	0.069	0.067	80.682	0.000
		13	0.042	0.044	84.999	0.000
		14	0.038	0.032	88.640	0.000
		15	0.013	0.009	89.084	0.000
		16	0.076	0.065	103.18	0.000
		17	0.045	0.043	108.18	0.000
		18	0.059	0.047	116.76	0.000
		19	0.054	0.049	123.87	0.000
		20	0.035	0.029	126.84	0.000
		21	0.080	0.066	142.57	0.000
		22	0.034	0.033	145.46	0.000
		23	0.058	0.039	153.82	0.000
		24	0.024	0.013	155.30	0.000
		25	0.005	-0.019	155.36	0.000
		26	0.055	0.027	162.84	0.000
		27	0.032	0.017	165.38	0.000
		28	0.014	-0.021	165.87	0.000
		29	0.023	-0.007	167.22	0.000
		30	0.037	0.012	170.70	0.000
		31	0.043	0.015	175.20	0.000
		32	0.038	0.014	178.86	0.000
		33	0.056	0.034	186.76	0.000
		34	0.027	0.008	188.56	0.000
		35	0.053	0.027	195.60	0.000
		36	0.005	-0.010	195.66	0.000

De las Figuras 5.7 y 5.8 se observan los test de residuos para cada Alto Horno, los cuales por medio de los correlograma respectivos, muestran el valor del estadístico L Jung-Box obteniendo por medio de las autocorrelaciones de los residuos para ambos modelos un valor igual a son cero. Es decir, los residuos no presentan ningún coeficiente significativo por lo tanto son independientes entre sí.

5.4 La predicción del futuro

El objetivo final del análisis de series temporales fue predecir los resultados futuros del comportamiento del silicio.

A continuación se muestran los dos modelos de predicción para el comportamiento del silicio en el proceso de obtención de arrabio.

Modelo de Predicción para el Silicio en el Alto Horno N°2

$$y_t = 0.003148 * TA - 0.002053 * TA(-1) + 0.505220 * Si(-1) - 0.000808 * TVI - 0.021460 * R - 0.472813$$

Modelo de Predicción para el Silicio en el Alto Horno N°1

$$y_t = 0.003579 * TA - 0.002663 * TA(-1) + 0.487884 * Si(-1) + 0.165378 * Si(-3) + 0.000375 * TVI - 0.362041 * R - 0.725574$$

Toda predicción que hagamos con dichos modelos, se basará en una hipótesis fundamental que podemos resumir diciendo: el modelo que se ha explicado en el pasado para el comportamiento del silicio, sigue siendo válido, con los mismos valores de los parámetros, en el futuro. Si por alguna razón cambiasen de manera significativa las condiciones en los Altos Hornos como un factor importante, se podría suponer una alteración del modelo.

Entonces los modelos observados en el pasado no servirían para predecir el futuro del comportamiento del silicio. En definitiva, para predecir la evolución futura del comportamiento del silicio, no basta con encontrar y estimar un modelo de retardos distribuidos que sea adecuado para explicar el pasado más reciente, sino que es necesario contrastar que ese modelo de comportamiento no cambie a lo largo del tiempo.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Del estudio realizado para la identificación y análisis del comportamiento del silicio en proceso de obtención de arrabio en los Altos Hornos de la Compañía Siderúrgica Huachipato, es posible concluir:

- ❖ Las variables más relevantes e importantes para la predicción del comportamiento del silicio en el arrabio son:
 - Variable a nivel de Carga :La Razón Mineral /Coque
 - Variable a nivel de Toberas: La Temperatura de Viento Insuflado
 - Variable a nivel de Toberas: Combustible
 - Variable de Estado Térmico del Horno: La Temperatura de Arrabio.

- ❖ Las series de tiempo para todas las variables de este estudio, y en particular para la serie de tiempo silicio cumplen con la condición de ser series estacionarias en sentido débil, es decir la media, la varianza, las autocorrelaciones no dependen del tiempo.

- ❖ El modelo que se generó para el comportamiento del silicio es un modelo uní variado, es decir posee una salida correspondiente al silicio.

- ❖ Con respecto a la función de correlación entre el silicio y la temperatura de arrabio se presenta una relación positiva entre estas dos variables, en cambio para la temperatura de viento insuflado, combustible y la razón coque/mineral, la relación que existe entre estas variables y el silicio es negativa.

- ❖ La función de autocorrelación y la función de autocorrelación parcial de la serie de tiempo silicio nos mostró que para el Alto Horno N°2 se presenta un desfase de tiempo o rezago, en cambio para el Alto Horno N°1 se presenta más de un rezago.
- ❖ Se eliminó la variable a nivel de toberas: Combustible, para ambos Altos Hornos, ya que estadísticamente es cero, o en otras palabras no es significativa para el modelo.
- ❖ El modelo para el comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2 obedece a un modelo de retardos distribuidos de primer orden es decir RD(1). El cual está compuesto por la temperatura de arrabio, la temperatura de viento insuflado, la razón coque/mineral, el silicio con un desfase, la temperatura de arrabio con un desfase y por una constante externa c .
- ❖ El modelo para el comportamiento del silicio en el Alto Horno N°2 obedece a un modelo de retardos distribuidos de tercer orden es decir RD(3). El cual está compuesto por la temperatura de arrabio, la temperatura de viento insuflado, la razón coque/mineral, el silicio con dos desfases uno para el rezago uno y otro para el rezago tres, la temperatura de arrabio con un desfase y por una constante externa c .
- ❖ Se realizó un seguimiento para el comportamiento del silicio en ambos hornos con el fin de observar las predicciones en los modelos obtenidos de retardos distribuidos, los cuales arrojaron resultados bastante similares a la realidad, con porcentajes de error de 12,04 % para el Alto Horno N°2 y 11,69 % para el Alto Horno N°1. Esto quiere decir que se logró un mejor ajuste en los modelos, ya que se logró mejorar los porcentajes de error obtenidos con los datos reales.

- ❖ Los modelos para el comportamiento del silicio presentaron un buen ajuste por lo que pueden ser utilizados para predicción, es decir por medio de los correlogramas se mostró que las autocorrelaciones de los residuos son cercanas a cero, lo que indica que los valores sucesivos de las series de tiempo para el comportamiento del silicio no están relacionados entre sí. Es decir son independientes. Así mismo los modelos de retardos distribuidos demuestran que son una herramienta eficaz en el estudio de los modelos de series de tiempo.

6.2 Recomendaciones

- ❖ Se recomienda hacer seguimientos para el silicio, de modo de estar siempre atentos a cualquier cambio que se presente en este, como también de las condiciones en los Altos Hornos, ya sea con los minerales que son ingresados, como las variables que intervienen en el proceso de obtención de arrabio. Por lo que el modelo de predicción podría sufrir alguna alteración.
- ❖ Se recomienda realizar estratificaciones de los datos, con el objetivo de agruparlos y limitarlos de manera de mejorar la exactitud de los modelos, ya que se podría reducir aún más los errores de cálculos en ambos en ambos Altos Hornos. Agrupar los datos cuando el % de silicio sea alto o bajo, es decir para instantes de tiempo donde los hornos estén calientes y estén fríos.

Bibliografía

A. Publicaciones

- ❖ Geerdes, Maarten; Lingiardi, Oscar; Toxopeus, Hisco; Van der Vliet, Cor “Introducción al Proceso del Alto Horno”. Primera edición. San Nicolás 2005.
- ❖ Durrer, Roberto. “Beneficio de los Minerales de Hierro” editorial Labor, S.A. Barcelona-Madrid.

B. Libros

- ❖ Damodar N. Gujarati, Econometría, editorial Emma Ariza Herrera 1997 (Colombia).
- ❖ G.S.Maddala, Econometría, 1993 (México).
- ❖ J. Johnston, Métodos de la Econometría, Editorial Vicens Vives 1987(España).
- ❖ Montgomery, Douglas; Runger,George. “Probabilidad y Estadística Aplicadas a la ingeniería”.
- ❖ Walpole, Ronald E. Probabilidad y Estadística para ingenieros. Sexta edición, ediciones Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1999.
- ❖ George E.P.Box, Gwilym M.Jenkins, Editorial Prentice-Hall 1994(Brazil) Time Series Analysis Forecasting and Control.
- ❖ Reinaldo Castro, Maria Camargo,editorial Editorial Santa Maria 1996, Análise e Previsto de Séries Temporais os Modelos ARIMA

C. Manuales

- ❖ Altos Hornos
- ❖ Descripción de las Instalaciones de los Altos hornos de la Planta de Huachipato.

D. Páginas Web

- ❖ http://meveus.iehk.rwth-aachen.de/lecture_book/textbook_html/
- ❖ <http://www.infoacero.cl/acero/parrabio.htm>
- ❖ http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/comp_col_get/lade/econom-etria_II/evaluaciones/sol_2eval_parce_general_2006.pdf
- ❖ http://www.usc.es/econo/RGE/Vol15_2/castelan/art8c.pdf
- ❖ <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bVrevistas/biologia/v14n1/pdf/v14n01a20.pdf>
- ❖ http://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/7049/7049992/tema_09.pdf
- ❖ http://books.google.com/books?id=IWDhou2daLIC&pg=PT966&lpg=PT966&dq=modelos+con+retardos+distribuidos&source=web&ots=_piuoWgxWE&sig=VX6ZmovrHI8LPAU-e6CBMJijjaY
- ❖ http://www.ine.es/revistas/estaespa/37_1.pdf
- ❖ http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec4_7.html

ANEXO A: Método de los Seis Puntos

La Compañía Siderúrgica Huachipato cuenta con un método de control para la calidad del arrabio. Este tuvo su origen en la asesoría proporcionada por Nippon Kokan de Japón (NKK).

Básicamente, el método sistematiza las acciones correctivas, considerando la desviación del contenido de silicio en el arrabio. Esta metodología denominada de seis puntos, intenta mantener el estado estacionario del silicio alrededor de un valor específico.

El funcionamiento básico del método de los seis puntos consiste en aplicar un puntaje e incrementarlo a medida que la variable se aleje de su referencia.

Este método ha sido aplicado, desde 1979, al proceso de altos hornos, el cual se utiliza en combinación con acciones de control manual.

ANEXO B: Definiciones

❖ Carros Torpedo

Son carros donde se deposita el arrabio, los cuales son trasladados a acería, cada carro es capaz de contener aprox.150 toneladas de arrabio.

❖ Chatarra o Scrap

Material ferroso (que contiene hierro) que por lo general es refundido y vaciado para formar acero nuevo. Las acerías integradas utilizan chatarra en un porcentaje de hasta 25% de la alimentación de su horno al oxígeno.

❖ Convertidor al Oxígeno

Es un horno periforme recubierto interiormente con ladrillos refractarios que refina y convierte en acero el arrabio fundido y chatarra. Hasta el 30% de la carga en este horno puede constituirlo la chatarra, el resto es arrabio. Su proceso consiste en depositar la chatarra al interior del horno, luego vaciar el metal fundido proveniente del alto horno. Se inyecta oxígeno a través de una lanza a alta presión a objeto de causar reacciones químicas que separen las impurezas como gases y escoria. Una vez refinado, el acero líquido es vaciado en una cuchara agregándole las ferroaleaciones y separado de la escoria.

