



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA  
“Antonio José De Sucre”  
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
TRABAJO DE GRADO**



**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro a través de la utilización de herramientas estadísticas en la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**

**TUTOR INDUSTRIAL:** Ing. Yanayra Martínez.

**AUTOR:**

**TUTOR ACADEMICO:** Ing. Jairo Pico.

Br. Eneida Soto

**CIUDAD GUAYANA, OCTUBRE DEL 2012**



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA  
"Antonio José De Sucre"  
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
TRABAJO DE GRADO**



**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro a través de la utilización de herramientas estadísticas en la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**

Trabajo de investigación que se presenta para cumplir con el requisito de aprobación de la asignatura de Trabajo de Grado.

**CIUDAD GUAYANA, OCTUBRE DEL 2012**

**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro a través de la utilización de herramientas estadísticas en la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**



U  
N  
E  
X  
P  
O

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA  
“Antonio José De Sucre”  
VICE-RECTORADO PUERTO ORDAZ  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
TRABAJO DE GRADO.



**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro a través de la utilización de herramientas estadísticas en la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**

Trabajo de investigación presentado ante la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vice-Rectorado Puerto Ordaz, UNEXPO como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial.

**Autor: Eneida Carolina Soto Soto.**

---

**Tutor Industrial.  
Ing. Yanayra Martínez.**

---

**Tutor Académico.  
Ing. Jairo Pico.**

---

**Jurado.  
Ing. Hernán Flores.**

---

**Jurado.  
Ing. Félix Martínez.**

Soto Soto, Eneida Carolina

**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro a través de la utilización de herramientas estadísticas en la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**

SIDOR © 20

Trabajo de Grado 135pag

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.

Vicerrectorado Puerto Ordaz. Departamento de Ingeniería Industrial.

Tutor Académico: Ing. Jairo Pico

Tutor Industrial: Ing. Yanayra Martínez

Capítulo I: El Problema, Capítulo II: Marco de Referencia, Capítulo III: Marco Teórico, Capítulo IV: Marco Metodológico, Capítulo V: Análisis y Resultados, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografías, Anexo

---

## DEDICATORIA.

A Dios, por haberme dado la vida, salud e inteligencia además de una gran familia.

A mis padres, Ingrid Soto y Evelio Soto, por estar siempre a mi lado brindarme su amor y su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por guiarme correctamente y brindarme los recursos necesarios para alcanzar mis metas.

A mis hermanos, Evelyn Soto, Erika soto y Gustavo Soto por estar allí cuando los necesito, por brindarme su apoyo y su compañía.

A Josman Manzano por brindarme su apoyo incondicional, su compañía, ayuda y amor.

A mis amigos compañero de estudio y trabajo por ayudarme a ser una mejor persona gracias a sus consejos, por brindarme su ayuda y por estar conmigo en las buenas y en las malas.

---

## AGRADECIMIENTO.

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, porque me ha acompañado a lo largo de mi vida, me permitió llegar hasta aquí, e ir alcanzado cada una de mis metas.

A mis padres, Ingrid Soto y Evelio Soto por su apoyo, consejos, enseñanzas y valores que hacen de mí una mujer de bien luchadora y emprendedora.

A mis hermanos Evelyn Soto, Erika Soto y Gustavo Soto, por motivarme a seguir adelante y creer en mí.

A Josman Manzano por estar conmigo en todo momento, darme tranquilidad y por motivarme a luchar por lo que quiero.

A mis amigos Marianny Lugo, Norwys León, Leydis Rodríguez, Roraima Yáñez, Luigi Marsili, Joelina Rattia, por ayudarme a ser una mejor persona gracias a sus consejos, por brindarme su ayuda y por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A los Ing.Javier Velásquez, Ing.Lester Martínez y Ing.Daniel Delgado, por sus enseñanzas, apoyo y consejos que contribuyeron en mi desarrollo como futuro ingeniero, por confiar en mis capacidades y ayudarme a mejorar en mis debilidades.

A mi tutor industrial la Ing. Yanayra Martínez por brindarme su apoyo y guiarme incansablemente en la realización de este trabajo. Gracias por tu apoyo sincero.

A mi tutor académico el Ing.Jairo Pico, por su atenta lectura, correcciones y comentarios que ayudaron a encaminar la elaboración de mi trabajo.

A mi casa de estudio UNEXPO y profesores, por darme el espacio y las herramientas necesarias para mi preparación profesional.

A SIDOR, por permitirme desarrollar mi práctica profesional en sus instalaciones.

A Todos.... Muchísimas Gracias!!!

## INDICE GENERAL.

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE GRAFICOS.....	XI
RESUMEN.....	XIV
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I .....	17
EL PROBLEMA.....	17
1.1Planteamiento del problema. ....	17
1.2 Objetivos de la investigación. ....	19
1.2.1 Objetivo general:.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Justificación o Importancia.....	6
1.4 Delimitación.....	6
CAPITULOII.....	8
MARCO DE REFRENCIA.....	8
2.1 Descripción De La Empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro.....	8
2.1.1Objetivo general de la empresa.....	10
2.1.2 Objetivos específicos de la empresa.....	10
2.1.3 Reseña Histórica.....	10
2.1.4 Misión de Sidor.....	11
2.1.5 Visión de Sidor.....	11
2.1.6 Estructura organizativa de la empresa.....	11
2.2 Proceso productivo general de Sidor.....	12



2.2.1 Planta de Pellas.....	13
2.2.2 Planta de Reducción Directa (Midrex y Hyl).....	14
2.2.3 Acería y Colada continua de planchones.....	14
2.2.4 Acería y Colada continua de palanquillas.....	15
2.2.5 Productos Planos en Caliente.....	16
2.2.6 Productos Planos en Frío.....	16
2.2.7 Tren de Alambrón.....	17
CAPITULO III.....	19
MARCO TEÓRICO.....	19
3.1 Antecedentes o Revisión de la literatura.....	19
3.1.1 Modelo De Productividad De Las Plantas De Reducción Directa Midrex Del Complejo Siderúrgico Alfredo Maneiro.....	19
3.1.2 Determinación Del Impacto De La Alúmina Del Mineral De Hierro En La Productividad De Los Discos Peletizadores. Planta De Pellas.....	21
3.2 Proceso de Pellas Piroconsolidadas.....	22
3.2.1 Horno de quemado.....	22
3.2.2 Horno de enfriamiento.....	23
3.2.3 Tamices.....	24
3.2.4 Almacenamiento del producto.....	24
3.3 Proceso de Reducción Directa MIDREX.....	25
3.3.1 Preparación de Materia Prima.....	27
3.3.2 Reducción.....	27
3.3.3 Sistema de carga.....	28
3.3.4 Zona de Reducción.....	29
3.3.5 Zona de Transición o Isobárica.....	31
3.3.6 Zona de Enfriamiento.....	31
3.3.7 Zona de descarga.....	33
3.3.8 Reformación.....	34
3.4 Sistema de Manejo de Materiales.....	39
3.5 Sistema de manejo de materia prima.....	39
3.5.1 Sistema de manejo del producto (HRD).....	40

3.6 Variables que influyen en la productividad del módulo.....	40
3.7 Calidad de la Pella de alimentación.....	41
3.8 Glosario De Términos.....	45
CAPITULO IV.....	52
MARCO METODOLOGICO. ....	65
4.1 Tipo de Investigación.....	52
4.2 Diseño de investigación.....	53
4.3 Población y muestra.....	53
4.4 Técnicas e Instrumentos De Recolección De La Información.....	54
4.4.1 Revisión de antiguos trabajos realizados en el área.....	55
4.4.2 Observación directa.....	55
4.4.3 Entrevistas no Estructuradas.....	55
4.4.4 Consultas Académicas e Industriales.....	55
4.4.5 Intranet SIDOR.....	56
4.5 Procedimientos de la investigación.....	56
4.5.1 Determinar modelos estadísticos.....	58
4.5.2 Procedimiento de recolección de datos.....	58
4.5.6 Procesamiento de la información.....	59
4.6 Análisis de Varianza.....	60
4.6.1 Anova simple.....	60
4.6.2 Análisis descriptivos.....	61
4.6.3 Histogramas de frecuencias.....	62
4.6.4 Gráficos de caja y bigotes.....	62
4.6.5 Análisis de comparación.....	63
CAPITULO V.....	64
ANALISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	64
5.1 Descripción de la situación actual del proceso de Pellas Piroconsolidadas y el proceso de Reducción Directa MIDREX II.....	64
5.1.1 Descripción de planta de pellas.....	64
5.1.2 Descripción del proceso.....	66
5.1.2.1 Fases de la formación de pellas verdes.....	67

5.1.2.2 Clasificación de la Doble Criba.....	68
5.1.3 Procesos de Redacción Directa Midrex.....	68
5.1.3.1 Sistemas de reacciones durante el proceso de reducción directa Midrex.....	70
5.1.3.2 Sistema de manejo de materiales.....	70
5.1.3.3 Equipos del sistema de reducción directa Midrex.....	71
5.1.3.4 Horno de reducción directa.....	71
5.2 Determinación del impacto o incidencia del porcentaje de alúmina que viene de las pellas verdes y su comportamiento en piroconsolidación.....	72
5.2.1 Levantamiento de la data.....	73
5.2.2 Establecer los rangos de trabajo del porcentaje de alúmina del mineral molido.....	74
5.3 Determinar el impacto en los atributos de la pella piroconsolidada que se vean influenciados directamente por la variación del %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.....	75
5.3.1 Análisis de Granulometría de las pellas quemadas.....	76
5.3.2 Análisis de las propiedades físicas de las pellas quemadas.....	83
5.3.3 Análisis de las propiedades metalúrgicas de pella quemadas.....	88
5.4 Determinación del impacto o incidencia del porcentaje de alúmina en el comportamiento de los parámetros de procesos y los atributos del HRD de las plantas de reducción MIDREX II.....	91
5.4.1 Levantamiento de la data de los atributos del HRD.....	92
5.4.2 Establecer los rangos de trabajo del porcentaje de alúmina de la pella de alimentación.....	93
5.4.3 Determinar el impacto en la productividad y atributos que se vean influenciados directamente por la variación del %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.....	95
5.4.4 Análisis de Granulometría del HRD.....	95
5.5.2. Análisis de las propiedades físicas del HRD.....	104
5.5 Modelo propuesto de la productividad.....	108
5.5.1 Ecuación para los rangos establecidos del porcentaje de alúmina.....	109
5.6 Validación Del Modelo.....	109
CONCLUSIONES.....	111

---

RECOMENDACIONES.....	113
BIBLIOGRAFIA.....	114
ANEXOS.....	115

## INDICE DE TABLAS.

TablaN°III-1: Rangos permisibles para la calidad de la pella de alimentación: Fuente: Intranet SIDOR.....	44
TablaN°V-2: Tabla Resumen de los Rangos establecidos para el Porcentaje de Alúmina.....	75
Tabla N°V-3: Resumen estadístico granulometría 5/8" pellas quemadas.....	76
Tabla N°V-4: Resumen estadístico granulometría 1/2" pellas quemadas.....	77
Tabla N°V-5: resumen estadístico granulometría 3/8" pellas quemadas.....	79
Tabla N°V-6 resumen estadístico granulometría 1/4" pellas quemadas.....	80
Tabla N°V-7: resumen estadístico granulometría -1/4" pellas quemadas.....	82
Tabla N°V-8: resumen estadístico granulometría +3/8"; -5/8" pellas quemadas....	83
Tabla N°V-9: resumen estadístico Índice de abrasión de pellas quemadas.....	84
Tabla N°V-10: resumen estadístico Índice de tambor de pellas quemadas.....	85
TablaV-11: resumen estadístico Resistencia a la compresión de pellas quemadas.....	87
TablaN°V-12: resumen estadístico Porosidad de pellas quemadas.....	88
Tabla N°V-13: resumen estadístico Reducibilidad de pellas quemadas.....	89
Tabla N°V-14: resumen estadístico del hinchamiento de pellas quemadas.....	90
Tabla N°V-15: resumen estadístico de los atributos de las Pellas Quemadas.....	91
Tabla N°V-16: Tabla Resumen de los Rangos establecidos para el Porcentaje de Alúmina.....	94
Tabla N°V-17: resumen estadístico Granulometria5/8" del HRD.....	96
Tabla N°V-18: resumen estadístico Granulometría 1/2" del HRD.....	97
Tabla N°V-19 resumen estadístico Granulometria3/8" del HRD.....	98
Tabla N°V-20: resumen estadístico Granulometría 1/4" del HRD.....	100
Tabla N°V-21: resumen estadístico Granulometría -1/4" del HRD.....	101
Tabla N°V-22: resumen estadístico Granulometría 1/8" del HRD.....	102
Tabla N°V-23: resumen estadístico Granulometría -1/8" del HRD.....	104
Tabla N°V-24: resumen estadístico del Índice Abrasión del HRD.....	105
Tabla N°V-25: resumen estadístico del Índice de Tambor del HRD.....	106
Tabla N°V-26: resumen estadístico Resistencia de Compresión del HRD.....	107

---

Tabla N°V-27: resumen estadístico de los atributos del HRD.....	108
Tabla N°V-28 Datos para la validación del modelo (0,6 – 2).....	109

## INDICE DE FIGURAS.

Figura N°I-1: Variación del porcentaje de alúmina.....	5
Figura N°II-2: Ubicación Geográfica de SIDOR. Fuente: Intranet SIDOR 2012.....	8
Figura N°II-3. Vista Panorámica de SIDOR <i>Fuente:</i> Intranet SIDOR 2012.....	9
Figura N°II-4: Estructura Organizativa actual de SIDOR. Fuente: Intranet.....	11
Figura N°II-5: Secuencia de operaciones del Proceso de Peletización.....	12
Figura N°II-6: Distribución de las Pellas a las Plantas Reductoras del área de Prerreducidos (Pellas-Reducción).....	14
Figura N°II-7: Vista aérea de la Planta de Acería y Colada continua de Planchones.....	15
Figura N°II-8: Planta de Acería y Colada continua de Palanquilla.....	15
Figura N°II- 9: Secuencia de operaciones para la Laminación en caliente.....	16
Figura N°II- 10: Secuencia de operaciones para la Laminación en frío. Productos planos.....	17
Figura N°II- 11: Secuencia de operaciones del tren de barras. Productos largos....	17
Figura N°II-12: Esquema de tren de alambrón. Productos Largos.....	18
Figura N°III-13: Horno de piroconsolidación de planta de pellas.....	23
Figura N°III- 14: Reactor de tecnología MIDREX.....	28
Figura N°III- 15: Sistema de Carga del Reactor.....	29
Figura N°III-16: Zona de Reducción del Reactor.....	30
Figura N°III-17: Zona de transición y rompedores superiores.....	31
Figura N°III-18: Zona de enfriamiento.....	33
Figura N°III-19: Péndulo de descarga.....	34
Figura N°III-20: Reformador.....	35
Figura N°V-21: Flujograma del proceso.....	66
Figura N°V-22: Flujograma del proceso.....	70
Figura N°V- 23: SGL- LAB áreas primarias- Resultado-Pellas.....	73
Figura N°V-24: Ventana de las variables de pella quemadas.....	75
Figura N°V- 25: SGL-LAB áreas primaria-pella de alimentación.....	92
Figura N°V-26: Venta de los atributos del HRD.....	94