❖ Óxidos de hierro

Existen tres tipos de óxidos de hierro : Hematita (Fe_2O_3), que se transforma en Magnetita (Fe_3O_4), la cual se transforma en Wustita (FeO), para finalmente ésta transformarse en Fe.

❖ Modelo de los Seis Puntos

Este método consiste en una escala de puntuación de +6 y -6 para el elemento silicio dependiendo del cual se toman las acciones, ya sea en cuanto a

temperatura y combustible, como a cantidad de carga, esto va a depender de cuan frío o caliente este el horno.

❖ **Patio de colada**

En cada horno existe un patio de colada, en los cuales sacan arrabio líquido el cual fluye por una canal el cual es depositado en un carro torpedo para ser trasladado a acería.

❖ **Raceway**

Es una especie de bolsón que en el se generan los gases calientes, los cuales permiten fundir la carga metálica y al mismo tiempo producir las reacciones químicas que tienen lugar en el alto horno.

❖ **Toberas**

Una tobera es un recipiente de cobre refrigerado por agua a través de las cuales se sopla el aire caliente hacia el interior del horno.

ANEXO C: Estacionariedad de las Variables

Para cada Alto Horno se realizó la prueba de estacionariedad con el test de Dickey–Fuller.

Alto Horno N°2

Fig. c.1: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para la temperatura de arrabio

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (TA)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-14.57339	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.431964	
5% level	-2.862138	
10% level	-2.567132	

Según la Fig. A.3.1 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico ADF = -14.57339 es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie temperatura de arrabio es estacionaria.

Fig. A.3.2: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para el combustible alquitrán

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (COMB)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.551283	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.431959	
5% level	-2.862136	
10% level	-2.567131	

Según la Fig. A.3.2 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico ADF = -4.551283 es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie alquitrán es estacionaria.

Fig. A.3.3: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para la temperatura de viento insuflado

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (TVI)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-6.246950	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.431959	
5% level	-2.862136	
10% level	-2.567131	

Según la Fig. A.3.3 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico $ADF = -6.246950$ es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie temperatura de viento insuflado es estacionaria.

Fig. A.3.4: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad
la razón coque/mineral

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (R)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-8.324313	0.0000
Test critical values:	1% level	-3.431965
	5% level	-2.862139
	10% level	-2.567132

Según la Fig. A.3.4 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico $ADF = - 8.324313$ es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie razón coque/mineral es estacionaria.

Alto Horno N°1

Fig. A.3.5: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para el silicio

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Dependent Variable: D(SI)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-13.05196	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.432823	
5% level	-2.862518	
10% level	-2.567336	

Según la Fig. A.3.5 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico ADF = -13.05196 es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie silicio es estacionaria.

Fig. A.3.6: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para la temperatura de arrabio

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (TA)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-14.95970	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.432819	
5% level	-2.862517	
10% level	-2.567335	

Según la Fig. A.3.6 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico $ADF = -14.95970$ es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie temperatura de arrabio es estacionaria.

Fig. A.3.7: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para la temperatura de viento insuflado

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (TVI)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-7.540403	0.0000
Test critical values:		
1% level	-3.432819	
5% level	-2.862517	
10% level	-2.567335	

Según la Fig. A.3.7 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico $ADF = -7.540403$ es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie temperatura de viento insuflado es estacionaria.

Fig. A.3.8: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para el combustible petróleo

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (COMB)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-8.433706	0.0000
Test critical values: 1% level	-3.432819	
5% level	-2.862517	
10% level	-2.567335	

Según la Fig. A.3.8 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico ADF = - 8.433706 es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie petróleo es estacionaria.

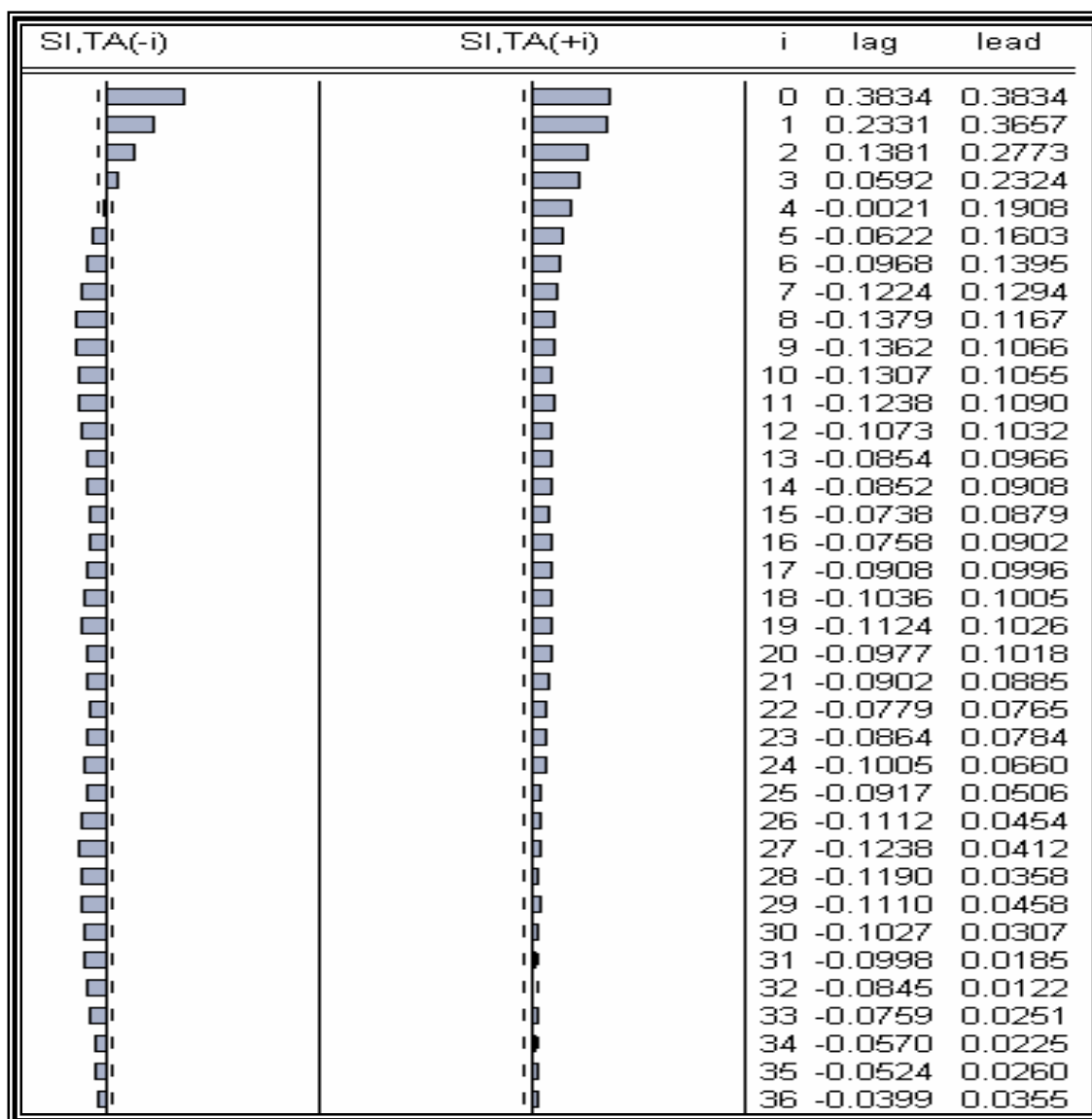
Fig. A.3.9: Test de Dickey–Fuller para prueba de estacionariedad para la razón coque/mineral

Augmented Dickey-Fuller Test Equation		
Variable: (R)		
Method: Least Squares		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-4.991595	0.0000
Test critical values: 1% level	-3.432819	
5% level	-2.862517	
10% level	-2.567335	

Según la Fig. .A 3.9 el resultado del test conduce a rechazar la hipótesis nula, pues el valor del estadístico $ADF = -4.991595$ es superior a los valores críticos (t-Statistic), en todos los niveles de significación. Es decir para valores con 1%,5%,10% de significancia. Por tanto, la serie razón coque/mineral es estacionaria.

ANEXO D: Correlación Cruzada para el Alto Horno N°1

Fig. A.4.1: Correlación Cruzada entre el Silicio y Temperatura de Arrabio



Según la figura A.4.1 muestra que para el caso de la correlación cruzada entre la temperatura de arrabio y el silicio, se puede observar que la función de correlación cruzada tiene un decaimiento exponencial, existiendo, al parecer una correlación

positiva entre estas dos variables, principalmente en los primeros rezagos. No existiendo un valor que sea mucho mayor que los otros.

Fig. A.4.2: Correlación Cruzada entre el Silicio y Temperatura de Viento Insuflado

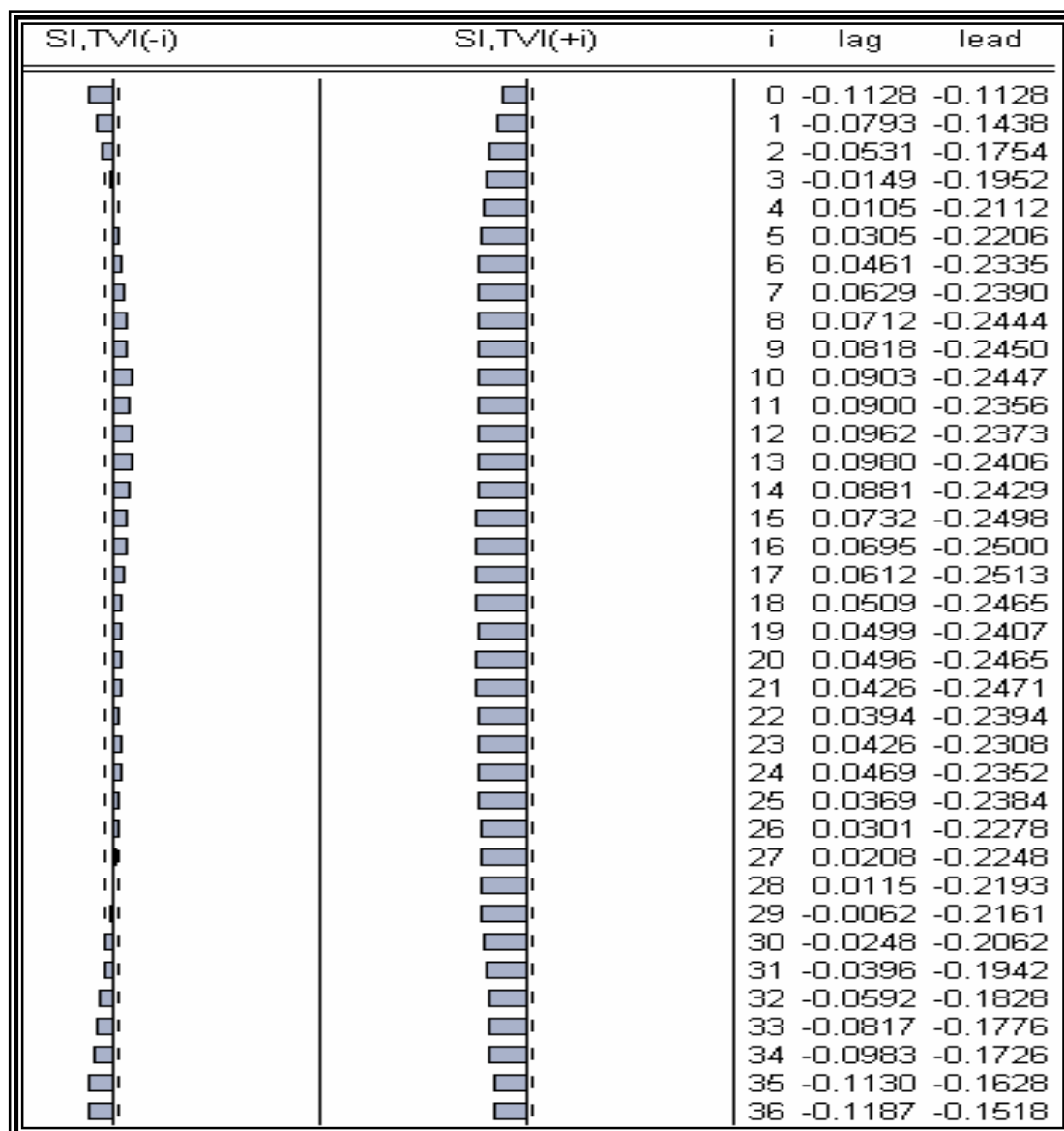


Fig. A.4.3: Correlación Cruzada entre el Silicio y la Razón Coque/Mineral

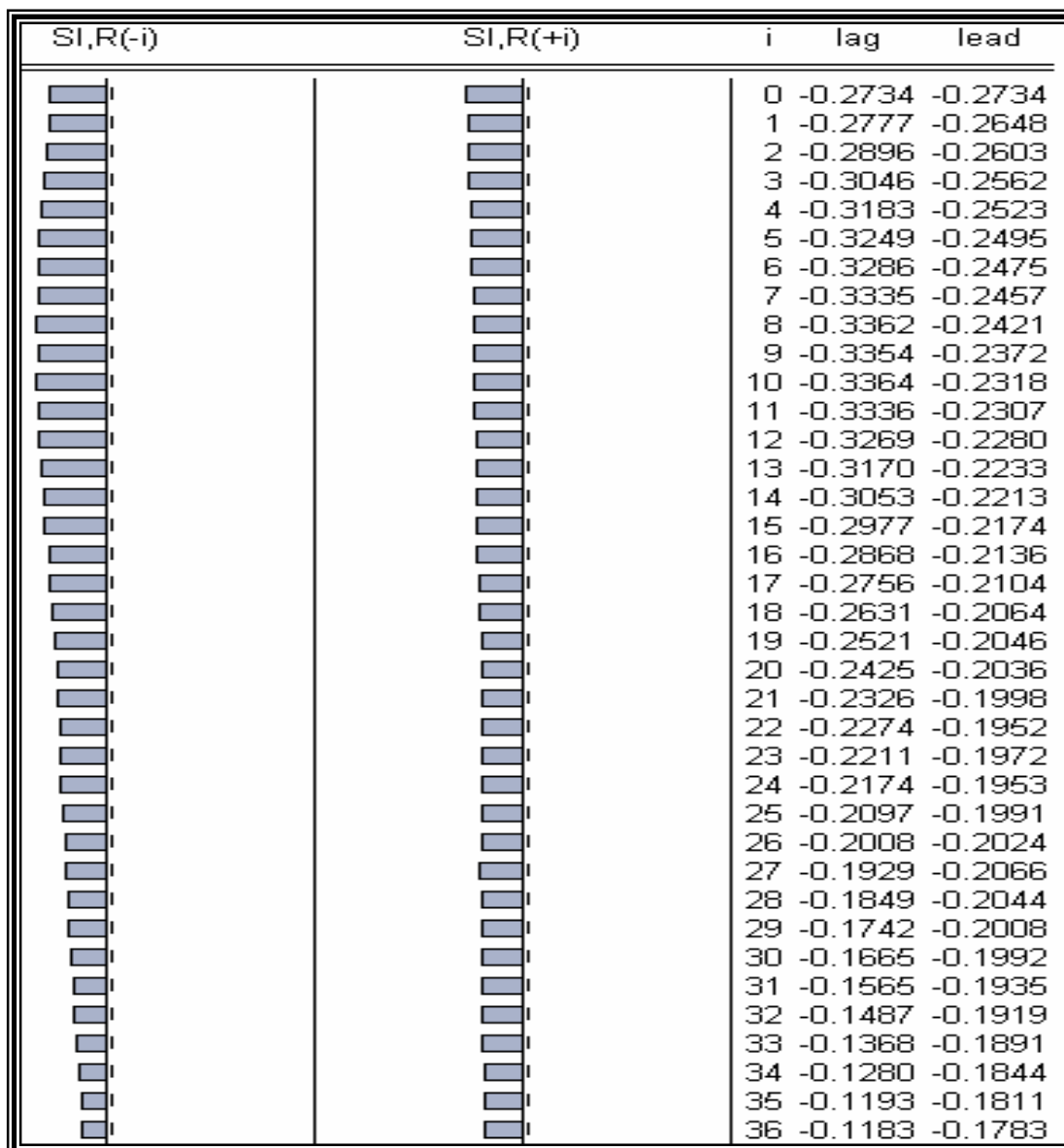
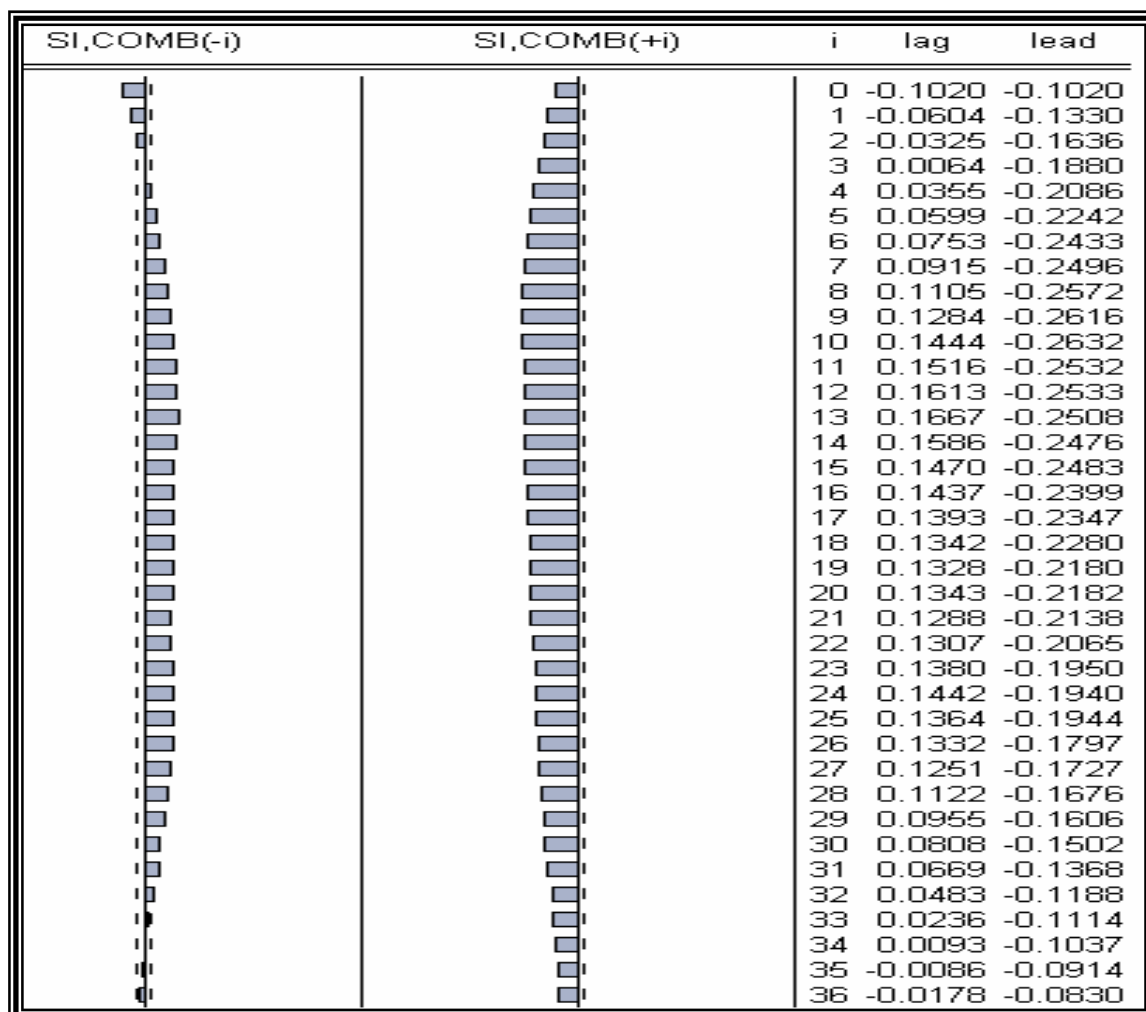


Fig. A.4.4: Correlación Cruzada entre el Silicio y el Combustible Petróleo



Las Fig. A.4.2, A.4.3, A.4.4 para las variables a nivel de tobera como para la variable de carga se desprende que tanto para la correlación cruzada entre la temperatura de viento y el silicio, la correlación cruzada entre el petróleo y el silicio, como la correlación cruzada entre la razón coque/mineral y el silicio se puede observar que la función de correlación cruzada de estas gráficas en conjunto presentan un decaimiento exponencial, existiendo, una correlación negativa entre estas variables, principalmente en los primeros rezagos. No existiendo un valor que sea mucho mayor que los otros.