## INDICE DE GRAFICOS.

GraficoV-1: Histograma del porcentaje de Alúmina del Mineral Molido.....	74
GraficaV-2: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" de pellas quemadas.....	76
Grafica V-3: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" de pellas quemadas.....	76
GraficaV-4: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 1/2" pellas quemadas.....	77
GraficaV-5: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/2" pellas quemadas.....	77
GraficaV-6: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 3/8" pellas quemadas.....	78
GraficaV-7: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" pellas quemadas.....	79
GraficaV-8: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 1/4" pellas quemadas.....	80
GraficaV-9: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" de pellas quemadas.....	80
GraficaV-10: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría -1/4" pellas quemadas.....	81
GraficaV-11: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de <1/4" de pellas quemadas.....	81
GraficaV-12: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría +3/8"; -5/8" pellas quemadas.....	82
GraficaV-13: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de +3/8" 5/8" de pellas quemadas.....	83
GraficaV-14: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de abrasión pella quemadas.....	84
GraficaV-15:Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Abrasión de pellas quemadas.....	84



GraficaV-16: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de tambor de pellas quemadas.....	85
GraficaV-17: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice de tambor de pellas quemadas.....	85
GraficaV-18: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión de pellas quemadas.....	86
GraficaV-19: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión de pellas quemadas.....	86
GraficaV-20: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Porosidad de pellas quemadas.....	87
GraficaV-21: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Porosidad de pellas quemadas.....	88
GraficoV-22: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Reducibilidad de pellas quemadas.....	89
GraficoV-23: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Reducibilidad de pellas quemadas.....	89
GraficoV-24: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Hinchamiento de pellas quemadas.....	90
GraficoV-25 caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Hinchamiento de pellas quemada.....	90
GraficoV-26: Histograma del porcentaje de Alúmina de pella de alimentación.....	93
GraficoV-27 Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.....	95
GraficoV-28: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.....	95
GraficoV-29: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/2" del HRD.....	96
GraficoV-30: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.....	97
GraficoV-31: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" del HRD.....	98
GraficoV-32: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" del HRD.....	98

GraficoV-33: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" del HRD.....	99
GraficoV-34: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" del HRD.....	100
GraficoV-35: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/4" del HRD.....	101
GraficoV-36: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/4" del HRD.....	101
GraficoV-37: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/8" del HRD.....	102
GraficoV-38: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/8" del HRD.....	102
GraficoV-39: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/8" del HRD.....	103
GraficoV-40: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/8" del HRD.....	103
GraficoV-41: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Abrasión del HRD..	104
GraficoV-42: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice abrasión del HRD.....	105
GraficoV-43: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Tambor del HRD...	105
GraficoV-44: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice de tambor del HRD.....	106
GraficoV-45 Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia de compresión del HRD.....	107
GraficoV-46: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión del HRD.....	107
GraficaV-47: Validación del modelo productividad Vs Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%).....	110

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITÉCNICA

“ANTONIO JOSÉ DE SUCRE”

VICERRECTORADO PUERTO ORDAZ

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE GRADO

**Evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro de la empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro; SIDOR C.A**

**Autor:** Soto Soto Eneida carolina.

**Tutor Académico:** Ing. Jairo Pico.

**Tutor Industrial:** Ing. Yanayra Martínez.

**Año:** 2012.

## **RESUMEN**

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y los atributos del HRD cuando varia el porcentaje de alúmina del mineral de hierro. Utilizando un histórico de data desde 1 de enero del 2009 hasta el 31 de marzo del 2012, a fin de garantizar la calidad de la pella a pesar de las variaciones en la materia prima estableciendo los parámetros bajo los cuales debe ser procesada. El procedimiento consistió en una investigación aplicada de tipo descriptiva no experimental de campo. Para cumplir con el objetivo general del presente trabajo se analizó el flujo de información de la planta, se establecieron los parámetros que influyen en la calidad de los procesos que se llevan a cabo en la fabricación de pellas piroconsolidadas y del HRD, se utilizó la data depurada y desfasada para realizar los histogramas de frecuencia observando si las variables estaban dentro de los límites de especificación, luego se determinó la influencia de los parámetros de operación en las variables de calidad por medio del paquete estadístico Statgraphics, y por último se elaboraron modelos estadísticos que determinan los niveles operativos para la obtención de resultados favorables en la calidad de la planta.

**Palabras Claves:** Pellas quemadas, HRD, Porcentaje de alúmina, atributos, análisis, anovas simple, regresión simple, influencia, propiedades.

---

## INTRODUCCION.

La empresa SIDOR, C.A es un complejo siderúrgico dedicado a la producción y comercialización de productos de acero al mercado nacional y a la explotación. Todos los procesos necesitan de actividades que permitan controlar sus variables operacionales, ya que de ellas depende la productividad de la planta y por ende de la empresa, la cual tiene como función la fabricación de productos siderúrgicos.

Parte primordial de la cadena productiva de la empresa la forma el área de prerreducidos, la cual se encarga desde la preparación de la materia prima para la fabricación de las pellas (mineral de hierro conjuntamente con los aditivos y aglomerantes en forma esférica con características físicas – Químicas y granulométricas específicas) hasta los procesos de reducción directa de las mismas para la obtención de hierro de reducción directa o HRD.

Existen diversas tecnologías de Reducción Directa a nivel mundial. Las principales son MIDREX desarrollada por Midrex Technologies y HYL desarrollada por Hylsamex. Además de estas, existe la tecnología FINMET. SIDOR utiliza las tecnologías HYL y MIDREX, contando con tres plantas: MIDREX I, compuesta por un módulo con un reactor de reducción directa; MIDREX II compuesta por tres módulos, denominados A, B, C, cada uno con un reactor de reducción directa y HYL III, integrada por tres módulos de producción, cada uno de ellos consta de 4 reactores.

La función de estas plantas de reducción directa es satisfacer la demanda de HRD de las líneas de Acerías con las cuales cuenta la empresa, para cumplir con la fabricación de productos terminados y semi terminados de acero con composiciones químicas y propiedades mecánicas requeridas por tan importante cliente interno.

Básicamente el trabajo es un estudio estadístico en el que se tomaron como muestra los datos obtenidos de los atributos de las pellas quemadas y los atributos del HRD, para evaluar su comportamiento e incidencia, se conto con una data desde Enero del 2009 hasta Marzo de 2012, sin embargo para establecer la metodología de comparación el periodo de estudio se establecieron unos factores de varianza del porcentaje de alúmina del mineral molido y pella de alimentación, Una vez recolectada y organizada la data se hicieron análisis de varianza simples, comparaciones de dos muestras y se construyo un modelo de cadena para la productividad de Midrex II-C utilizando como herramienta el paquete estadístico STATGRAPHICS® en dos de sus versiones; Plus 5.0 y Centurion XV.

Las propiedades y calidad de los productos dependen esencialmente de dos factores: las características de la materia prima y las variables y/o parámetros del proceso a partir del cual son fabricados. Las pellas quemadas producidas y empleadas en la industria siderúrgica no escapan de esta realidad; siendo además materia prima en procesos subsiguientes a la peletización, es de vital importancia garantizar su comportamiento con la finalidad de obtener el máximo aprovechamiento

Para la elaboración de este trabajo nos enfocaremos en la planta de pellas y Reducción Directa Midrex II-C, el mismo contara con los siguientes capítulos:

El capítulo I el cual plantea el problema, establece los objetivos, justificación, limitación y delimitación del trabajo, el capítulo II Marco de Referencia, Capítulo III Marco Teórico que contiene las bases teóricas que dan soporte a la realización de esta investigación, el capítulo IV Marco Metodológico que detalla la metodología empleada para desarrollar la investigación y el capítulo V muestra de análisis y resultados. Finalmente se presentan las Conclusiones, Recomendaciones y Referencias

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA.**

En el presente capítulo se desarrollan tópicos concernientes al problema que da origen a la investigación, entre los cuales se destacan: Planteamiento del problema, justificación o importancia, y delimitación o alcance; incluyendo también la definición del objetivo general y los objetivos específicos.

#### **1.1 Planteamiento del problema.**

La empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro C.A (SIDOR), es una empresa creada por el Estado Venezolano, dedicada a la fabricación del Acero para compensar en cantidad, variedad y calidad, las necesidades de los principales sectores de la economía nacional e internacional, cuyos procesos se inician con la fabricación de pellas y culminan con la entrega de productos finales largos (Barras y Alambrón) y planos (Láminas en Caliente, Láminas en Frío y Recubiertos), mediante la utilización de tecnologías de Reducción Directa y Hornos Eléctricos de Arco. Ésta tiene como compromiso satisfacer los requisitos de sus clientes, mediante el mejoramiento continuo de la eficacia del sistema de gestión de calidad.

Para la fabricación de acero, SIDOR inicia sus procesos mediante la aglomeración de finos de mineral con alto contenido de hierro, junto con aditivos y aglomerantes orgánicos, para la formar las pellas (aglomerados en forma esférica). Estas son procesadas en dos plantas de Reducción Directa con tecnología HyL ó MIDREX garantizando la obtención de hierro de

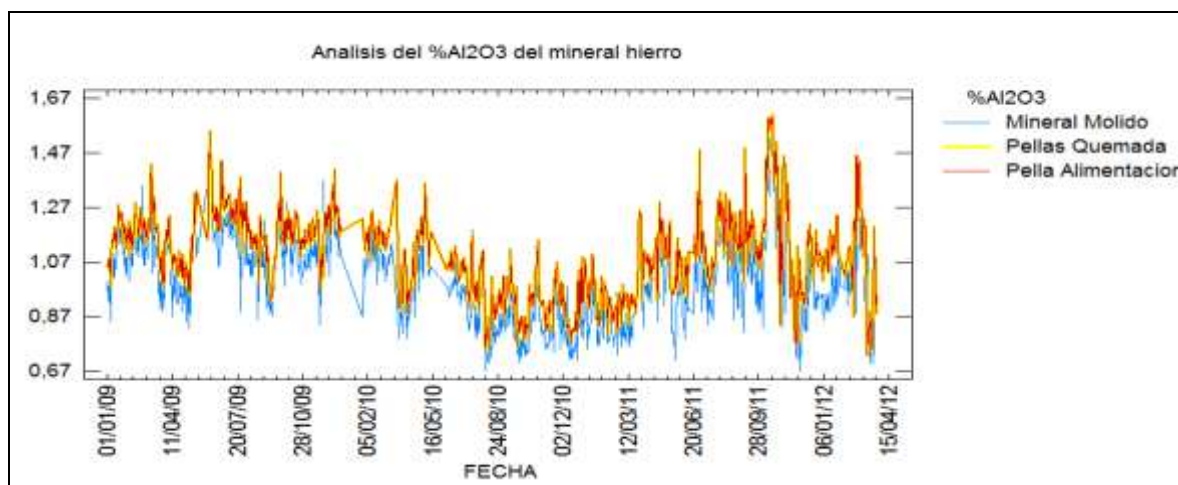
Reducción Directa (HRD). El HRD es enviado a las áreas de acerías donde es cargado a los hornos eléctricos de arco para obtener el acero líquido y posteriormente, pasa a las máquinas de colada continua para su solidificación, obteniéndose semielaborados – Planchones o Palanquillas- que se destinan a la fabricación de productos planos y productos largos, respectivamente. Este trabajo se enfoca en el proceso de las pellas piroconsolidadas y el proceso de reducción MIDREX II Modulo c.

El objetivo principal de planta de pellas, consiste en la transformación del mineral de hierro proveniente de FMO, en un aglomerado de forma esférica (pellas) con características químicas, físicas – granulométricas específicas y metalúrgicas (con el propósito de satisfacer las necesidades de los clientes internos y externos.) este aglomerado es usado en reducción garantizando calidad, disponibilidad y producción con un control en las etapas y calidad en el producto obtenido.

En los últimos años el mineral suministrado por FMO ha presentado variabilidad en su composición química. Esto, se ve reflejado en la disminución del porcentaje de hierro encontrado en el mineral y el aumento significativo de la ganga entre ellas el porcentaje de alumina; lo que puede estar causando un efecto desfavorable en el proceso de piroconsolidación de la Pella y en atributos del HRD y en consecuencia provocando una disminución en la calidad del producto final.

Por lo antes expuesto, la gerencia de Reducción Directa, ha considerado importante desarrollar el análisis del porcentaje de la alúmina en el mineral que permita analizar la problemática y establecer estrategias que garanticen la ejecución de la productividad de las pellas quemadas y del HRD; por ello, se plantea Diseñar un modelo estadístico que permita determinar la influencia del porcentaje de alúmina en los atributos de las

pellas piroconsolidadas y su impacto en las plantas de Reducción Directa MIDREX.



Figural-1: Variación del porcentaje de alúmina.

## 1.2 Objetivos de la investigación.

### 1.2.1 Objetivo general:

Evaluar el comportamiento e incidencia en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

1. Describir las etapas del proceso productivo de pellas piroconsolidada y de las plantas de reducción directa Midrex II a fin de ubicar la zona de toma de datos más representativa para el análisis.
2. Estudiar el comportamiento de los atributos físicos, granulométricos y metalúrgicos de la pella piroconsolidada cuando varía el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro.



3. Determinar el impacto en los atributos de la pella piroconsolidada que se vean influenciados directamente por la variación del  $\%Al_2O_3$  del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.
4. Estudiar el comportamiento de la productividad de los módulos MIDREX y de los atributos físicos y granulométricos del HRD cuando varía el  $\%Al_2O_3$  del mineral de hierro.
5. Determinar el impacto en productividad y atributos que se vean influenciados directamente por la variación del  $\%Al_2O_3$  del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.
6. Validar el Modelo Estadístico.