ANEXO E: Seguimiento del Silicio

Datos para el seguimiento del silicio en Altos Hornos desde los días 06/06/2007 hasta 10/06/2007

Alto Horno N°2

Fecha	TA	TVI	R	silicio real	silicio estimado	MAPE
06/06/2007	1472	1070	1,628	0,53		
06/06/2007	1485	1070	1,620	0,61	0,5936010	2,68836
06/06/2007	1495	1070	1,620	0,62	0,6253861	0,86873
06/06/2007	1510	1070	1,618	0,74	0,6394990	13,5812
06/06/2007	1505	1070	1,617	0,68	0,57505688	15,4328
06/06/2007	1491	1070	1,632	0,65	0,54771828	15,7356
06/06/2007	1478	1070	1,632	0,49	0,47198674	3,67618
06/06/2007	1471	1070	1,611	0,44	0,47964138	9,0094
06/06/2007	1477	1070	1,627	0,49	0,50841022	3,75719
06/06/2007	1482	1070	1,623	0,43	0,47417094	10,2723
06/06/2007	1484	1070	1,621	0,47	0,47761736	1,62071
06/06/2007	1480	1070	1,624	0,44	0,489432	11,2345
07/06/2007	1486	1070	1,630	0,57	0,529	7,19298
07/06/2007	1481	1070	1,630	0,61	0,4852297	20,4541
07/06/2007	1458	1070	1,625	0,4	0,42012088	5,03022
07/06/2007	1456	1070	1,622	0,46	0,46700332	1,52246
07/06/2007	1460	1070	1,628	0,39	0,46130922	18,2844
07/06/2007	1472	1070	1,623	0,43	0,46645478	8,47786
07/06/2007	1475	1070	1,617	0,5	0,45126728	9,74654
07/06/2007	1461	1070	1,632	0,4	0,44846112	12,1153
07/06/2007	1467	1070	1,628	0,54	0,42198522	21,8546
07/06/2007	1440	1070	1,623	0,36	0,3506991	2,58358
07/06/2007	1430	1075	1,635	0,24	0,39239552	63,4981
07/06/2007	1461	1095	1,618	0,51	0,55285526	8,40299
07/06/2007	1489	1095	1,639	0,61	0,47300316	22,4585
08/06/2007	1466	1096	1,624	0,4	0,45321568	13,3039
08/06/2007	1477	1090	1,642	0,64	0,61638128	3,69042
08/06/2007	1496	1085	1,612	0,48	0,52137972	8,62078
08/06/2007	1504	1085	1,628	0,8	0,64322612	19,5967

08/06/2007	1494	1075	1,628	0,58	0,48018226	17,21
08/06/2007	1471	1075	1,629	0,6	0,50296166	16,1731
08/06/2007	1459	1071	1,629	0,4	0,44624966	11,5624
08/06/2007	1465	1070	1,629	0,51	0,48006186	5,87022
08/06/2007	1462	1070	1,629	0,44	0,476018	8,18591
08/06/2007	1470	1070	1,630	0,47	0,484	2,97872
08/06/2007	1473	1070	1,630	0,45	0,46393228	3,09606
09/06/2007	1472	1071	1,632	0,47	0,50127368	6,65397
09/06/2007	1480	1071	1,632	0,47	0,54238606	15,4013
09/06/2007	1498	1070	1,629	0,6	0,55841136	6,93144
09/06/2007	1494	1070	1,634	0,46	0,50861332	10,5681
09/06/2007	1498	1070	1,628	0,47	0,46410032	1,25525
09/06/2007	1485	1070	1,648	0,42	0,4882725	16,2554
09/06/2007	1492	1070	1,615	0,41	0,46512188	13,4444
09/06/2007	1491	1070	1,642	0,43	0,44295172	3,01203
09/06/2007	1480	1070	1,628	0,49	0,49567624	1,15842
09/06/2007	1480	1070	1,636	0,4	0,50712796	26,782
09/06/2007	1498	1070	1,624	0,5	0,56370244	12,7405
09/06/2007	1512	1071	1,636	0,46	0,46208656	0,4536
10/06/2007	1495	1070	1,634	0,47	0,47073144	0,15563
10/06/2007	1485	1070	1,626	0,56	0,50503664	9,81489
10/06/2007	1475	1070	1,636	0,34	0,43013678	26,5108
10/06/2007	1480	1070	1,637	0,4	0,43149012	7,87253
10/06/2007	1474	1070	1,628	0,32	0,3876076	21,1274
10/06/2007	1469	1070	1,630	0,41	0,3363104	17,9731
10/06/2007	1435	1070	1,630	0,29	0,37284016	28,5656
10/06/2007	1445	1075	1,634	0,31	0,36545526	17,8888
10/06/2007	1446	1075	1,639	0,4	0,46464406	16,161
10/06/2007	1465	1080	1,639	0,3	0,35335804	17,786
10/06/2007	1458	1080	1,626	0,39	0,46964824	20,4226
					MAPE	12,0469

Alto Horno N°1

Fecha	TVI	TA	R	silicio real	silicio estimado	MAPE
06/06/2007	1105	1465	2,464	0,49		
06/06/2007	1105	1500	2,490	0,45		
06/06/2007	1105	1481	2,451	0,54		
06/06/2007	1105	1473	2,474	0,54	0,4655681	13,78368
06/06/2007	1105	1470	2,441	0,51	0,4814674	5,594632
06/06/2007	1105	1458	2,468	0,43	0,4369808	1,623435
06/06/2007	1105	1473	2,459	0,36	0,4868494	35,23595
06/06/2007	1105	1459	2,461	0,5	0,3569611	28,60778
06/06/2007	1105	1440	2,463	0,38	0,3805916	0,155673
06/06/2007	1105	1420	2,475	0,36	0,2851415	20,79402
06/06/2007	1110	1410	2,454	0,28	0,3254846	16,24451
06/06/2007	1120	1456	2,466	0,42	0,4572781	8,875727
07/06/2007	1120	1453	2,452	0,43	0,3941078	8,347017
07/06/2007	1120	1462	2,475	0,38	0,4176295	9,902496
07/06/2007	1120	1469	2,457	0,59	0,4239909	28,13713
07/06/2007	1120	1440	2,463	0,38	0,4034961	6,183189
07/06/2007	1120	1448	2,471	0,43	0,3957342	7,968779
07/06/2007	1120	1455	2,471	0,55	0,4586068	16,61694
07/06/2007	1120	1454	2,460	0,51	0,464186	8,983141
07/06/2007	1120	1464	2,462	0,59	0,4906684	16,83586
07/06/2007	1115	1442	2,485	0,55	0,4273595	22,29828
07/06/2007	1115	1430	2,481	0,5	0,4249303	15,01395
07/06/2007	1115	1430	2,464	0,55	0,3881578	29,42586
08/06/2007	1115	1445	2,464	0,6	0,5233411	12,77649
08/06/2007	1110	1460	2,476	0,57	0,5469869	4,037389
08/06/2007	1110	1443	2,467	0,42	0,4430896	5,497532
08/06/2007	1110	1455	2,470	0,51	0,4653088	8,762978
08/06/2007	1110	1464	2,480	0,54	0,5008916	7,242293
08/06/2007	1110	1453	2,474	0,44	0,4295577	2,373253
08/06/2007	1110	1463	2,479	0,7	0,4589261	34,43913
08/06/2007	1105	1455	2,471	0,57	0,5364966	5,877788
08/06/2007	1105	1474	2,466	0,58	0,5476491	5,577742
08/06/2007	1105	1464	2,496	0,48	0,498278	3,807913
08/06/2007	1105	1460	2,456	0,45	0,4547861	1,063574
09/06/2007	1105	1446	2,473	0,49	0,3961946	19,14395
09/06/2007	1105	1452	2,467	0,45	0,4601005	2,244545
09/06/2007	1105	1442	2,475	0,36	0,3809594	5,822063
09/06/2007	1110	1432	2,486	0,46	0,3323975	27,73967
09/06/2007	1110	1440	2,453	0,41	0,4131482	0,767846
09/06/2007	1110	1420	2,470	0,34	0,3034633	10,7461
09/06/2007	1115	1425	2,483	0,48	0,3541726	26,21403
09/06/2007	1115	1448	2,482	0,48	0,4835715	0,74407
09/06/2007	1115	1453	2,474	0,53	0,4315374	18,57785

09/06/2007	1115	1466	2,460	0,52	0,5173651	0,506712
09/06/2007	1115	1457	2,478	0,55	0,4391395	20,15645
09/06/2007	1115	1485	2,475	0,54	0,5873101	8,761123
10/06/2007	1115	1455	2,470	0,6	0,4006537	33,22439
10/06/2007	1110	1474	2,487	0,61	0,5747493	5,778798
10/06/2007	1109	1464	2,471	0,59	0,497005	15,76186
10/06/2007	1105	1481	2,467	0,66	0,5845912	11,42557
10/06/2007	1105	1465	2,478	0,51	0,5138794	0,760671
10/06/2007	1105	1440	2,486	0,41	0,3941427	3,867641
10/06/2007	1105	1438	2,468	0,44	0,4163477	5,375515
10/06/2007	1105	1448	2,472	0,46	0,4458454	3,07709
10/06/2007	1105	1455	2,473	0,52	0,4371262	15,93726
10/06/2007	1105	1450	2,488	0,45	0,429394	4,579113
10/06/2007	1105	1447	2,463	0,42	0,4101787	2,338405
10/06/2007	1105	1445	2,469	0,42	0,4041236	3,780093
10/06/2007	1105	1445	2,485	0,46	0,3920805	14,76511
					MAPE	11,68179

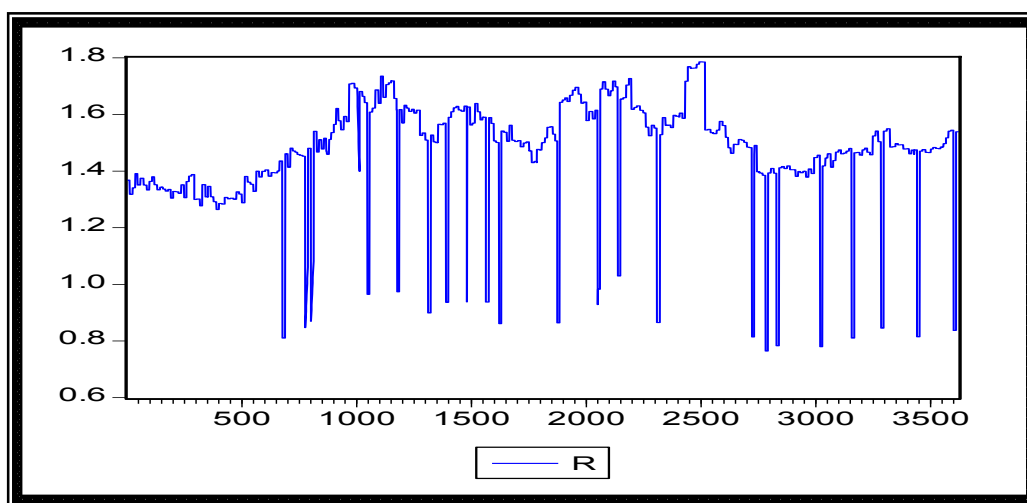
ANEXO Complementario: Gráficos de las Variables Estudiadas