### **1.3 Justificación o Importancia:**

La realización de este estudio obedece a que se desconoce la incidencia que pueda tener el  $\%Al_2O_3$  en los atributos de la pella piroconsolidada y en los atributos del HRD, ya que actualmente no hay antecedentes que muestren tendencias o impactos asociados, razón por la cual se propiciaría una orientación de que atributos vigilar cuando se pronostique una variación del  $\%Al_2O_3$ .

### **1.4 Delimitación o Alcance:**

El estudio estará limitado a la realización de una evaluación del comportamiento e incidencia en los atributos de la pella quemada (Propiedades físicas, Metalúrgicas y Granulométricas) Y los atributos del HRD (Propiedades físicas, Granulométricas, y reactividad) cuando varía el porcentaje de alúmina del mineral de hierro. Utilizando un histórico de data

---

desde 1 de enero del 2009 hasta el 31 de Marzo del 2012. Con una duración de 24 semanas.

El modelo estadístico se diseñara con la data del módulo c Midrex II ya que este es el que posee mayor operatividad en el período seleccionado.

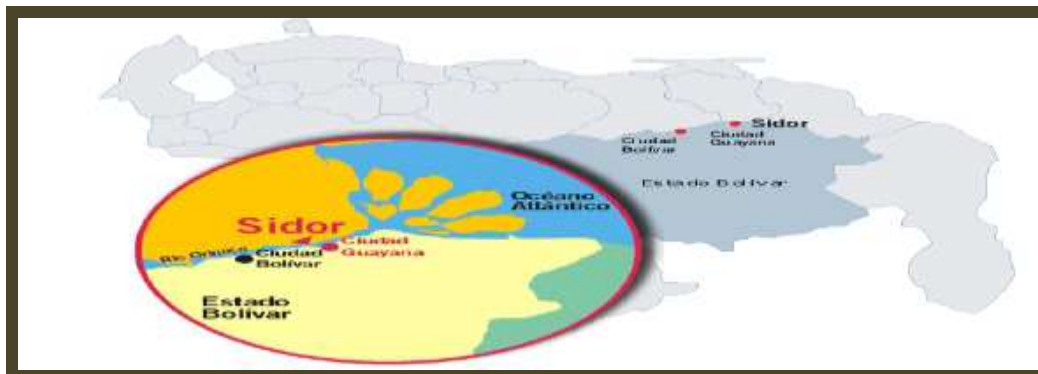
## CAPITULO II

### MARCO DE REFERENCIA.

En el siguiente capítulo, se desarrolla la reseña histórica de la empresa, exponiendo adicionalmente su visión, misión, objetivos y su estructura organizativa entre otros aspectos de gran importancia.

#### 2.1 Descripción De La Empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro.

La empresa Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro, (SIDOR, C.A) es el complejo siderúrgico integrado de Venezuela que desarrolla sus actividades industriales en una planta ubicada en la zona industrial matanzas, estado bolívar, sobre el margen derecho del río Orinoco a unos 300 Km de su desembocadura en el océano atlántico y a 17 kilómetros de la confluencia con el río Caroní, primer exportador no petrolero del país, reconocido como cuarto productor de acero integrado de américa latina y el principal de la región andina.



FiguralI-2: Ubicación Geográfica de SIDOR.

Fuente: Intranet SIDOR 2012.

Su ubicación responde principalmente a razones económicas y geográficas, que le permiten conectarse con el resto del país por vía terrestre, y por vía fluvial marítima con el resto del mundo. Además se abastece de la energía eléctrica generada por las represas más importantes de la zona, ubicadas sobre el río Caroní, así como del Gas Natural proveniente de los campos petroleros en la Región Oriental. Anexando a todas estas ventajas la cercanía con los cerros Bolívar y Pao en los que se encuentra el mineral de hierro.

Cuenta con equipos e instalaciones auxiliares que permiten la producción de acero y la fabricación de una variada gama de productos que abarca desde Pellas, Hierro de reducción directa, Cal y Semi-elaborados de acero (Planchones y Palanquillas) hasta productos Planos terminados (Bandas, Bobinas y Láminas en caliente; Bobinas, Láminas en frío y recubiertos) y Largos (Barras y Alambrón).



Figura 3. Vista Panorámica de SIDOR

Fuente: Intranet SIDOR 2012

### **2.1.1 Objetivo general de la empresa:**

Optimizar los procesos de fabricación y comercialización de productos siderúrgicos, aprovechando el conjunto de recursos (Humanos, materiales, financieros, tecnológicos y otros) de que dispone, de forma que se minimicen costos e incrementar las ganancias.

### **2.1.2 Objetivos específicos de la empresa.**

- Optimizar la producción en función de las exigencias del consumidor en cuanto a volumen, calidad. Etc.
- Optimizar los beneficios de la empresa, mediante la venta de sus productos, cumpliendo con los requisitos del mercado.
- Alcanzar una estructura financiera optima tomando en cuenta las necesidades, políticas y condiciones financieras del país.
- Administrar y gerencial conforme a una estructura administrativa adecuada el logro de la misión de la empresa.

### **2.1.3 Reseña Histórica**

La Siderúrgica del Orinoco "Alfredo Maneiro" o SIDOR C.A, es un complejo siderúrgico venezolano, fundado durante el gobierno de Marcos Pérez Jiménez y ubicado cerca de la ciudad de Puerto Ordaz, para la producción de acero.

La creación de la Siderúrgica del Orinoco, C.A. se remonta hacia los años de 1926 y 1947 con el descubrimiento de los yacimientos de mineral de hierro en los cerros El Pao y Bolívar, respectivamente.

---

#### **2.1.4 Misión de Sidor.**

Ofrecer de manera eficiente obras y servicios que promuevan, en el ámbito mundial, la competitividad integral del sector siderúrgico de Guayana. El sector empresarial vinculado al sector siderúrgico de Ciudad Guayana, mantendrá una constante búsqueda de la excelencia, que le permita atender de manera competitiva las necesidades de servicios y bienes del sector, de forma similar a los mejores sectores siderúrgicos del mundo.

#### **2.1.5 Visión de Sidor.**

Ser la empresa socialista del estado venezolano, que prioriza el desarrollo del mercado nacional con miras a los mercados del ALBA, andino, caribeño y del MERCOSUR, para la fabricación de productos de acero con alto valor agregado, alineado con los objetivos estratégicos de la Nación, a los fines de alcanzar la soberanía productiva y el desarrollo sustentable del país.

#### **2.1.6 Estructura organizativa de la empresa.**

SIDOR presenta una estructura organizacional de tipo funcional, lo que garantiza al máximo la utilización de las habilidades técnicas del recurso humano, basándose en la especialización ocupacional. (Ver figura 4).

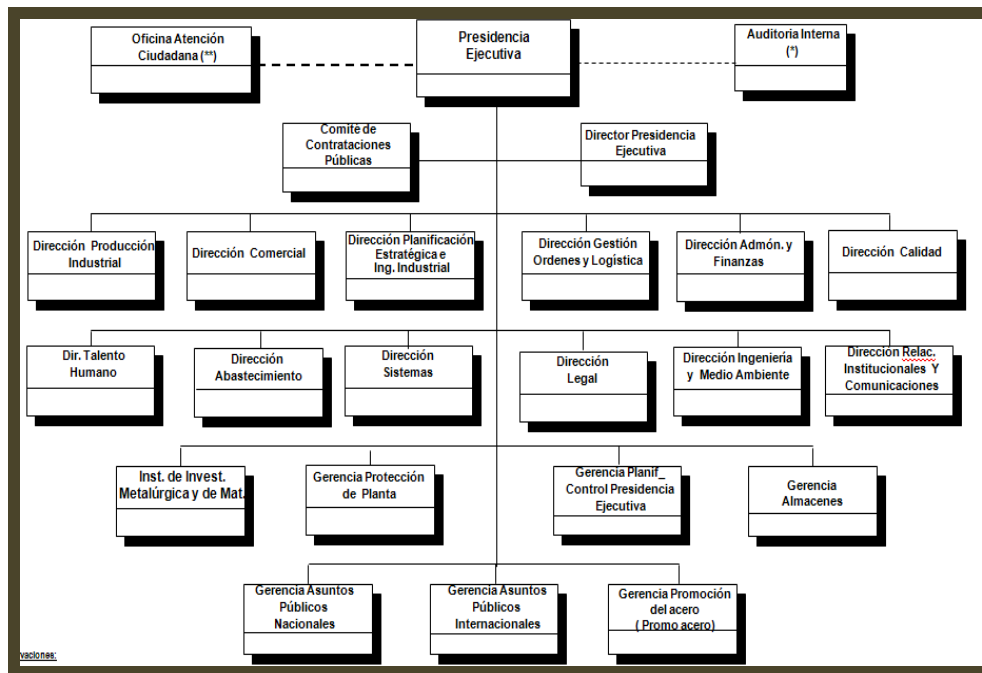


Figura 4-4: Estructura Organizativa actual de SIDOR. Fuente: Intranet.

## 2.2 Proceso productivo general de Sidor.

El proceso productivo de SIDOR se inicia con la producción de pellas piroconsolidadas, las pellas son materia prima alimentada en los hornos de reducción directa que a través de dos procesos distintos Midrex y HyL para obtener HRD. Con el hierro de reducción directa como componente principal se fabrica el acero en las acerías de planchones y de palanquillas, para obtener los semielaborados para la fabricación de los productos planos y los productos largos respectivamente.

Los planchones obtenidos pasan por el proceso de laminación en caliente y luego, las bobinas en caliente producidas pasan a la laminación en frío. El producto de la acería de palanquillas, pasa por el tren de barras o por el de alambión.

Por tal proceso las áreas de producción son:

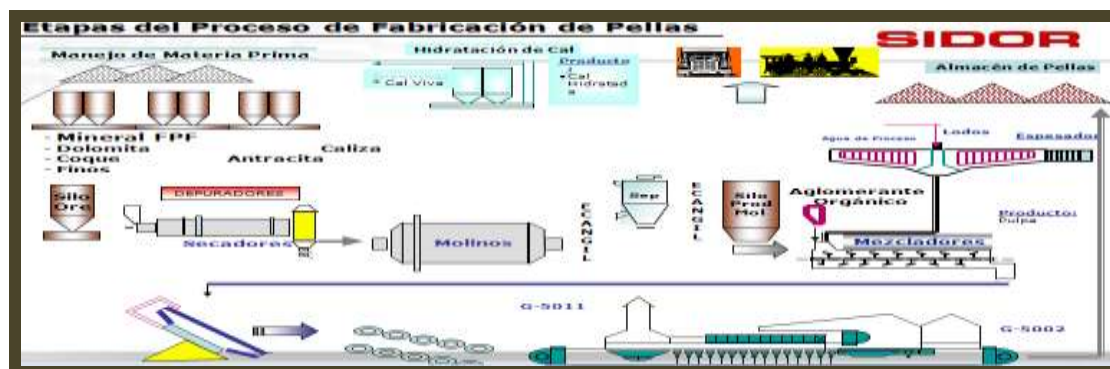
- Planta de Pellas.

- Plantas de reducción directa (Midrex I-II)
- Acería y Colada Continua de Planchones.
- Acería y Colada Continua de Palanquillas.
- Productos planos en caliente.
- Productos planos en frío.
- Tren de Barras y alambrón.

### 2.2.1 Planta de Pellas.

SIDOR C.A. cuenta con una planta de pella que permite transformar la materia prima previamente pasado por un proceso de trituración y molienda conjuntamente con aditivos y aglomerados orgánicos con la finalidad de formar aglomerados esféricos verdes. Estos aglomerados verdes son piro consolidados para darle características Físicas y Químico-Metalúrgicas apropiadas para su posterior reducción

- **Materia Prima:** Mineral de hierro proveniente de la empresa C.V.G Ferrominera Orinoco, Aditivos y aglomerados orgánicos de pellas, finos de casas de humos, glóbulos y escamas.
- **Producto:** Pellas piroconsolidadas para el consumo de las plantas de reducción directa que posee la empresa y para la venta.



Figurall-5: Secuencia de operaciones del Proceso de Peletización.



### 2.2.2 Planta de Reducción Directa (Midrex y HyL)

Las Plantas de Reducción directa Midrex y HyL de la Empresa SIDOR se encargan de procesar las pellas piro consolidadas con el fin de eliminar el oxígeno presente en las mismas mediante un gas reductor rico en CO y H<sub>2</sub>. Estas son introducidas de manera descendente dentro de un reactor y de forma ascendente se inyecta el gas reductor obteniendo así al final del proceso un HRD con alto contenido de hierro metálico destinado a las plantas de Acerías ubicadas dentro de la empresa.

- **Materia Prima:** para Midrex: Pellas provenientes de la Planta de Pella de SIDOR y para HyL pellas más complemento de mineral de hierro cribado proveniente de C.V.G. FERROMINERA.
- **Producto:** Hierro de Reducción Directa (HRD o Hierro Esponja)



Figurall-6: Distribución de las Pellas a las Plantas Reductororas del área de Prerreducidos (Pellas-Reducción).

### 2.2.3 Acería y Colada continua de planchones:

Se inicia con la carga de chatarra en el horno, la cual debe fundirse hasta cierto porcentaje, para dar inicio a la alimentación continua de hierro de reducción directa sin que se interrumpa el proceso de aceración, el cual

culmina con la obtención de acero líquido que es trasladado a los hornos de metalurgia secundaria para el afino.



**Figurall-7: Vista aérea de la Planta de Acería y Colada continua de Planchones.**

**Fuente:** [http://ingconceptual.blogspot.com/2007/05/visita-tecnica-sidor\\_22.html](http://ingconceptual.blogspot.com/2007/05/visita-tecnica-sidor_22.html).

#### **2.2.4 Acería y Colada continua de Palanquillas.**

El proceso se inicia con la carga de la chatarra al horno, la cual debe fundirse hasta un cierto porcentaje para dar inicio a la alimentación continua de hierro de reducción directa sin que se interrumpa el proceso de aceración, el cual culmina con la obtención del acero líquido.

Una vez que el acero líquido sufre el proceso de homogeneización, es trasladado por una grúa giratoria. Seguidamente el acero es vaciado sobre un distribuidor que posee seis boquillas por donde fluye el acero a los moldes de la colada continua.

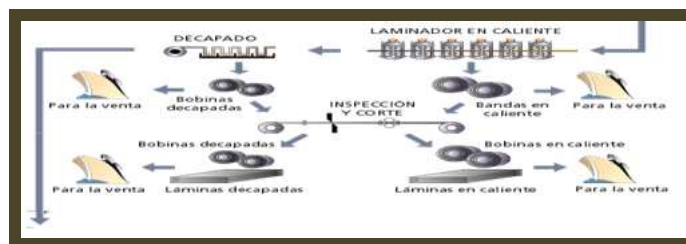


**Figurall-8: Planta de Acería y Colada continua de Palanquilla.**

**Fuente:** <http://noticiasradiolago.blogspot.com/2010/04/sidor-en-ruinas.html>.

### 2.2.5 Productos Planos en Caliente.

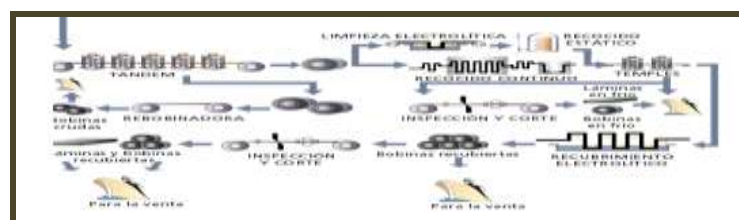
El planchón es colocado en la vía de rodillos de la mesa de los hornos de vigas galopantes, desde donde es trasladado a los hornos de calentamiento y una vez alcanzada la temperatura de laminación, es descargado en la vía de rodillos del tren IV reversible y posteriormente son enviados al Laminador en Caliente, donde son convertidos en bobina.



Figurall- 9: Secuencia de operaciones para la Laminación en caliente. Productos planos.

### 2.2.6 Productos Planos en Frío.

Consiste en la utilización de bandas en caliente para convertirlas en láminas o bobinas decapadas, estas son llevadas a los laminadores Tandem I-II que reducen aún más el espesor, produciendo acero laminado. En las líneas de Recocido I-II y Continuo se eliminan las tensiones internas que puedan tener las láminas. Para restablecer la dureza se utilizan los Temples I y II con los cuales se uniforman las características metalúrgicas del material.



Figurall- 10: Secuencia de operaciones para la Laminación en frío. Productos planos

Comienza con el calentamiento de las palanquillas en un horno de vigas galopantes, de allí pasan al tren desbastador, luego pasan al tren intermedio. El atado de las cabillas lo realizan dos máquinas para su posterior pesaje, identificación y almacenamiento.

- **Materia Prima:** Palanquillas de sección cuadrada de 130mmx130mm.
- **Producto:** Barras con resalte con diámetro que varía desde 3/8 pulgadas hasta 1 3/8 pulgadas y el largo varia desde 6 m. hasta 18 m.

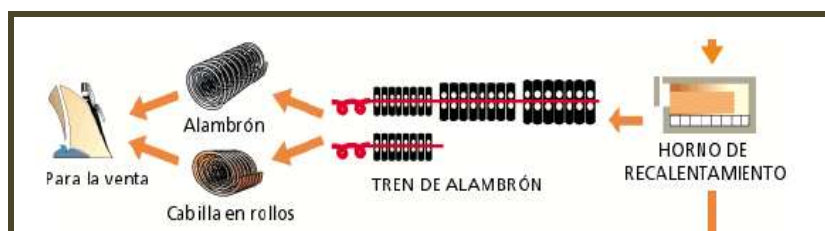


Figural- 11: Secuencia de operaciones del tren de barras. Productos largos.

## 2.2.7 Tren de Alambrón:

Este comienza con el calentamiento de las palanquillas en un horno de vigas galopantes, de allí pasan al tren de laminación compuesto por 15 bastidores horizontales, luego pasan al tren laminador compuesto por 2 bloques cada uno.

- **Materia Prima:** Palanquillas de sección cuadrada de 130 mm. X 130 mm. Y peso aproximado 1.900 Kilogramos.
- **Producto:** Alambrón de diámetro que varía desde 5,5 mm. Hasta 12.5 mm., peso aproximado 1.900 Kilogramos por rollo.



Figural-12: Esquema de tren de alambra. Productos Largos.

## **CAPITULO III**

### **MARCO TEÓRICO.**

El desarrollo de este capítulo muestra las bases teóricas necesarias para llevar a cabo el Diseño de un modelo estadístico que permita determinar la influencia del porcentaje de alúmina en los atributos de las pellas piroconsolidadas y su impacto en las plantas de Reducción Directa MIDREX.

#### **3.1 Antecedentes o Revisión de la literatura.**

Para la realización de este proyecto de investigación se procedió a la revisión de trabajos anteriores que diseñen un modelo matemático o estadístico.

##### **3.1.1 Modelo De Productividad De Las Plantas De Reducción Directa Midrex Del Complejo Siderúrgico Alfredo Maneiro.**

El trabajo de investigación que tiene por nombre “Modelo de productividad de las plantas de reducción directa Midrex del complejo siderúrgico Alfredo Maneiro”, fue elaborado por safi chartouni Samara en octubre del 2011 y tenía como propósito adaptar un modelo de cálculo de productividad programa de las plantas de reducción directa MIDREX tomando en cuenta la disminución de la calidad de la pella de alimentación, incluyendo variables de proceso que afectan en la productividad y que no han sido tomadas en cuenta en modelos anteriores.

El modelo permitió realizar proyecciones de producción en el tiempo y condiciones determinadas ayudando a los planes de producción mensual y en la elaboración del presupuesto Económico Anual (PEA).

La metodología aplicado por Samara Safi para llevar a cabo este trabajo de investigación consistió en establecer mediante el uso del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV las variables influyen directamente en la productividad de la plantas de MIDREX y excluir las que no tengan impacto significativo elaborando en función de las variables más influyentes, modelos de productividad basados en rangos en operación de variables de procesos, calidad de la pella de alimentación y calidad del HRD.

El establecimiento de modelos matemáticos permitió a la gerencia predecir y cuantificar el impacto que originan las variables que influyen directamente en la productividad de los módulos, mediante la correlación de variables de entrada, proceso y salida.

Finalizado el periodo de los análisis Safi llego a la conclusión que:

1. El análisis estadístico ANOVA multifactorial permitió identificar efectos significativos de aquellas variables que inciden en la productividad del módulo; pero es importante destacar que se debe tener conocimiento del funcionamiento del módulo a nivel de proceso de manera de identificar si realmente el comportamiento de las variables afectan el resultado final. Tanto la estadística como la realidad deben ir de la mano para obtener resultados acordes y con una buena aproximación.
2. Luego de identificadas las variables con mayor incidencia en la productividad, se procedió a establecer cinco ecuaciones mediante una regresión lineal múltiple, una por cada rango establecido de hierro total por ser el factor que genera mayor impacto negativo sobre la productividad por su continua disminución.

### **3.1.2 Determinación Del Impacto De La Alúmina Del Mineral De Hierro En La Productividad De Los Discos Peletizadores. Planta De Pellas.**

El trabajo de investigación fue realizado por Soto Eneida para la fecha de octubre del 2011 y tenía como objetivo Determinar la influencia del contenido de la alúmina del mineral de hierro en la productividad de los discos peletizadores (Línea B). El modelo permitió observar las variaciones en el contenido del porcentaje de alúmina del mineral, lo que puede estar causando un efecto desfavorable en el proceso de peletización al verse disminuida la productividad de pellas verdes.

Eneida Soto Para llevar a cabo la siguiente investigación aplicó la siguiente metodología:

- Identificar las áreas del proceso de fabricación de pellas a estudiar. Determinar los atributos de pella verde a analizar.
- Creación de una base de datos depurada con el fin de trabajar solamente con los parámetros establecidos.
- Elaboración de Gráficos comparativos del contenido de la Alúmina en el mineral de tolva y mineral molido.
- Establecer Rangos de trabajo de  $\%Al_2O_3$  para realizar un análisis estadístico de varianza ANOVA simple, a las variables consideradas para el estudio
- Formular modelos de regresión simple en función de los rangos de  $\%Al_2O_3$  establecidos y tomando en cuenta las variables influyentes según el análisis de varianza ANOVA Simple para la productividad de los discos Peletizadores.

Finalizado los análisis, Soto llegó a las siguientes conclusiones:

- Se estableció la comparación estadística del contenido de la alúmina en el mineral de tolva y mineral molido, donde se observó que a niveles estadísticos existen diferencias significativas entre los resultados. Sin embargo desde el punto de vista de proceso no aplica

ya que la diferencia estadística radica en que el mineral molido contiene aditivos que aportan cierto porcentaje de alúmina.

- Se establecieron los rangos de trabajo en el porcentaje de Alúmina en el mineral molido donde se obtuvieron cuatro clases de Rangos válidos para el estudio de los modelos de regresión simple. Rango I (0,5-0,85) 0,7662) Rango II (0,85-0,99) 0,9145) Rango III (0,99-1,13) 1,0554) Rango IV (1,13-1,6) 1,2327)
- Existe influencia del porcentaje de Alúmina en los atributos analizados en los rangos establecidos. A medida que el porcentaje de alúmina aumenta se incrementa la generación de pellas plásticas evidenciado en el aumento del número de caídas, lo que ocasiona pérdidas de productividad por ajustes en el disco para controlar el porcentaje de retorno.
- Al evaluar análisis realizados referentes a la influencia del porcentaje de alúmina del mineral de hierro en el proceso productivo de los discos peletizadores, se concluye que no puede atribuirse todo el efecto a la alúmina, ya que no se están estudiando todas las especies químicas que pudieran afectar al proceso.

Se formularon los Modelos de Regresión Simple obteniendo las siguientes ecuaciones:

- Productividad de los discos =  $799,467 - 31,0726 * Al_2O_3$
- Número de Caídas =  $18,2068 + 0,903495 * Al_2O_3$
- Granulometría Pellas Verdes 5/8" =  $5,05455 + 2,75951 * Al_2O_3$
- Granulometría Pellas Verdes < 1/4" =  $0,786273 - 0,132663 * Al_2O_3$

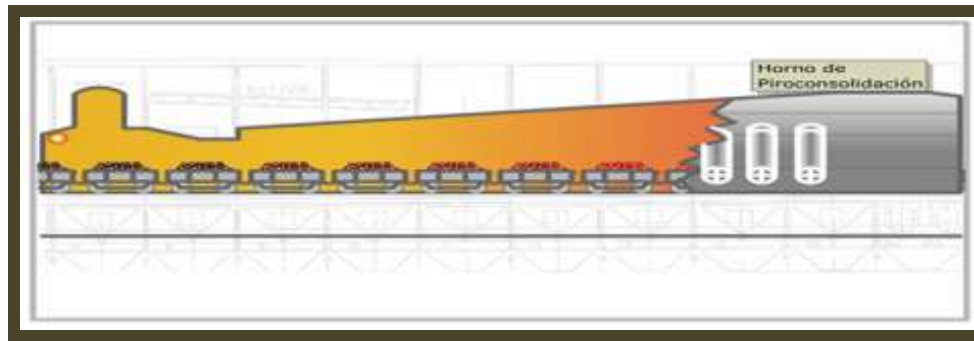


## 3.2 Proceso de Pellas Piroconsolidadas:

### 3.2.1 Horno de quemado:

Las pellas verdes cribadas son distribuidas sobre carros móviles para su piro-consolidación en el horno de quemado, donde se consolidan en un horno de parrilla móvil mediante la inyección de gas natural más aire. Esta requiere de cuidado especial en cuanto a la velocidad con la que se realiza el proceso, ya que al aumentar la velocidad aumenta la presión de vapor en el interior de las pellas provocando agrietamiento en las mismas hasta partirse.

Las pellas verdes son quemadas para mejorar sus características mecánicas, es decir, la resistencia a la compresión y el índice de abrasión (resistencia a las condiciones de transporte).



FiguraIII-13: Horno de piroconsolidación de planta de pellas  
Fuente: Intranet SIDOR 2012.

### 3.2.2 Horno de enfriamiento:

Proceso que ocurre en el enfriador anular (630AN1) luego de que las pellas caen desde el horno. Se realiza un enfriado recuperativo y uno final. El enfriador anular tiene la función de transportar una camada de pellas calcinadas por tres zonas de enfriamiento y es básicamente una parrilla que tiene forma de anillo. Las pellas provenientes del horno caen en la zona de carga del enfriador y son apiladas en una tolva, para luego ser nivelada la camada de pellas formando un lecho de grosor constante. El enfriador tiene

un accionamiento automático ajustado para mantener la nivelación adecuada. Después, el producto entra en la zona de enfriamiento donde hay un flujo de aspiración de calor hacia arriba, recuperándose de un 80% a un 90% del calor aplicado a las pellas. El aire caliente que deja el lecho es el elemento principal de intercambio de calor utilizado en el proceso de precalentado y secado y también es usado en el horno rotatorio. El enfriador anular posee tres ventiladores para el enfriamiento de las pellas, cada uno suministra aire a zonas determinadas.

Después de enfriadas las pellas son descargadas a través de una tolva a un transportador de bandejas.

### **3.2.3 Tamices:**

Después de enfriadas las pellas son descargadas en tamices que las separan, según su tamaño. Las pellas muy pequeñas son llevadas al sistema de recuperación o retorno.

### **3.2.4 Almacenamiento del producto:**

El transportador de bandejas lleva las pellas hasta una criba vibratoria donde los materiales demasiado grandes son separados, luego, se criba el material fino, y las pellas con dimensiones adecuadas son transportadas por medio de un sistema de correas al patio de almacenaje. Los rechazos obtenidos en esta etapa, son transferidos por una bomba al sistema de recuperación de desechos. El almacenaje de las pellas en el patio es realizado por medio de un apilador con capacidad de 420 toneladas por hora. El patio de almacenaje posee una capacidad de almacenamiento de unas 130.000 toneladas.

### 3.3 Proceso de Reducción Directa MIDREX

El proceso de Reducción Directa MIDREX consiste en introducir pellas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como materia prima dentro de un horno reactor, las cuales se descenden por gravedad y en contracorriente con el flujo de gas reductor, causando la eliminación del oxígeno y obteniéndose HRD, también llamado hierro esponja. Algunas características de la planta MIDREX II- Módulo B son:

- Capacidad instalada actual: 133 TM/hora efectiva, (1.007.268 TM/Año)
- Materia prima: Pellas, Gas Natural
- Producto: HRD con un grado de metalización entre 92 – 95 %.
- Clientes: acerías SIDOR, mercado externo.

El mineral de hierro o pellas, en términos químicos, presenta un alto contenido de óxido de hierro:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ó  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; los cuales son compuestos químicos donde el hierro y el oxígeno están combinados en una cierta proporción cuantitativa. Para poder producir acero, el mineral de hierro tiene que ser reducido.