Alto Horno N°2

❖ Variables a nivel de Carga

Fig. A.1

Serie de Tiempo para la razón coque/mineral Alto Horno N°2



❖ Variables a Nivel de Toberas

Fig. A.2

Serie de Tiempo para la temperatura de viento insuflado Alto Horno N°2

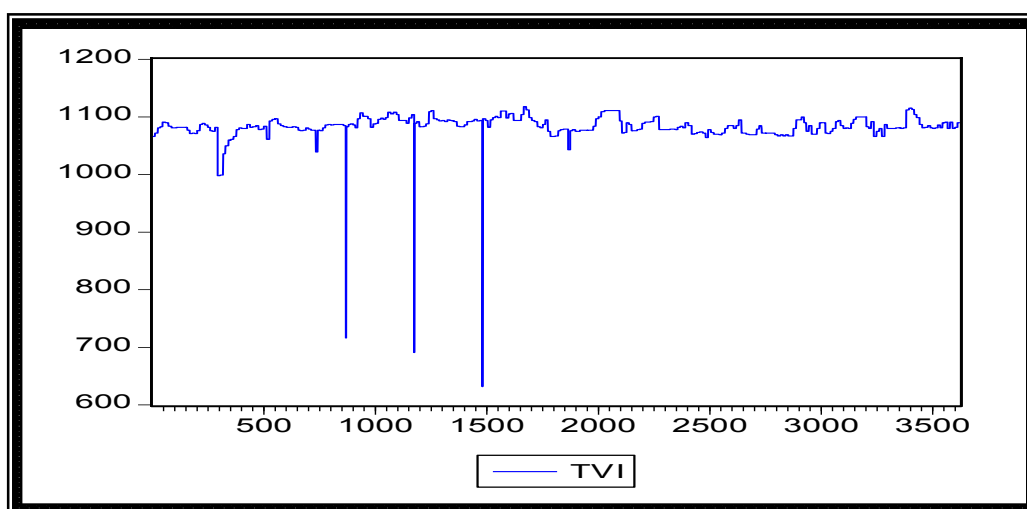


Fig. A.3

Serie de Tiempo para el volumen de viento insuflado Alto Horno N°2

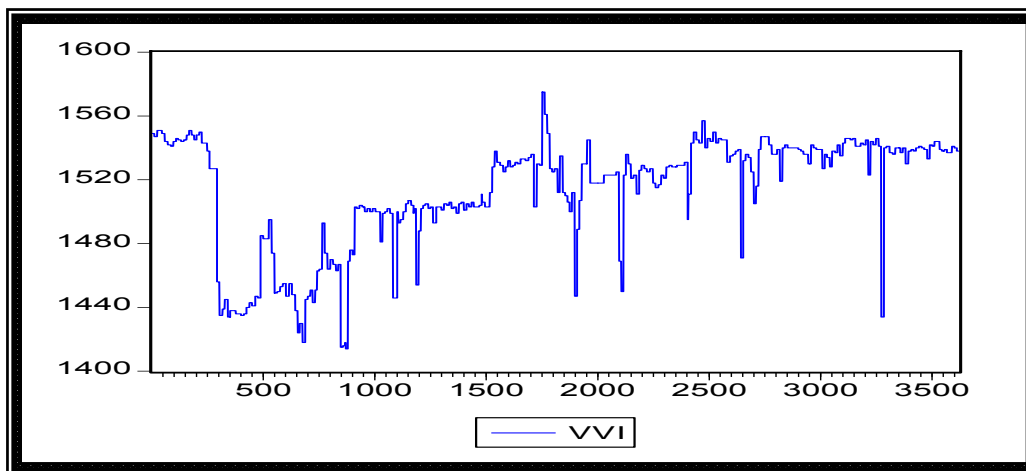


Fig. A.4

Serie de Tiempo para la presión de viento insuflado Alto Horno N°2

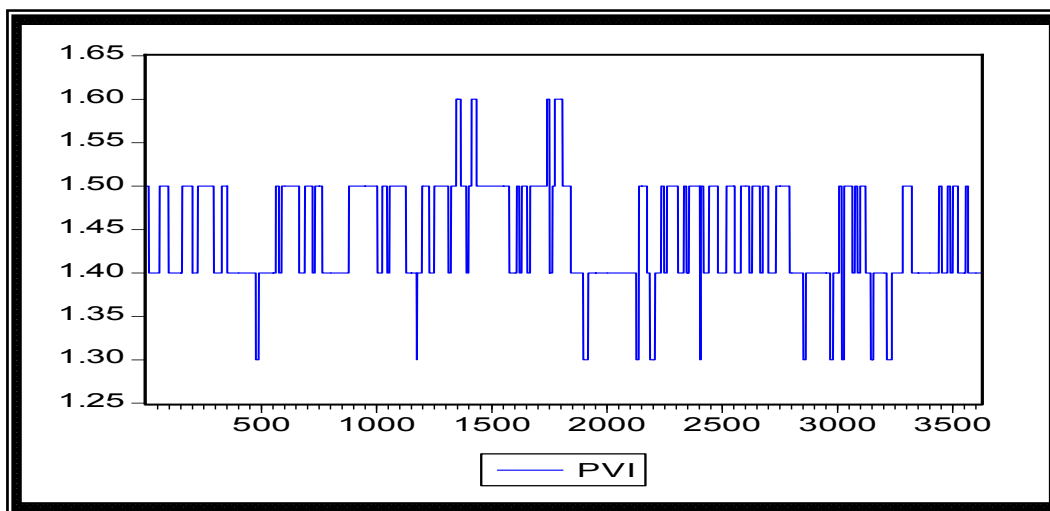
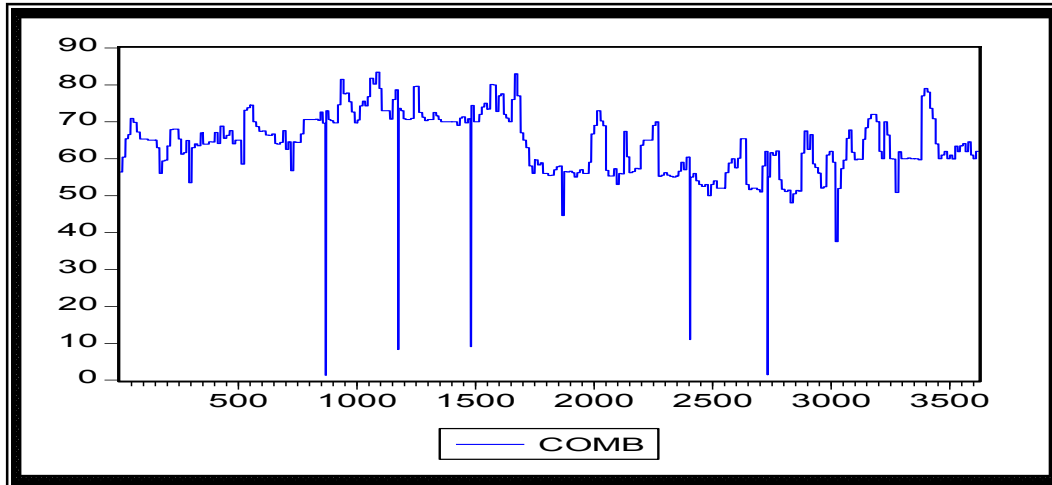
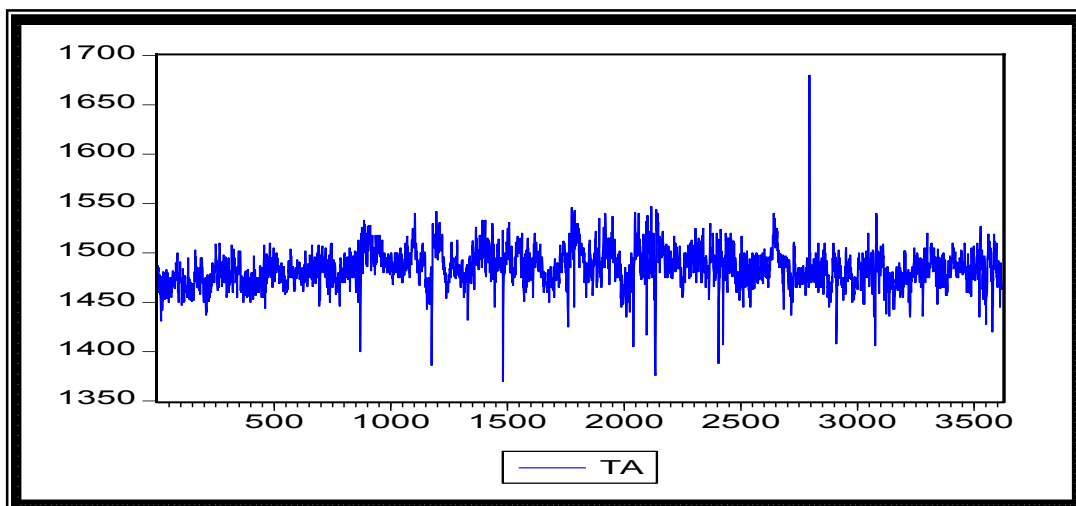


Fig. A.5
Serie de Tiempo para el alquitrán Alto Horno N°2



❖ Variables del Estado Térmico del Horno

Fig. A.6
Serie de Tiempo para la temperatura de arrabio Alto Horno N°2



❖ Variables a Nivel de Gases Tope

Fig. A.7

Serie de Tiempo para el monóxido de carbono Alto Horno N°2

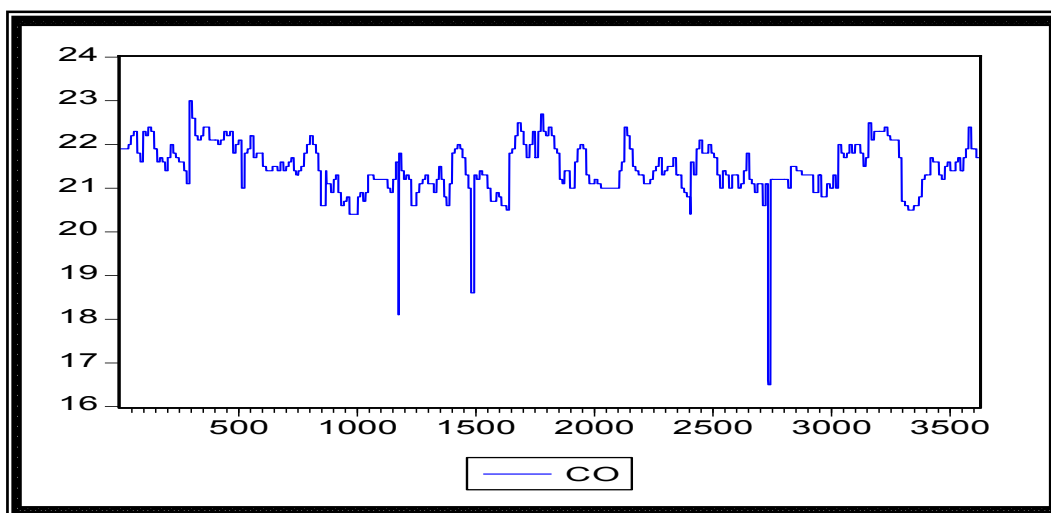
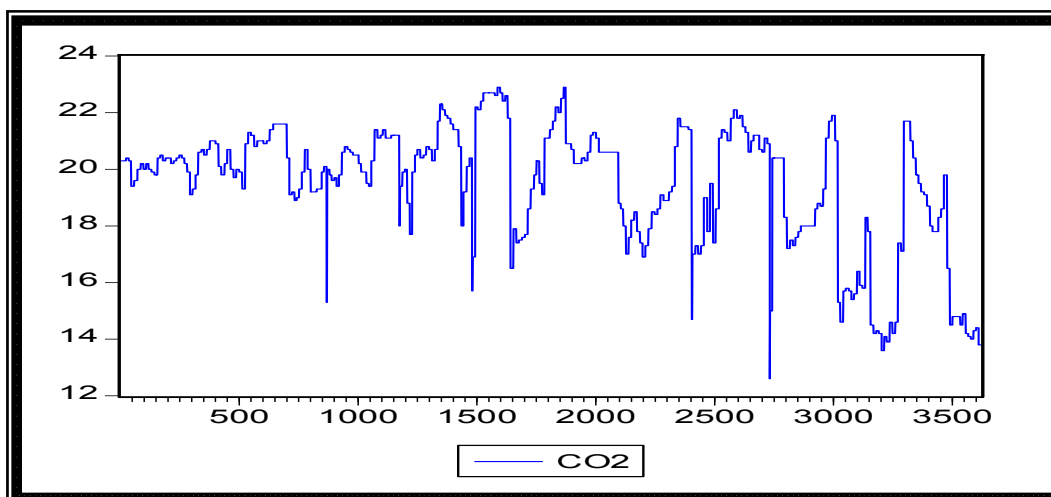