Reducción Directa significa la conversión del óxido del mineral de hierro a hierro metálico, sin que ocurra cambio de fase (sólido-sólido) por medio de la separación química y extracción del oxígeno de dichos óxidos a través de gases reductores calientes como son el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y el monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ) y a consecuencia de las altas temperaturas. Las reacciones que se dan en el horno son las siguientes:

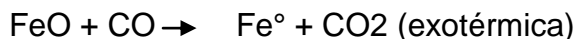
Reducción con  $\text{CO}$ :



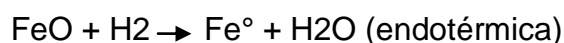
El Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> formado reacciona con:



El FeO formado reacciona con:



Reducción con H<sub>2</sub>:



A partir del CO se forma el CO<sub>2</sub> en el horno de cuba.  $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ .

A partir del H<sub>2</sub> se forma vapor de H<sub>2</sub>O en el horno de cuba.  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ .

Pequeñas cantidades de óxido de hierro permanecen aún en las pellas que salen del horno.

Debido a la termodinámica de las reacciones de reducción directa, a sus relaciones de equilibrio y a que la mayoría de estas reacciones son endotérmicas, es necesario operar los procesos a temperaturas elevadas entre 850°C y 1050°C. Mientras más baja sea la temperatura de operación, es necesario un mayor contenido de H<sub>2</sub> en el gas reductor.

A temperaturas más altas, las reacciones químicas ocurren más rápidamente. Por lo tanto, una temperatura tan alta como sea posible será deseable para la reducción directa ya que acelera la cinética de las reacciones. Pero, al operar a altas temperaturas cercanas al punto de fusión del hierro (1539 °C) se comienza a formar aglomerados, ocasionando

obstrucciones en el horno y por lo tanto pérdidas de producción. Por estas razones, la sinterización se debe evitar en cualquier caso.

Generalmente, el límite superior de temperatura lo fijan las características del mineral de hierro, tales como: el hinchamiento y la tendencia a aglomerarse, debido a la fusión incipiente de las partículas sólidas.

La secuencia de operaciones que se lleva a cabo para la producción del HRD en MIDREX son:

- Prepración de la materia prima.
- Reducción.
- Reformación.
- Manejo de materiales.

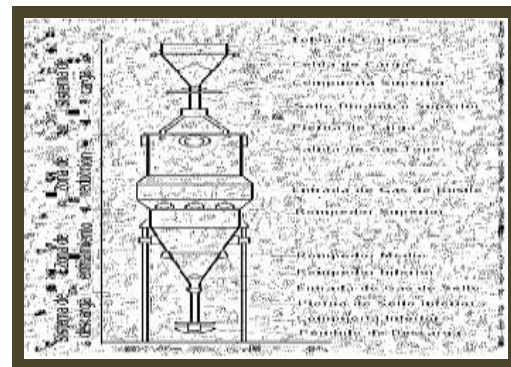
A continuación se describirá cada una de ellas.

### **3.3.1 Preparación de Materia Prima:**

En esta operación, las pellas son recubiertas con cal hidratada para evitar la adhesión entre ellas por el efecto de las altas temperaturas en el horno de reducción. Para ello la materia prima es transportada desde el patio de almacenamiento hasta el bunker a través de cintas transportadoras. En las cintas de salida del bunker se dosifica con una lechada de cal (coating) sobre las pellas en forma de garantizar el recubrimiento homogéneo del material, para formar una película sobre la superficie de la pella llamada maquillada.

### 3.3.2 Reducción:

El horno de reducción o reactor, es el elemento principal de la planta. En él se lleva a cabo la reducción del mineral de hierro por el gas bustle a elevadas temperaturas. Es un cilindro metálico hueco recubierto de refractario, donde se realizan diferentes operaciones a medida que las pellas pasan por cinco sistemas o zonas; estas son: carga, reducción, transición, enfriamiento y descarga.



**Figuralll- 14:** Reactor de tecnología MIDREX.

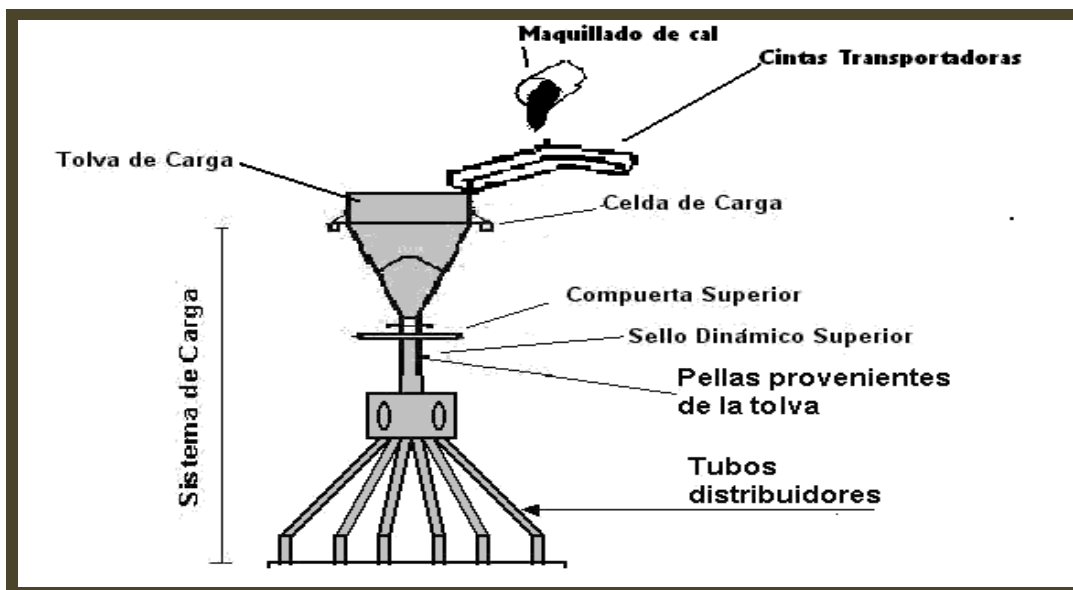
**Fuente:** Intranet SIDOR 2012.

### 3.3.3 Sistema de carga:

La materia prima previamente maquilladas se introduce en los módulos MIDREX a través de las cintas transportadoras. Por acción de la gravedad, estas van descendido por la tolva de alimentación, la cual se encuentra abierta a la atmosfera para facilitar la recepción del material.

En la tolva las pellas son acumuladas para asegurar la continuidad de operación del reactor en caso de interrupciones del sistema de alimentación.

Consta de una sección cilíndrica corta en la parte superior y una sección cónica impide la acumulación de pellas en la tolva y permite que los finos puedan ser incluidos en la carga.



**FiguraIII- 15: Sistema de Carga del Reactor**

Fuente: Intranet SIDOR 2012.

### 3.3.4 Zona de Reducción:

Esta zona comprende desde el techo del horno hasta la parte baja de la zona del bustle.

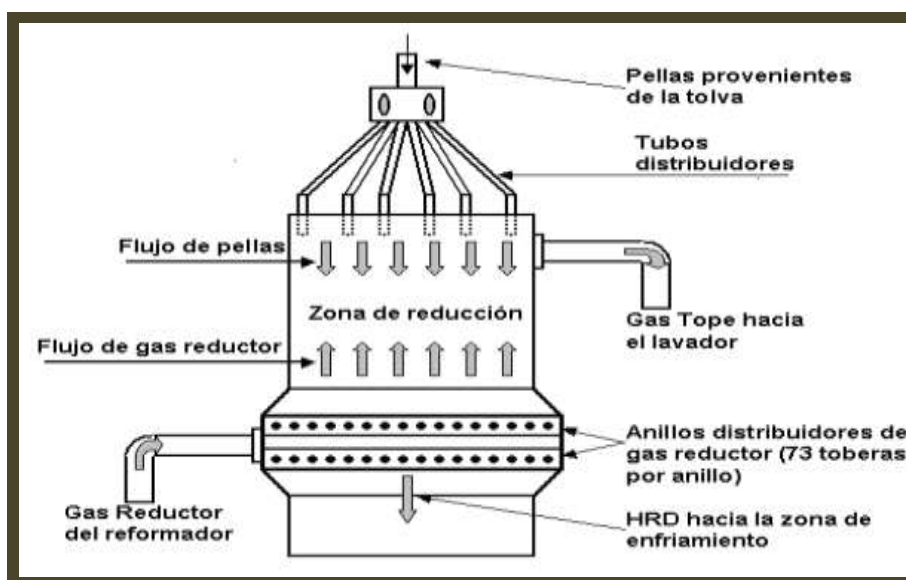
Las pellas alimentadas al horno van descendiendo por efecto de la fuerza de gravedad a través de la zona de reducción en contracorriente con el gas inyectado en la zona del bustle.

El gas reductor o gas bustle ingresa al reactor con una temperatura entre  $960 + 100$  °C. En la medida en que el gas asciende se va haciendo más rico en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , mientras que el material en descenso se va

concentrando en hierro metálico ( $\text{Fe}^0$ ), transformándose gradualmente en HRD.

El ingreso del gas al interior del horno se hace a través de dos anillos distribuidores de setenta y tres (73) toberas equidistantes entre sí, para lograr una distribución uniforme.

Al llegar a la zona del tope del reactor, el gas que fluye en contracorriente a las pellas, sale como gas tope (contiene principalmente  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ) con una temperatura aproximada de  $400^\circ\text{C}$ , mientras que el HRD deja la zona de reducción con temperaturas aproximadas de  $800^\circ\text{C}$ - $850^\circ\text{C}$ . El tratamiento con lechada de cal que reciben las pellas en la carga del horno evitan la aglomeración de las pellas y posterior sinterización.



**FiguraIII-16:** Zona de Reducción del Reactor

*Fuente:* Intranet SIDOR 2012.

Esta es la zona de mayor temperatura, cantidad de hierro metalizado y concentración de hidrógeno y monóxido de carbono dentro del reactor.

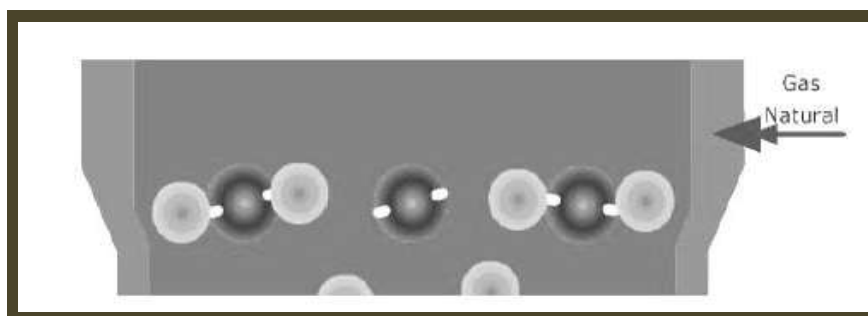


Las pellas son porosas, de modo que el gas bustle penetra en su interior a través de los poros y su densidad es cerca de 2.2 gr/cm<sup>3</sup> mientras que las pellas metalizadas o HRD, tienen una densidad de masa cercana a 1.7 gr/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.5 Zona de Transición o Isobáric:

Al salir de la zona de reducción, las pellas ya metalizadas entran a la zona de transición o isobárica cuyo objetivo es igualar la presión entre la zona de reducción y la zona de enfriamiento. Al descender el material desde la parte inferior del anillo de toberas del bustle, pasan por los rompedores superiores cuya función es romper cualquier formación de aglomerados entre HRD, facilitando el flujo de sólidos

En esta zona se inyecta gas natural con el fin de promover la reformación in situ, aumentar el contenido de carbono en el producto e incrementar la eficiencia del proceso.



**FiguralII-17:** Zona de transición y rompedores superiores

*Fuente:* Intranet SIDOR 2012.

### 3.3.6 Zona de Enfriamiento:

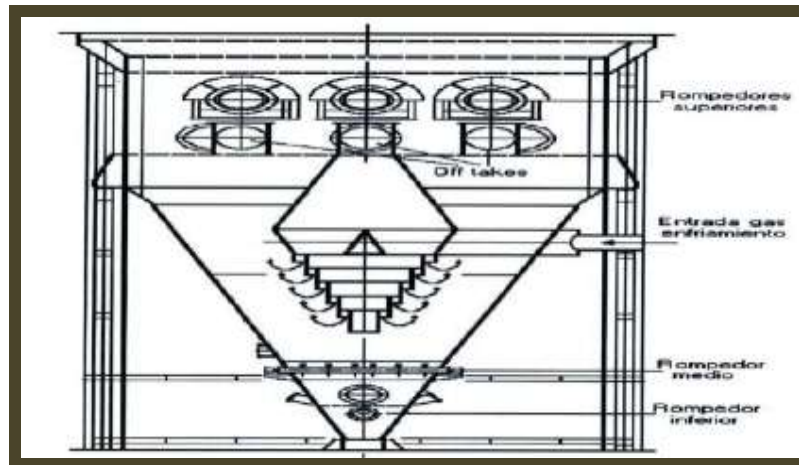
A la temperatura de reducción, las pellas metalizadas comenzarán a arder inmediatamente de ser expuestas al aire, ya que con el oxígeno del

aire el hierro se oxida a óxido de hierro. Para evitar oxidación de las pellas metalizadas cuando se descarguen del horno, estas son enfriadas en el mismo.

El material desciende de la zona de transición a la zona de enfriamiento cuyo objetivo es bajar la temperatura del HRD a  $<50^{\circ}\text{C}$  para su manejo en los sistemas de transporte. Además de enfriar el HRD, en esta zona se realiza la deposición del carbono, mediante el craqueo del metano ( $\text{CH}_4$ ) presente en el gas de enfriamiento, para obtener valores de 2,0 a 2,2% de carbono aproximadamente en el HRD.

El gas de enfriamiento ingresa en el reactor a través un distribuidor, que consiste de tubos coniformes que están colocados en cada uno de los otros concéntricamente que disminuyen su diámetro descendentemente y están lateralmente perforados, a éste distribuidor se le conoce como árbol de navidad (Ver figura N°8). Éste asegura un enfriamiento homogéneo en todo el material, permitiendo la salida de gas a diferentes niveles y a lo largo de todo su perímetro.

El gas de enfriamiento saliente del reactor, entra en un colector que consiste en canales invertidos U. Estas secciones, denominadas Off takes, salen a un lado del horno y descargan a un cabezal de tubos para llevar al gas al lavador de gas de enfriamiento, donde será lavado, enfriado y retornado nuevamente al horno a través del compresor de gas de enfriamiento, ingresando al árbol de navidad para iniciar nuevamente el circuito.