Fig. A.8

Serie de Tiempo el dióxido de carbono Alto Horno N°2



❖ Variables de Análisis Químico del Arrabio

Fig. A.9

Serie de Tiempo para el silicio Alto Horno N°2

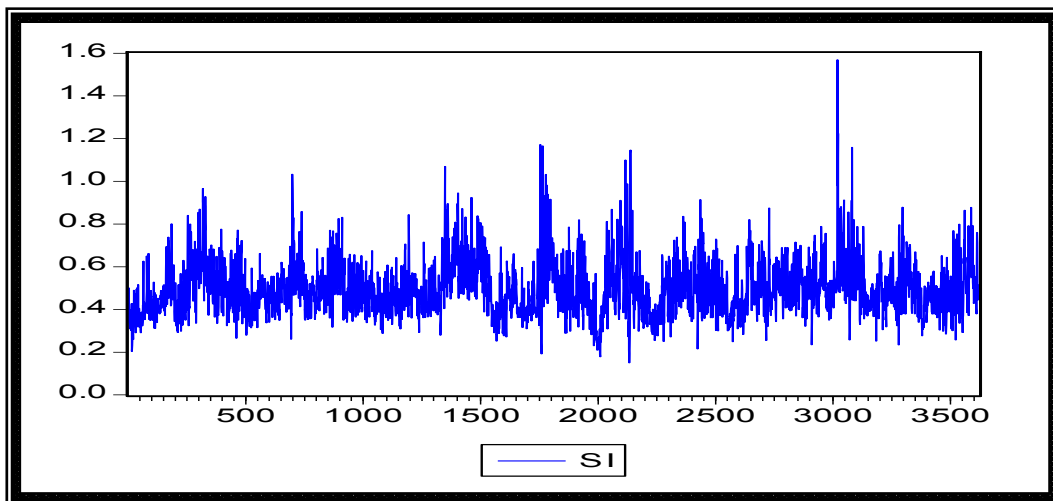


Fig. A.10

Serie de Tiempo para el azufre Alto Horno N°2

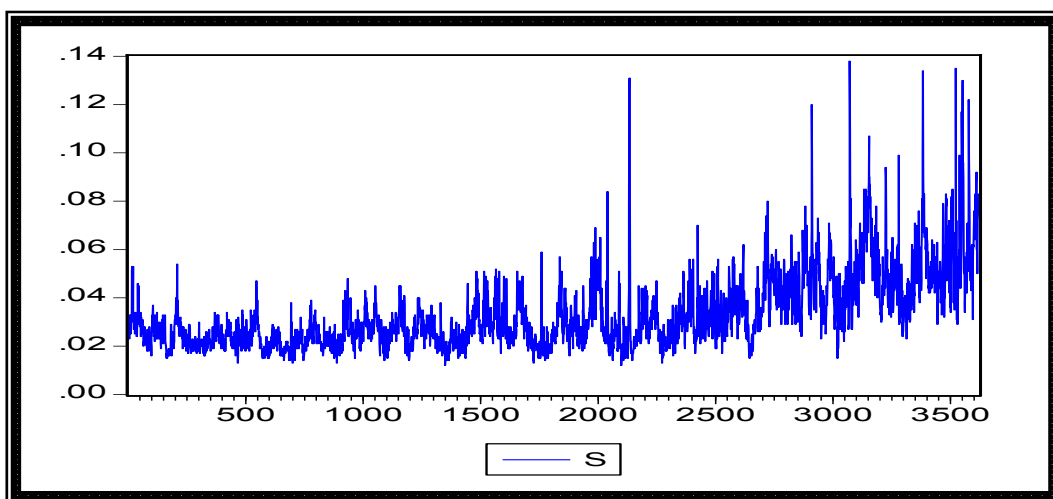


Fig. A.11

Serie de Tiempo para el manganeso Alto Horno N°2

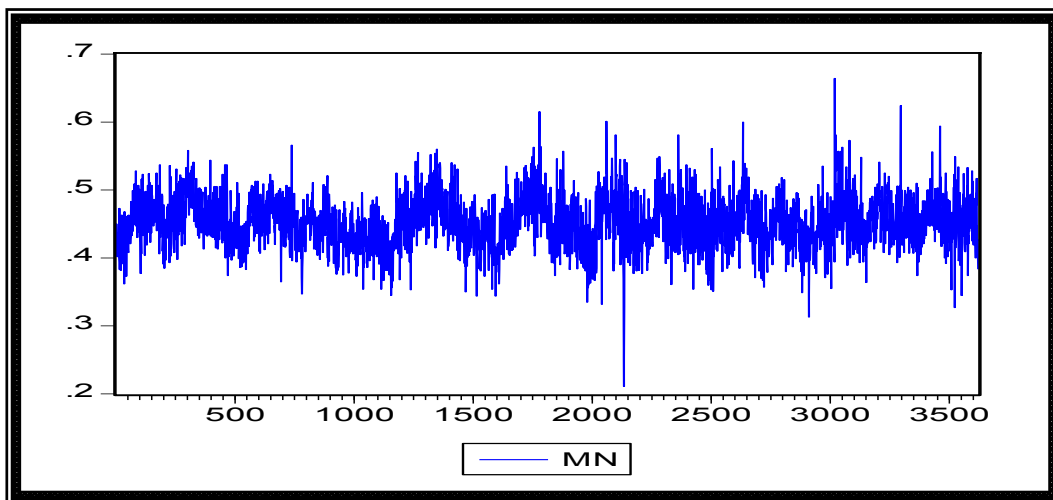


Fig. A.12

Serie de Tiempo para el hierro Alto Horno N°2

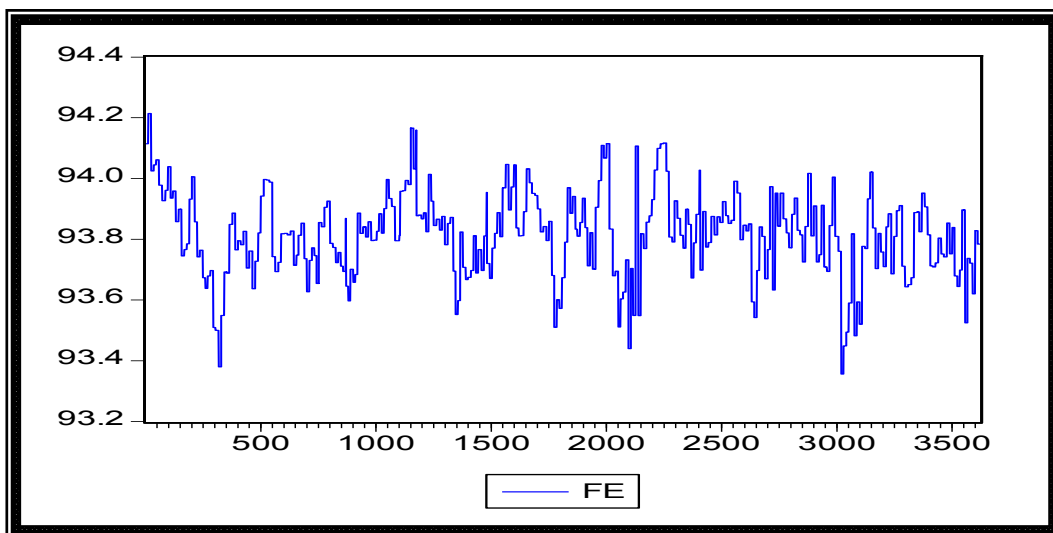
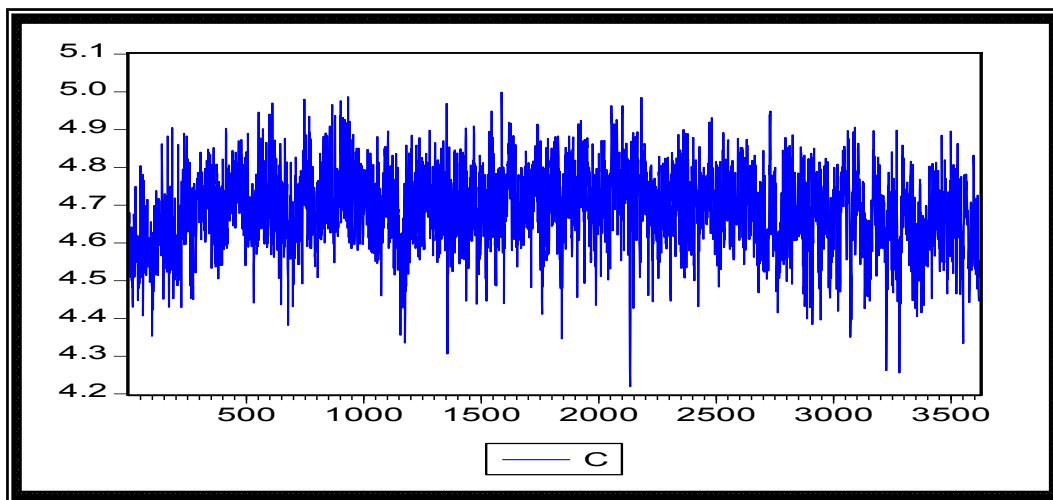


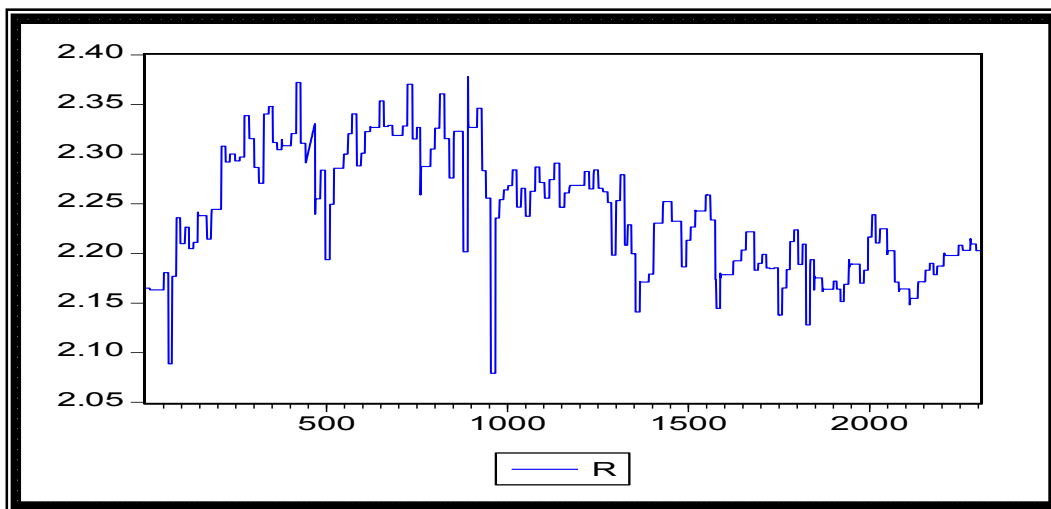
Fig. A.13
Serie de Tiempo para el carbono Alto Horno N°2



Alto Horno N°1

❖ **Variables a nivel de Carga**

Fig. A.14
Serie de Tiempo para la razón coque/mineral Alto Horno N°1



❖ **Variables a Nivel de Toberas**

Fig. A.15

Serie de Tiempo para la temperatura de viento Alto Horno N°1

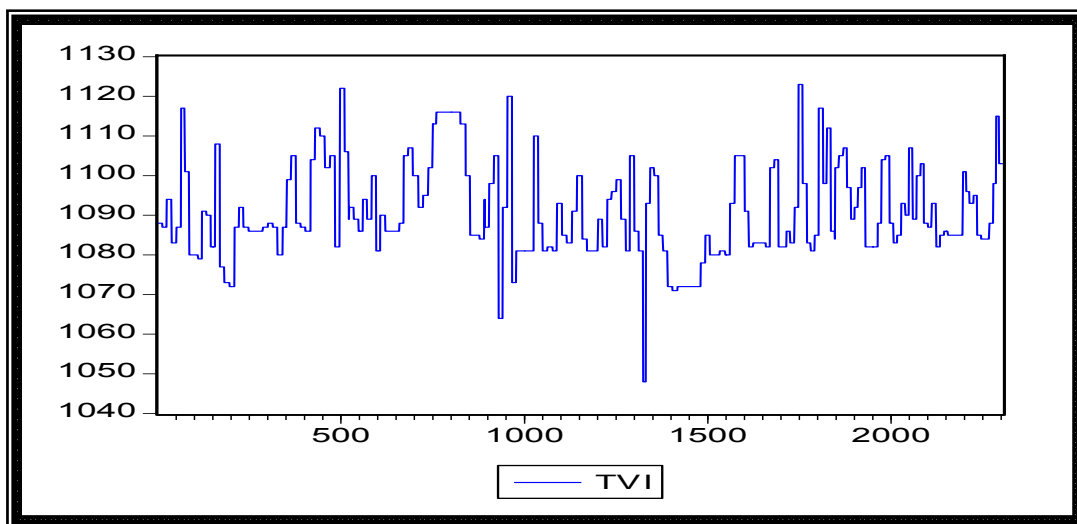


Fig. A.16

Serie de Tiempo para el volumen de viento insuflado Alto Horno N°1

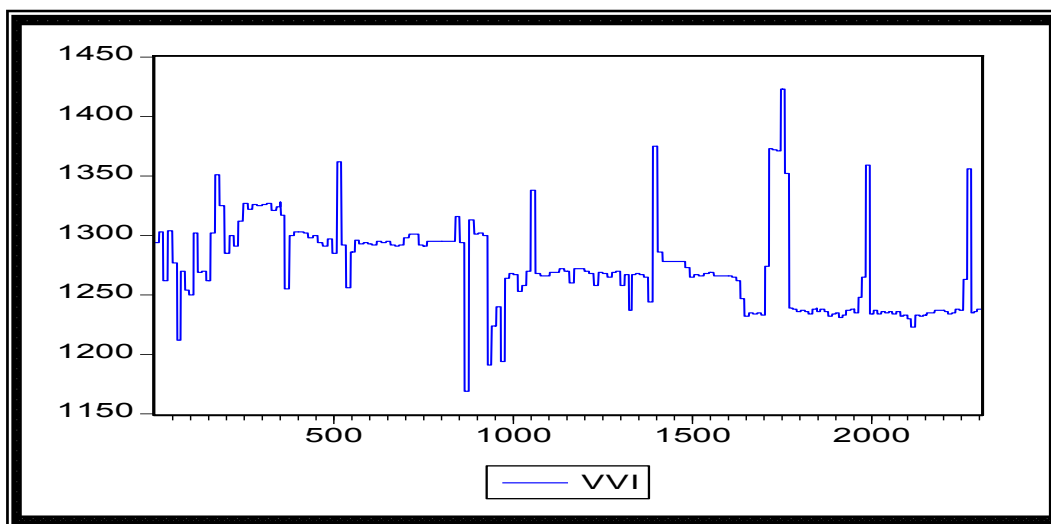


Fig. A.17

Serie de Tiempo para la presión de viento insuflado Alto Horno N°1

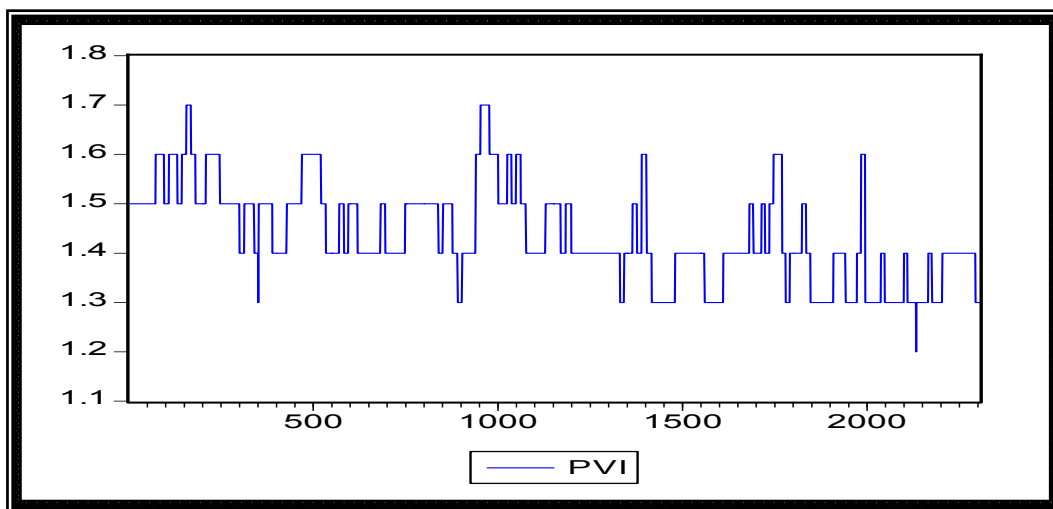
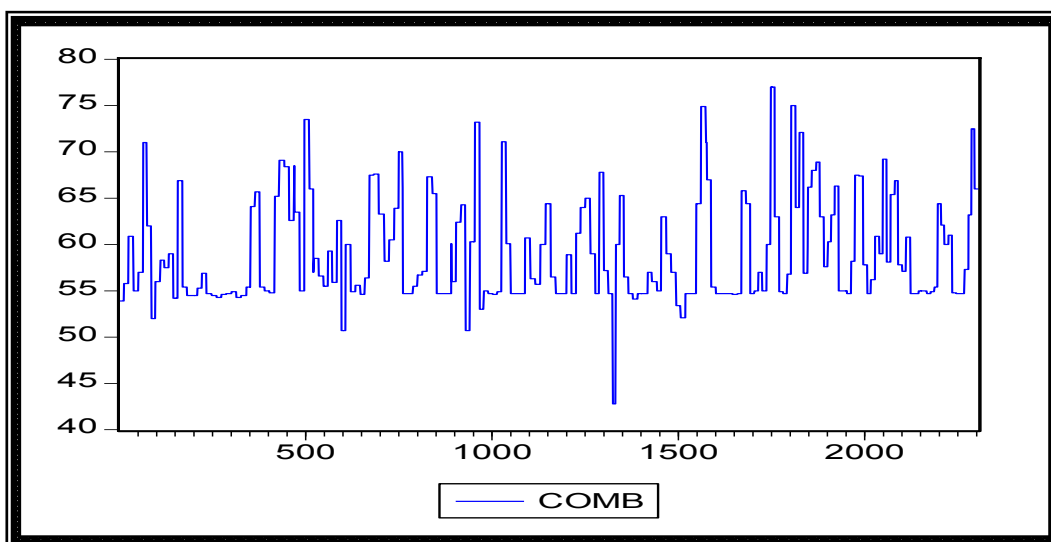


Fig. A.18

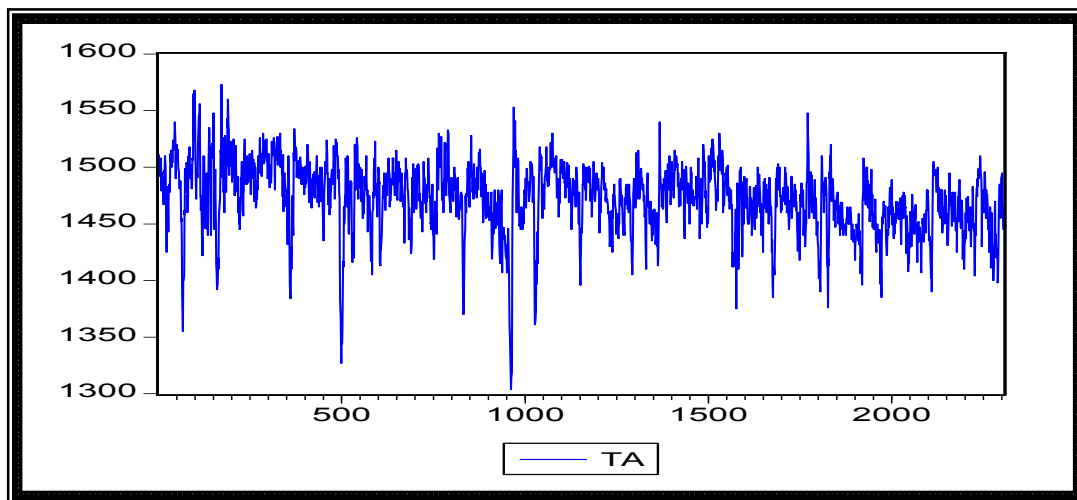
Serie de Tiempo el petróleo Alto Horno N°1