**Figura III-18: Zona de enfriamiento**

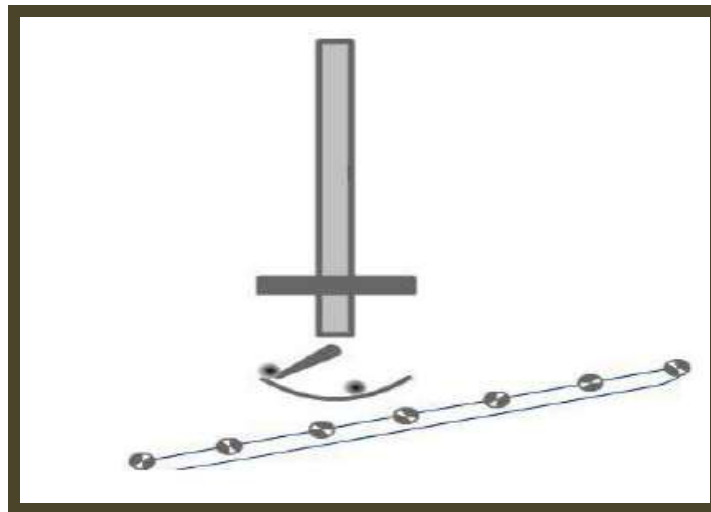
*Fuente: Intranet SIDOR 2012.*

En cuanto al HRD enfriado, éste continúa su descenso y pasa a través de los rompedores medios e inferiores para permitir el flujo adecuado del material y romper cualquier aglomerado, costra o material adherido en las paredes del reactor (finos metalizados anclados en el refractario que cubre las paredes internas del reactor).

### **3.3.7 Zona de descarga:**

El sistema de descarga controla la cantidad de producto metalizado descargado del reactor. Está compuesto por la pierna del reactor, un cajón y el péndulo. El péndulo es un dispositivo accionado hidráulicamente que se traslada de un extremo a otro del cajón, empujando cada vez una cantidad constante del material por el borde hacia la cinta transportadora. Debajo de la cinta están instaladas balanzas las cuales miden la cantidad de material producido.

La capacidad de descarga del péndulo es de 133 Ton/hora. Si el péndulo se mueve más rápido, la cantidad de pellas que fluyen a través del horno será mayor así que su velocidad se ajusta en función de la productividad requerida.



**Figura III-19: Péndulo de descarga**

*Fuente: Intranet SIDOR 2012.*

Sobre el péndulo está ubicada la compuerta de sello inferior la cual sirve para sellar el horno de cuba, por ejemplo, durante reparaciones del sistema transportador ó del péndulo.

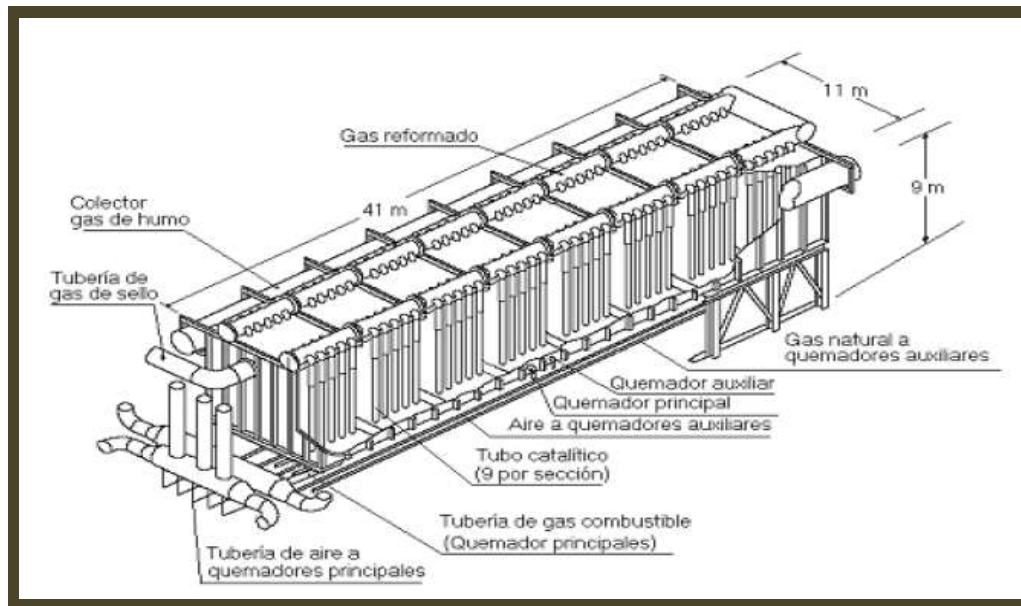
Para evitar el escape de gas bustle y de gas de enfriamiento del horno, y por ende su exposición al aire, se inyecta gas de sello en la parte superior e inferior del horno con una presión superior a la presión interna del mismo.

### **3.3.8 Reformación:**

El proceso químico en el cual el gas bustle es generado tiene lugar en el reformador. El reformador es una gran estructura metálica en forma rectangular, hermética, cubierta internamente con refractarios en las paredes y con lana aislante en el techo, atravesada verticalmente por 320 tubos porta catalizadores, alineados longitudinalmente y distribuidos en seis (6) filas, dos (2) de dieciséis (16) tubos cada una y cuatro (4) de setenta y dos (72) cada una. Estos tubos son de una aleación especial de acero diseñados para

resistir altas temperatura de operación y están llenos de diferentes tipos de catalizadores, como lo son (desde el fondo al tope):

- Una capa de material inerte.(0% níquel)
- Catalizador de baja actividad (aprox. 5% de níquel).
- Catalizador con elevada actividad.(aprox. 11% níquel)

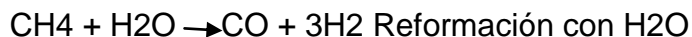
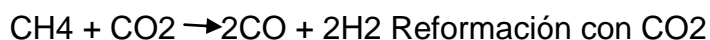


**FiguraIII-20: Reformador**

**Fuente: Intranet SIDOR 2012.**

Reformación es la reacción de un hidrocarburo (metano, propano, etc.) con  $H_2O$  y/o  $CO_2$  para producir los gases reductores  $CO$  e  $H_2$ . Las reacciones de reformación son endotérmicas, es decir, requieren que se les suministre calor para que la reacción ocurra en la dirección de producir  $CO$  y  $H_2$ , además, requieren de un catalizador para acelerar dichas reacciones. El reformador provee un gas reformado que aporta el calor necesario para promover y mantener las reacciones de reformación, genera calor para el

proceso de reducción directa. Las principales reacciones químicas que tienen lugar en la reformación son las siguientes:



Como se observa:

- Durante la reformación del  $\text{CH}_4$  con vapor de agua, se produce más hidrógeno, lo que equivale a decir 3 partes en volumen de hidrógeno por una parte en volumen de CO.
- Durante la reformación del  $\text{CH}_4$  con  $\text{CO}_2$ , sin embargo, dos partes en volumen de hidrógeno y dos partes en volumen de CO son formadas.

La secuencia en el reformador es la siguiente:

1. El gas natural es precalentado en un recuperador de calor en la zona de humos del reformador.
2. El gas de alimentación (gas proceso más gas natural precalentado) es calentado y distribuido hacia los tubos del reformador a través de dos cabezales ubicados en la parte inferior y a lo largo del reformador. Cada cabezal supe a dos filas a través de los tubos flexibles.
3. El gas de alimentación que entra por la parte inferior de cada tubo a unos  $460^\circ\text{C}$ , se pone en contacto con el catalizador, convirtiéndose en gas reformado (hidrógeno y monóxido de carbono) y sale por la parte superior a una temperatura de  $920^\circ\text{C}$  (en promedio)

4. El gas reformado caliente de cada tubo es colectado por dos ductos paralelos ubicados en el techo del reformador. Estos convergen en un solo ducto.
5. En el ducto común de gas reformado se inyecta una corriente de gas natural para evitar la metanación y para formar in situ. Se incrementa su temperatura entre 990°C y 1010°C a través de inyección de oxígeno.
6. Finalmente ingresa en el reactor.

El gas proceso (60% de gas tope enfriado) suministra el oxígeno para la reformación en forma de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Este gas tope aún contiene CO y H<sub>2</sub> los cuales se recirculados al reformador nuevamente para la reducción del mineral de hierro.

Para la reformación se requiere calor por las razones siguientes:

- Reacciones de reformación comienzan a darse a temperaturas de 750°C
- La reformación es altamente endotérmica; o sea, se consume calor durante las reacciones. Por esta razón, se debe añadir calor continuamente al gas, también durante las reacciones en el reformador.

El calor requerido es añadido en la forma siguiente:

- Antes de introducir el gas de alimentación al reformador, es precalentado en el recuperador a 400°C aproximadamente.

- El reformador es calentado por medio de quemadores. Entonces, el gas en el reformador es finalmente calentado a una temperatura de aproximadamente 900°C.
- Todas las combustiones son reacciones exotérmicas, es decir, se desprenden calor.

En el fondo, el reformador incluye 5 filas con un total de 120 quemadores principales, demás de 48 quemadores auxiliares. Los quemadores principales operan con una mezcla de gas tope combustible y gas natural y con aire de combustión precalentado a una temperatura aproximada de 640°C, en cambio los quemadores auxiliares operan con gas natural y aire frío únicamente.

Los gases generados en la combustión del reformador, dejan la sección de la cámara, a una temperatura aproximada de 1100 °C. Este flujo de gas caliente es extraído por el extractor de gases para pasar por 8 aberturas circulares que lo conducen a los ductos de gas de humos, extendidos a lo largo de la caja del reformador, un ducto por cada lado. Estos ductos están internamente recubiertos de material refractario. El flujo de gas caliente es usado para precalentar otros gases, como:

- Aire para los quemadores principales del reformador.
- El gas de alimentación que va a los tubos porta catalizadores del reformador.
- El gas natural que se le inyecta al gas de proceso

El resto entra en un compresor para ser extraído y finalmente retirado a la atmósfera por una chimenea de 40 metros de altura.



Parte del gas de combustión centra su uso como gas de sello, en el generador de gas inerte. Un catalizador es usado en los tubos porta catalizadores del reformador para realizar las reacciones de reformación. Un catalizador es una sustancia que acelera o disminuye la velocidad de las reacciones. En este caso, el catalizador acelera, ya que las reacciones de reformación son sumamente lentas.

El catalizador no se consume durante la reacción. Su actividad (eficiencia), no obstante, puede disminuir con el transcurso del tiempo. Entonces, el catalizador debe ser regenerado o reemplazado.

En caso de que la actividad del catalizador disminuya, son generados menos  $H_2$  y CO en el reformador. Por consiguiente, el contenido de  $H_2$  y CO en el gas reformado disminuye considerablemente.

### **3.4 Sistema de Manejo de Materiales:**

El sistema de manejo de materiales comprende el sistema de manejo de materia prima y el sistema de manejo de producto, descritos a continuación.

### **3.5 Sistema de manejo de materia prima:**

Las pellas destinadas para los módulos de MIDREX II son enviadas por bunkers o cintas transportadoras a los silos y de allí son cargadas directamente al reactor. El sistema de manejo de pellas para la planta MIDREX II permite la operación simultánea de los tres módulos.

Las pellas, antes de su ingreso al horno, son tratadas con una lechada de cal (coating) para así evitar su aglomeración dentro del horno de reducción cuando se opera con altas temperaturas en el gas de bustle. Esto se realiza cuando las pellas están en las cintas que las transportan a la tolva de carga del reactor.

### **3.5.1 Sistema de manejo del producto (HRD):**

El material ya metalizado o HRD es descargado del reactor y mediante cintas transportadoras es trasladado a los patios de almacenamiento o silos, de allí los HRD que cumplan con las especificaciones de calidad requeridas son trasladados mediante camiones a los patios que distribuyen el material para las acerías.

En caso de que el material metalizado sea desviado a patio, en un principio este deberá distribuirse en pilas pequeñas, no más de un metro de altura, hasta su total pasivación, es decir, hasta estar seguro que el material metalizado está totalmente frío.

En el caso de que el material metalizado se almacene en el silo de producto, esto deberá hacerse bajo una atmósfera inerte, es decir, inyectando gas nitrógeno al silo de producto.

### **3.6 Variables que influyen en la productividad del módulo:**

La reducción en el horno de cuba no es completa. De acuerdo a la calidad del mineral y a las condiciones operacionales de la planta,

aproximadamente 92 – 96 % del óxido de hierro son solamente reducidos a hierro.

La productividad de cualquier proceso de reducción directa es fuertemente afectada por la Reducibilidad del mineral alimentado, de allí la importancia de la caracterización de este mineral, para que en base a sus propiedades se determinen las condiciones de operación.

Por Reducibilidad del mineral se entiende la facilidad de los óxidos de hierro para ceder oxígeno por la acción de los elementos reductores y depende la estructura cristalográfica del mineral, del proceso empleado, de su temperatura de operación y de la composición del gas reductor, entre otros factores que se analizan posteriormente.

El grado de reducción del producto de Reducción Directa es la relación del oxígeno removido del Mineral de Hierro con la cantidad original de oxígeno en el Mineral de Hierro.

$$\% \text{ Reducción} = (\text{O}_2 \text{ removido} / \text{O}_2 \text{ inicial}) \times 100$$

La Reducibilidad de un mineral, se ve afectada por una serie de factores, entre los cuales, los más importantes son los siguientes:

### 3.7 Calidad de la Pella de alimentación:

- **Porcentaje de hierro total (FeT):** Porcentaje de hierro en la pella.
- **Composición del mineral:** Se ve determinada por el contenido de hierro total, de hematita, de magnetita, y de ganga. La ganga es el material sólido inerte que no participa directamente en las reacciones de reducción directa, sus componentes principalmente son CaO, MgO,

$\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La ganga sin embargo influye en algunas propiedades, tales como: el hinchamiento y la tendencia a la aglomeración.

El contenido global de ganga es importante en el proceso final ya que está en relación directa con el consumo de energía en las acerías eléctricas, y el contenido de ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) en el producto metalizado no debe exceder el 4%. Generalmente, la influencia de la ganga se analiza en base a los llamados índices de basicidad:

**-Binaria:** Se conoce como el coeficiente de cal y da la relación entre los óxidos básicos y los óxidos ácidos  $B_2 = \text{CaO} / \text{SiO}_2$

**-Cuaternaria:** Da la relación de óxidos básicos y óxidos ácidos incluyendo la relación existente entre otros elementos  $B_4 = \text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ .

- **El contenido de azufre (S):** El contenido de azufre de la materia prima, pellas y gas natural, debe ser controlado también a la salida del gas tope, ya que si sobrepasa los niveles de 0.008 – 0.010 %, es necesario determinar el contenido de  $\text{H}_2\text{S}$  a fin de no envenenar el catalizador del reformador; lo que ocasiona la pérdida de la actividad del mismo y por lo tanto pérdida de la producción de la Planta.
- **Resistencia a la compresión (RC):** Es la fuerza mínima que soporta una pella antes de resquebrajarse. El objeto de esta prueba es medir la capacidad de resistencia de las pellas, ya que las mismas deben soportar dentro de los reactores el peso de la columna que tienen por encima, además de las condiciones inherentes al proceso de reducción en sí; sin deteriorarse físicamente.
- **Uniformidad granulométrica:** Es la distribución de uniforme tamaños en las pellas, de suma importancia para la velocidad de reducción y la

productividad de la planta. Se prefiere partículas homogéneas, en tamaño, para evitar canalizaciones que causen problemas de caída de presión y de producto no uniforme. El tamaño deseable para la carga de un horno de cuba es como sigue:

9,5 -16 mm → 95% mínimo de la muestra

6 mm → 1,5% máximo de la muestra

- **Porosidad:** La porosidad determina la velocidad de entrada de los gases reductores ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ) y la salida de los productos gaseosos ( $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ ). Se calcula como la razón de poros abiertos entre el volumen total de la pella.

$$P = \left( 1 - \frac{da}{dr} \right) * 100$$

Donde P: Porosidad de la pella

da: densidad aparente de las pellas

dr: densidad real de las pellas

Los minerales porosos tienden a tener mayor Reducibilidad que los no porosos, ya que son más permeables al gas, permitiendo que se logre una mayor reducción en un tiempo más corto. La porosidad debe estar en el rango entre 20 y 23%. Una porosidad muy baja no permite el acceso de los gases reductores dentro de la pella para remover el oxígeno. Una pella con porosidad muy alta puede ser débil y quebradiza.

- **Índice de tambor:** Es el índice que refleja la estabilidad física del material (pellas) que se maneja. Es la proporción de la muestra que mantiene su granulometría después del ensayo, mayor a 6.35 mm ( $1/4''$ ). Se considera que el valor de índice de tambor óptimo tiene un

valor mínimo de 94.5% – 95.5% para pellas y 85 - 90% para minerales.

- **Índice de abrasión:** Es indicativo de la degradación que sufre el material en general y denota la capacidad de generación de polvo del material con el manejo. El valor máximo aceptable para pellas es del 5% máximo
- **Aglomeración del mineral:** Si el mineral tiende a aglomerarse por fusión incipiente (tendencia a formar bolas); entonces se obliga a operar el proceso a menor temperatura, lo cual ocasiona que la productividad baje. Todos estos parámetros son importantes para garantizar la estabilidad estructural del HRD, motivado al hecho que, el mismo es un material con resistencia física menor que la materia prima de alimentación En la siguiente tabla se establecen las especificaciones de las pellas consumidas en las plantas MIDREX.

Tablalll-1: Rangos permisibles para la calidad de la pella de alimentación: Fuente: Intranet SIDOR 2012.

Tipo Atributo	Consumo Interno		
	Esperado	Máximo	Mínimo
FeT (%)	67.2		67
SiO <sub>2</sub> (%)	1.66	1.88	
MgO (%)	0.35	0.4	0.3
P	0.051	0.06	-
B <sub>2</sub>	0.65	0.7	0.6
Fracción útil	90	-	88
+1/2'' (%)	45	-	35
-1/4''+1/8'' (%)	-	0.7	-
Envase	-	0.7	-
I.Tambor (%)	95.5	-	95
I. Abrasión (%)	4.5	5	
R.C (Kg/pella)	310	370	280
Porosidad (%)	21	23	20

### 3.8 Glosario De Términos:

**Aglomeración:** define, de manera general, procesos mediante los cuales se compacta un material fino, ya sea subproducto de una operación principal o que voluntariamente se muele, para formar otro material; puede desarrollarse a altas o bajas temperaturas.

**Aglomerado:** unión de pellas durante el proceso de reducción como consecuencia de las altas temperaturas en el horno.

**Análisis granulométrico:** es la determinación de la distribución de tamaños de partícula que conforman una muestra, mediante la separación de las mismas utilizando uno o más tamices.

**Análisis Químicos:** consiste en la identificación, cualitativa o cuantitativa, de los ingredientes de una sustancia, mediante la utilización de métodos químicos, convencionales e instrumentales, siguiendo procedimientos estándares establecidos en normas técnicas de referencia.

**Condición con inyección de oxígeno:** inyección de oxígeno al gas reductor para aumentar su poder de reducción y temperatura.

**Condición sin inyección de oxígeno:** ausencia de inyección de oxígeno al gas reductor, usado para disminuir descargas en el horno.

**Criba o Tamiz:** malla de alambre, con diferentes tamaños de abertura, montada en una estructura de metal utilizada para separar partículas de acuerdo con su tamaño.

**Disco Peletizador:** Disco rotatorio en donde se forman las pellas verdes, debido al efecto de rodamiento provocado por el movimiento circular sobre una superficie inclinada.

**Fineza:** tamaño de las partículas de mineral que es alcanzado luego pasar por la molienda.

**Fracción útil:** porcentaje de las pellas quemadas en el rango de tamaño (- 5/8", + 3/8").

**Gas Bustle:** gas reductor.

**Gas inerte:** mezcla de nitrógeno (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y oxígeno en muy pequeña proporción.

**Hierro:** es un metal pesado y uno de los de los elementos metálicos más abundantes. Constituye alrededor del 4 al 6% de la corteza terrestre y es el más importante de los metales. Presente en estado nativo en la antigüedad y ocasionalmente en algunos meteoros, actualmente se extrae de sus minerales en forma de óxido. Estos minerales son reducidos en altos hornos con la participación, de, entre otros, el coque y la caliza para producir arrabio o reducido en Hornos de Reducción Directa para producir Hierro de Reducción Directa (HRD); ambos constituyen materias primas para la fabricación de acero.

**Hierro de reducción directa (HRD):** término genérico aplicado al producto de cualquiera de los procesos industriales de Reducción Directa y se refiere al producto metálico obtenido de la reducción del mineral de hierro u óxidos de hierro a temperaturas inferiores a la de fusión del hierro.

**Hierro total:** cantidad total de hierro libre (Fe<sup>o</sup>) y de hierro combinado con el oxígeno de cualquiera de los óxidos presentes en el mineral.

**Índice de Adhesión:** es una medida de la fuerza que une las partículas de un aglomerado de HRD luego del proceso de reducción directa realizado aplicando sobre la cama de muestra una carga determinada.



**Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ):** posee una composición de 72,36% de hierro y un 27,64% de oxígeno. Es de color gris oscuro a negro y fuertemente magnética.

**Número de Caídas:** Prueba física a la que se somete las pellas para determinar su resistencia a la caída.

**Número Spray:** Cantidad de Spray con agua necesario para controlar el tamaño de las Pellas.

**Peletizacion:** Proceso que consiste en la aglomeración del mineral finamente molido o un concentrado por la adición de aglomerantes como el caso de la bentonita y determinada cantidad de agua para darle forma de partículas esféricas (Pellas verdes).

**Prerreducidos:** término genérico aplicado al producto de cualquiera de los procesos industriales de Reducción Directa y se refiere a aquel producto obtenido de la reducción del mineral de hierro a temperaturas inferiores a la de fusión del hierro.

**Pella:** aglomerado de forma esférica producido a partir de concentrados o de minerales de hierro de diferentes características químicas y mineralógicas con propiedades tales como distribución uniforme de tamaño, alta y uniforme porosidad, alto contenido de hierro, prácticamente sin pérdidas por ignición o volátiles, características mineralógicas uniformes, resistencia mecánica alta y uniforme, buen comportamiento durante el transporte y suficiente resistencia mecánica aun en condiciones de esfuerzos bajo condiciones de atmósferas reductoras.

**Pellas verdes:** Aglomerado de mineral de hierro y aditivos de forma esférica, que aún no ha sido sometido al proceso de endurecimiento térmico (piroconsolidación).

**Pella verde húmeda:** pella sin endurecimiento por cocción con humedad entre 8 y 9%.

**Pellas verde seca:** pella sin endurecimiento por cocción que son introducidas en una estufa a 105 °C por 2 horas para determinar porcentaje de humedad de las pellas verdes húmedas.

**Pella quemada:** pella endurecida después de ser sometida a proceso de piroconsolidación.

**Pila:** acumulación de material en un sitio determinado.

**Porosidad:** cantidad de orificios (poros) presentes en un mineral o pella.

**Porcentaje Retorno:** cantidad porcentual de material que retorna a los disco como rechazo de la doble criba de rodillos.

**Reducción Directa:** cualquier proceso en el cual se obtiene hierro metálico mediante la reducción de mineral de hierro a temperaturas de fusión inferiores a la de cualquiera de los materiales envueltos.

**Reducibilidad:** es la facilidad con la cual el oxígeno combinado con el hierro puede ser removido del mineral natural o procesado, empleando un gas reductor.

**R.P.M:** revoluciones por minuto del Disco Peletizador.

**Variables Clave:** es la variable que afecta Directamente la calidad del Producto.

**Variable Operativa:** variable que afecta el funcionamiento de los equipos operativos o que sirve de vínculo en el control de la variable clave.

**Degradación a Baja Temperatura (DBT):** esta referida a la desintegración dinámica del tamaño de los minerales gruesos o de los aglomerados, que ocurre bajo las condiciones que prevalecen en la parte superior de una cuba

de alto horno o en reactores para HRD. Se reporta como % en peso empleando la siguiente formula:

$$\% DBT = \frac{P_{(-1/4")}}{P_f} \times 100$$

donde,  $P_{(-1/4")}$  = es el peso del material de -1/4"

(g)

Pf = es el peso final de la muestra completa (g)

**Basicidad Binaria:** relación entre el porcentaje de CaO y porcentaje de SiO<sub>2</sub> en el mineral o pella que determina la cantidad de cal a utilizar en los hornos de acería para lograr acero con una calidad determinada

**Caídas Cualitativas:** relación entre la proporción del material que no cumple con las especificaciones programadas en su fabricación respecto a la producción total de la planta en un periodo determinado.

**Capacidad de Proceso:** Es un índice estadístico que se utiliza para medir la capacidad que tiene un atributo de un producto o una variable del proceso para cumplir con las especificaciones requeridas.

**Criba o Tamiz:** malla de alambre, con diferentes tamaños de abertura, montada en una estructura de metal utilizada para separar partículas de acuerdo con su tamaño.

**Número de caídas:** prueba física realizada a las pellas verdes para determinar el número de caídas que puede soportar sin agrietarse o deformarse.

**Resistencia a la compresión:** es el valor de máxima carga de compresión aplicada a muestras individuales de pellas hasta causar el rompimiento (ruptura) de la misma, expresado en Kg.

**Granulometría:** distribución porcentual de tamaño de las partículas del material analizado.

**Índice de abrasión:** es una medida relativa de la degradación de tamaño del material en trozos o aglomerado por abrasión, luego de ser sometida a ensayo en un tambor giratorio. Se expresa en porcentaje en masa de la fracción de tamaño -600  $\mu$ m en una muestra, después de realizada la prueba y empleando la siguiente ecuación:

$$I.A. = \frac{[m_3 - (m_1 + m_2)]}{m_0}$$

donde,  $m_0$  = masa de la muestra para ensayo (kg)

$m_1$  = masa de la fracción de +6,30 mm de la muestra  
procesada (kg)

$m_2$  = masa de la fracción de (-6,30 mm + 600  $\mu$ ) de la muestra  
procesada (kg)

**Índice de tambor:** es una medida relativa de la resistencia del material a la ruptura o la degradación por impacto y abrasión, luego de realizado el ensayo de tambor. Se expresa el porcentaje en masa de la fracción +1/4" de la muestra luego de ensayada empleando la siguiente ecuación:

$$I.T. = \left( \frac{m_1}{m_0} \right) \times 100\%$$

, donde los términos son los mismos a los descritos para la expresión de Índice de Abrasión.

**Hinchamiento:** es el incremento del volumen de las pellas que ocurre durante la reducción.

---

**Perdidas por Calcinación (PPC):** en un ensayo que permite determinar la cantidad de materia que se pierde al quemar las pellas. En este se incluyen la materia orgánica, Agua de cristalización, agua física y los sulfuros.

**Atributo:** Características químicas, físicas y metalúrgicas que definen la calidad de la Pella.

## **CAPÍTULO IV**

### **MARCO METODOLOGICO.**

El presente capítulo estará destinado a tratar aspectos relacionados con la metodología empleada para llevar a cabo la investigación. Por consiguiente, se indica el tipo de estudio que se desarrolla, la caracterización de la muestra, los instrumentos de recolección de datos y finalmente el procedimiento.

#### **4.1 Tipo de Investigación:**

Esta investigación es de tipo aplicada ya que tiene como finalidad primordial la resolución de problema práctico inmediato.

Según Zorrilla (1993:43), la investigación de tipo aplicada “es la utilización de los conocimientos en la práctica, para aplicarlos, en la mayoría de los casos

Es descriptiva porque tiene como objetivo central la descripción del proceso de pellas quemadas y del proceso de reducción directa MIDREX II.

Esta metodología tipo descriptiva se fundamenta con lo expresado por Sabino (2000) quien la definió como;

“Ellas permiten, sin duda, poner de manifiesto los conocimientos teóricos y metodológicos de su autor, pues una buena descripción solo se puede hacer

si se domina un marco conceptual que permite integrar los datos y a la vez, se tiene el suficiente rigor como para que estos sean confiables, completos y oportunos”.

Es correlacional porque busca conocer cómo se comporta el porcentaje de alúmina del mineral de hierro en el comportamiento de los atributos de pellas quemadas y los atributos del HRD.

Según el tratamiento de los datos, se refiere a una investigación de tipo cuantitativa ya que se centra fundamentalmente en los aspectos observables y susceptibles de cuantificación de los fenómenos. Es coherente con la metodología empírica y se sirve de pruebas estadísticas.

#### **4.2 Diseño de investigación:**

Esta investigación es de campo por el hecho de realizarse en una situación natural permite la generalización de los resultados a situaciones afines; sin embargo, no permite el riguroso control propio de la investigación del laboratorio.

#### **4.3 Población y muestra:**

La población se refiere a la calidad de las pellas quemadas y las pellas de alimentación, comprendiendo su análisis físicos, granulométricos y metalúrgicos; la calidad del producto y parámetros del proceso piroconsolidadas y de la planta de Reducción directa MIDREX II-C.