❖ **Variables del Estado Térmico del Horno**

Fig. A.19

Serie de Tiempo para la temperatura de arrabio Alto Horno N°1



❖ **Variables de los Gases Topes**

Fig. A.20

Serie de Tiempo para el monóxido de carbono Alto Horno N°1

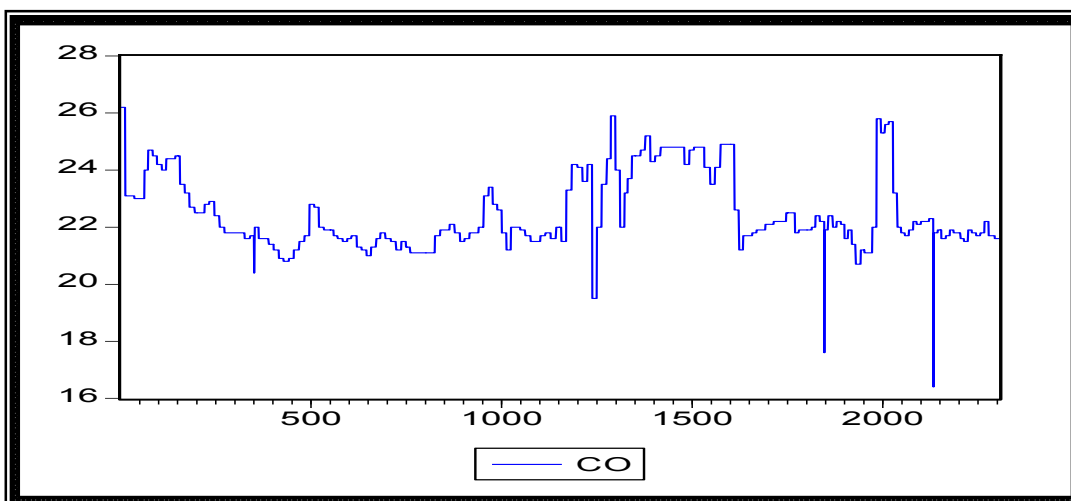
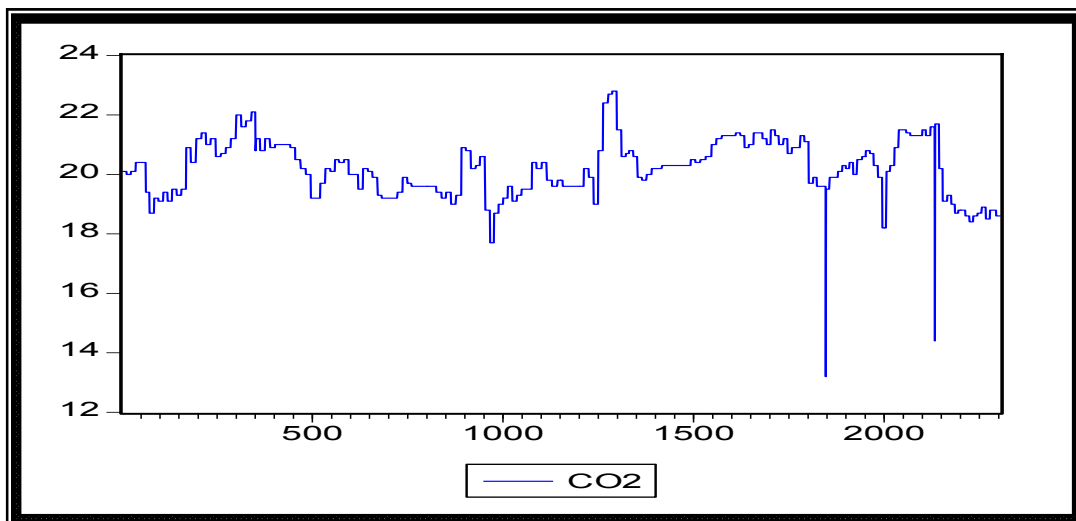


Fig. A.21

Serie de Tiempo para el dióxido de carbono Alto Horno N°1



❖ **Variables de Análisis Químico del Arrabio**

Fig. A.22

Serie de Tiempo para el silicio Alto Horno N°1

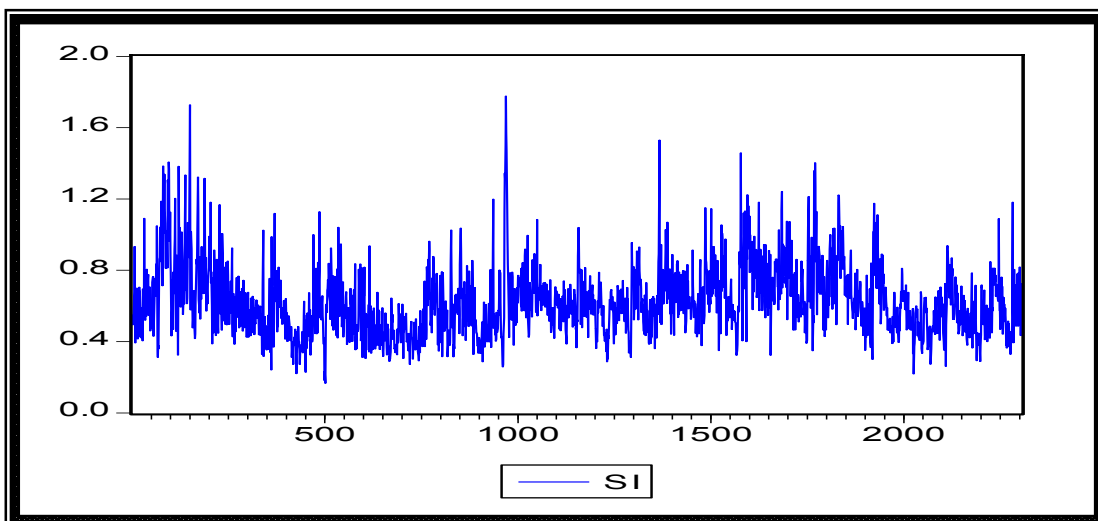


Fig. A.23

Serie de Tiempo para el azufre Alto Horno N°1

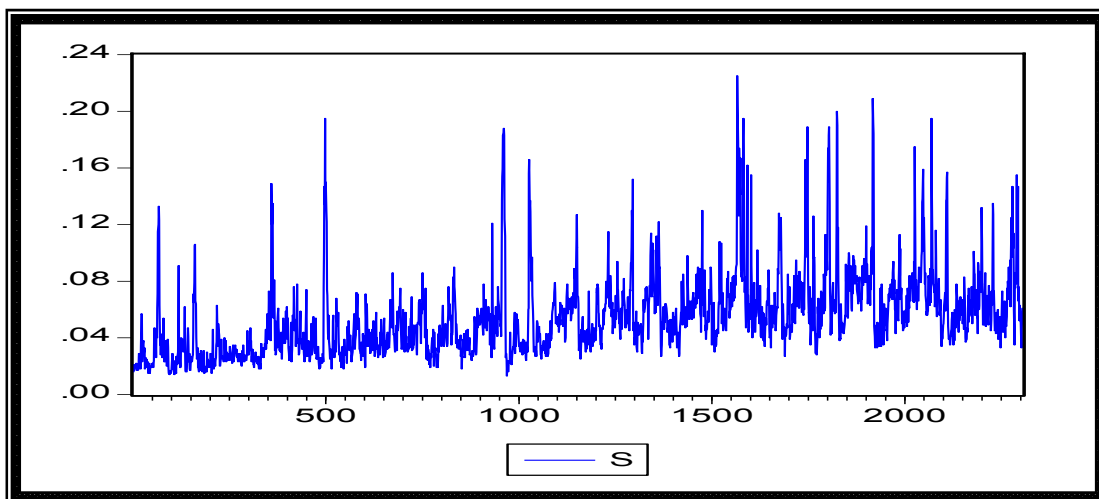


Fig. A.24

Serie de Tiempo para el hierro Alto Horno N°1

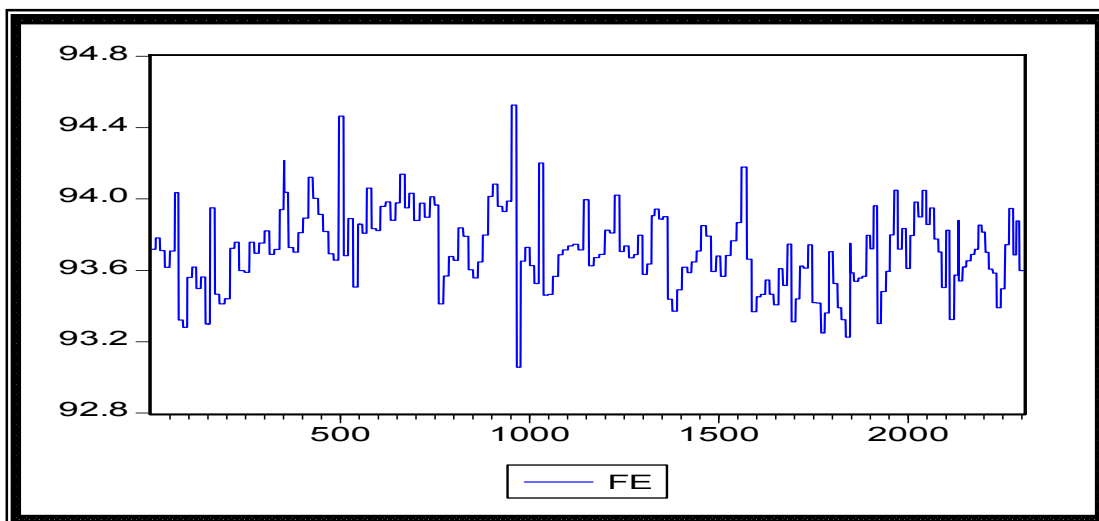


Fig. A.25

Serie de Tiempo para el manganeso Alto Horno N°1

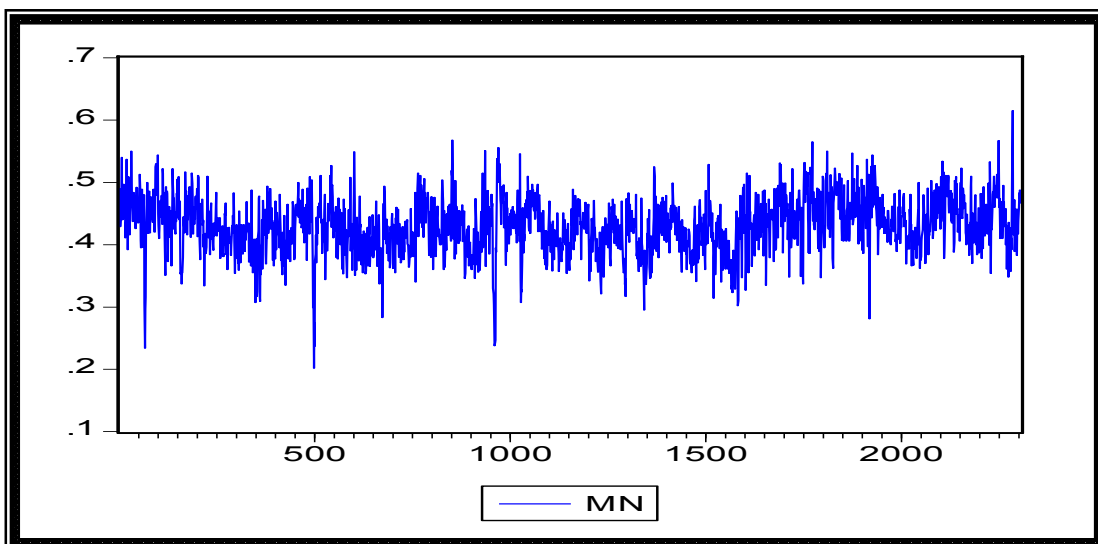


Fig. A.26

Serie de Tiempo para el carbono Alto Horno N°1