Según zorrilla (1993:43) “La población es el conjunto total de individuos, objetos o medidas que poseen algunas características comunes observables en un lugar y en un momento determinado.”

La muestra corresponde al histórico de los atributos de las pellas quemadas (Propiedades físicas, metalúrgicas y Granulométricas) y los atributos del HRD (Propiedades físicas, Granulométricas y Reactividad) para el periodo 1 de Enero del 2009 hasta el 31 de Marzo del 2012.

#### **4.4 Técnicas e Instrumentos De Recolección De La Información.**

Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información. Son ejemplos de técnicas; la observación directa, la encuesta, el análisis documental, análisis de contenido, entre otras y los métodos de recolección de datos, se pueden definir como: el medio a través del cual el investigador se relaciona con los participantes para obtener la información necesaria que le permita lograr los objetivos de la investigación.

Los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Ejemplos: fichas, formatos de cuestionario, de guías de entrevista, lista de cotejo, grabadores, escalas de actitudes u opinión, entre otras.

Las técnicas utilizadas para recolectar la información se detallan a continuación:



---

#### **4.4.1 Revisión de antiguos trabajos realizados en el área:**

Comprende la exploración bibliográfica de documentos relacionados con la investigación, que describen últimas actualizaciones y metodologías para el cálculo estadístico que nos permita determinar la influencia del porcentaje de alúmina del mineral de hierro en los procesos de pellas quemadas y reducción directa Midrex II.

#### **4.4.2 Observación directa:**

Se efectuaron recorridos o visitas a las plantas para la apreciación real del proceso y una mejor comprensión del mismo.

#### **4.4.3 Entrevistas no Estructuradas:**

Se aplicaron al personal de procesos involucrado, tutor industrial y personal del área de automatización. Se aplicaron con el fin de obtener información técnica del proceso estudiado y aclarar dudas presentadas. Son no estructuras por ser realizadas de manera informal, para consultar datos de interés y procedimientos necesarios para el desarrollo del trabajo.

#### **4.4.4 Consultas Académicas e Industriales:**

Se realizaron consultas tanto al tutor académico como al industrial, con el fin de establecer los parámetros de estudio a realizar, obtener orientación sobre los pasos a seguir para atacar el problema y contar con asesoría especializada para aclarar dudas referentes al trabajo de investigación.

#### 4.4.5 Intranet SIDOR:

Es una red interna y privada de SIDOR desde la cual se tiene acceso a diferentes módulos de la empresa. Especialmente se hace uso de:

- Site prerreducidos: modulo que aporta descripción detallada del área de prerreducidos tal como descripción de sus procesos, maquinarias, variables de proceso, condición de operación, sistemas de calidad, practicas operativas, entre otros.
- Base de datos de SIDOR: permite la recopilación de los históricos de los atributos de las pellas quemadas y los atributos del HRD. Esta recolección se realizó a partir del sistema SGL y Data Direct.

#### 4.5 Procedimientos de la investigación:

Luego de comprender la información relativa al proceso mediante la recolección de información, se procedió a realizar la siguiente secuencia de trabajo:

- **Selección de variables a estudiar:** se determinaron a partir de la lectura de descripción del proceso y prácticas operativas de la planta para comprender y clasificar las variables más influyentes al estudio.
- **Recolección de datos:** a través de la red de intranet SIDOR, se tiene acceso a la base de datos de la empresa que permite la recopilación, resguardo y acceso de la información.
- **Depuración de data:** luego de obtener el histórico de datos de los atributos de las pellas quemadas y los atributos del HRD para el

periodo enero 2009- Marzo 2012, fue necesario depurar o descartar valores atípicos y alejados del comportamiento real de la planta. Esto se logró excluyendo eventos de paradas de planta, arranque de planta, parada de péndulo de descarga y módulo en proceso de estabilización. Es de gran importancia depurar datos antes de aplicar análisis cuantitativo a fin de obtener mayor precisión Para el modelo estadístico y presentando así un comportamiento más cercano al ideal de ambas plantas.

- **Establecer rangos de trabajos:** como criterio para la propuesta del modelo estadístico, se tomaron en cuenta la división de los datos de acuerdo a una variable determinante (porcentaje de alúmina del mineral de hierro) y a partir de cada uno de esos rangos establecer el modelo estadístico adecuado, los rangos fueron establecidos mediante la herramienta histograma de frecuencias del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV.
- **Descarte de variables:** las consideraciones tomadas para el descarte de variables fueron las siguientes:
  1. A partir del análisis de varianza ANOVA simple o multifactorial aquellos atributos que no presentaron “diferencias estadísticamente significativas” fueron descartadas, ya que distintos valores para dichos atributos no causan efecto sobre la productividad.
  2. A partir de la prueba de independencia aquellos atributos que presentaron dependencia directa con otras también fueron descartadas, para evitar redundancia de variables que inciden sobre la productividad.

La prueba de independencia se basa en una prueba de hipótesis que plantea que las variables se presentan en forma

independiente en la productividad. En caso de que el estadístico de prueba (valor-P) sea menor que el nivel de significancia, se rechaza el planteamiento inicial por lo tanto se concluye que ambas variables son dependientes.

3. A partir de la gráfica de evolutivos aquellos atributos cuyo comportamiento histórico no mostro dispersión respecto al rango establecido para la misma, fueron descartadas.

Es importante tomar en cuenta que la estadística debe ir de la mano con el proceso, es decir; las decisiones no deben basarse meramente en resultados estadísticos sino también en el funcionamiento real del proceso.

#### **4.5.1 Determinar modelos estadísticos:**

Se realizó por medio de regresión multifactorial, en funciones de los rangos de trabajo establecidos y tomando en cuenta los atributos influyentes según los análisis de varianza ANOVA simple o multifactorial.

#### **4.5.2 Procedimiento de recolección de datos.**

- Fundamento de los Procesos de Pellas piroconsolidadas y reducción directa MIDREX.
- Procesos de Planta de las pellas piroconsolidadas y reducción directa Midrex.
- Estudios de los atributos de las pellas piroconsolidadas y los atributos que influyen en el proceso de reducción directa.

- Información del porcentaje de alúmina del mineral molido, pellas quemadas y la pella de alimentación.
- Información de los insumos de la planta, carga de pellas.
- Información técnica de los principales equipos de la planta de Pellas y reducción directa Midrex.

#### 4.5.7 Procesamiento de la información.

- Identificar las áreas del proceso de fabricación de pellas quemadas y HRD.
- Determinar los atributos de la pella piroconsolidadas e identificar los procesos de reducción de Midrex.
- Datos estudiados en el periodo a partir del 1 de Enero del 2009 hasta el 30 de Marzo del 2012.
- Creación de una base de datos depurada con el fin de excluir datos procedentes de eventos de parada de planta, arranques o planta en proceso de estabilización.
- Establecer Rangos de trabajo de  $\%Al_2O_3$  para realizar un análisis estadístico de varianza ANOVA simple, a las variables consideradas para el estudio.
- Formular modelos de regresión múltiples en función de los rangos de  $\% Al_2O_3$  establecidos y tomando en cuenta las variables influyentes según el análisis de varianza (ANOVA) para los atributos considerados impactados tanto en la pella piroconsolidada como en el HRD.

---

## 4.6 Análisis de Varianza.

Según García (2002) al observar una característica Continua en una muestra de una población, y considerar una o varias características cualitativas que dividen la población (y la muestra) en grupos, el objetivo será inferir si estas últimas aportan información sobre la variable continua observada, es decir, se quiere saber si los datos aportan evidencia de que el valor esperado de la variable continua es diferente en las subpoblaciones o grupos definidos por las variables categóricas.

La variable continua de análisis recibe el nombre de variable dependiente mientras que las categóricas que definen los grupos suelen llamarse variables independientes o explicativas o, más comúnmente, factores. Según Portus (2003) los posibles valores que puede tomar un factor reciben el nombre de niveles, y cada posible combinación de los niveles de los distintos factores en estudio se llama tratamiento. Al efecto que se produce cuando la influencia de un factor sobre la variable dependiente es diferente según los distintos niveles de otro factor se le conoce como interacción entre ambos factores. Los análisis de varianza utilizados fueron:

### 4.6.1 Anova simple:

Este análisis descompone la variabilidad total de la variable dependiente en componentes independientes que pueden ser atribuidas a distintas causas (factores e interacciones). El diseño del experimento en cuestión determinará el modelo matemático y la descomposición de la varianza a aplicar. Este modelo plantea un contraste de hipótesis para el cual la hipótesis nula es la igualdad de medias entre las subpoblaciones que definen los distintos niveles del factor.

Al almacenar los datos para un análisis de este tipo se debe tener en cuenta incluir un registro por individuo, una variable (numérica o no) que contenga los niveles del factor y otra (numérica) con los valores de la variable dependiente.

El procedimiento ANOVA Simple (o de un criterio de clasificación) está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor categórico  $X$  sobre una variable dependiente  $Y$ . Se realizan pruebas para determinar si hay o no diferencias significativas entre las medias, varianzas y/o medianas de  $Y$  en los diferentes niveles de  $X$ . Además, los datos se pueden presentar gráficamente de varias formas, incluyendo un gráfico múltiple de dispersión, un gráfico de medias, un gráfico ANOM, y un gráfico de medianas.

En este procedimiento, se supone que los datos se colocarán en dos columnas, una para la variable dependiente  $Y$  y una segunda identificando los niveles de  $X$ .

#### **4.6.2 Análisis descriptivos:**

La Estadística Descriptiva trata de mostrar de una manera concisa y resumida los aspectos fundamentales de un conjunto de datos. Esto supone el cálculo de medidas centrales, la cuantificación de la dispersión general de los datos alrededor de las mismas, la presentación resumida de los datos en forma de tablas y gráficos, la detección de datos atípicos, agrupaciones, tendencias, etc. Los análisis descriptivos empleados fueron: Histogramas de frecuencias, Gráficos de caja y bigotes,

#### 4.6.3 Histogramas de frecuencias:

Son representaciones gráficas en los cuales a cada grupo o intervalo se le asigna una barra cuya altura representa su frecuencia (absoluta, relativa o acumulada). El histograma da información acerca de la forma de la distribución de la variable analizada. Este análisis permite resumir la distribución de los datos contenidos en una variable mediante tablas de frecuencias. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.

Para variables discretas y categóricas, estos gráficos dirán cuántas observaciones tienen cada posible valor de esa variable. Para las continuas se crearán intervalos que constituyan una partición del rango total de la variable, y las tablas dirán cuántas observaciones tienen su valor dentro de cada uno de los posibles intervalos.

El número de observaciones en cada valor (o intervalo) se llama frecuencia absoluta. El porcentaje que representa sobre el total de las observaciones se llama frecuencia relativa. Las frecuencias acumuladas representan el número de observaciones (o porcentaje que representan, según se trate de frecuencias absolutas o relativas) que toman un determinado valor y todos los menores que él.

#### 4.6.4 Gráficos de caja y bigotes:

Los gráficos de caja y bigotes son otra herramienta descriptiva que permite conocer las características generales de la distribución de una variable a partir de los datos muestrales. Consta de una caja central cuya amplitud es el rango intercuartílico, esto es, el 50% central de la distribución.



La caja es atravesada por una línea que representa la mediana, que por lo tanto la divide en dos subcajas que contienen el mismo porcentaje de distribución (25%). El 50% restante de la distribución (25% por encima de la caja y 25% por debajo) se representa de la siguiente manera: como una línea continua el rango que contiene aquellos datos que no se separan del cuartil más cercano más de 1.5 veces el rango intercuartílico, y como puntos individuales el resto, que son así considerados como atípicos.

Estos gráficos son útiles para estudiar ajustes a distribuciones determinadas, simetrías y detección de valores atípicos.

#### **4.6.5 Análisis de comparación:**

El procedimiento de Comparación de dos Muestras está diseñado para comparar dos muestras independientes de datos de variables. Las pruebas son corridas para determinar si existe o no diferencia significativa entre medias, varianzas, medianas desviación estándar y/o distribución de las poblaciones de las cuales las muestras fueron tomadas. En adición, los datos pueden ser mostrados gráficamente de varias maneras, incluyendo un histograma dual, una gráfica de caja y bigotes dual.

En este procedimiento se asume que no existe relación entre una observación seleccionada en una muestra y cualquier observación específica en otra muestra, dado que las dos poblaciones deben estar definidas por una característica diferenciadora que permita clasificar los valores correspondientes.

## **CAPITULO V**

### **ANALISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.**

Con la finalidad de cumplir los objetivos planteados, se ejecutan una serie de pasos tomando en cuenta los siguientes atributos consideradas influyentes de acuerdo al estudio del proceso.

#### **5.1 Descripción de la situación actual del proceso de Pellas Piroconsolidadas y el proceso de Reducción Directa MIDREX II.**

##### **5.1.1 Descripción de planta de pellas**

La Planta de Pellas es una planta diseñada para fabricar materia prima (Pellas) adecuada para los procesos de Reducción, tomando en cuenta la dificultad de esos procesos en operar con materiales muy finos o con alta proporción de fino. Esta planta está compuesta por 4 etapas las cuales son:

- Recepción del mineral de hierro
- Preparación y Molienda.
- Peletización y Piroconsolidación.

A continuación se describirán estos procesos en forma más detallada.

- a) Recepción del mineral de hierro:** El mineral proviene de ferrominera del Orinoco y se hace por medio de un sistema de trenes, una vez en Sidor el tren se detiene sobre unos rieles ubicados encima de la tolva de recepción, a través de varillas

electromagnéticas se abren las compuertas situadas en la parte inferior de los vagones, una vez descargada la tolva el mineral de hierro cae por gravedad a una cinta transportadora y es enviada a la planta o patios de almacenamiento.

**b) Preparación y Molienda:** En ésta área la mezcla de mineral y aditivos es secada, molida y mezclada con la pulpa húmeda proveniente del espesador para ser enviado al área de peletización. la preparación de la materia prima comprende la combinación de mineral de hierro con aditivos y materiales reciclados, para su posterior secado, esta mezcla se almacenada en los silos de materia prima, la cual se dosifica a través de los platos giratorios de velocidad regulable, a la cintas que los transportan a los secadores, donde se le extrae la humedad, quedando este con una humedad máxima de 1%. Su principal función es pulverizar el mineral secado, mediante la acción de los cuerpos moledores para lograr un producto con ciertas características granulométricas, con propiedades particulares y niveles de superficies específicas que lo hagan apto para la siguiente etapa.

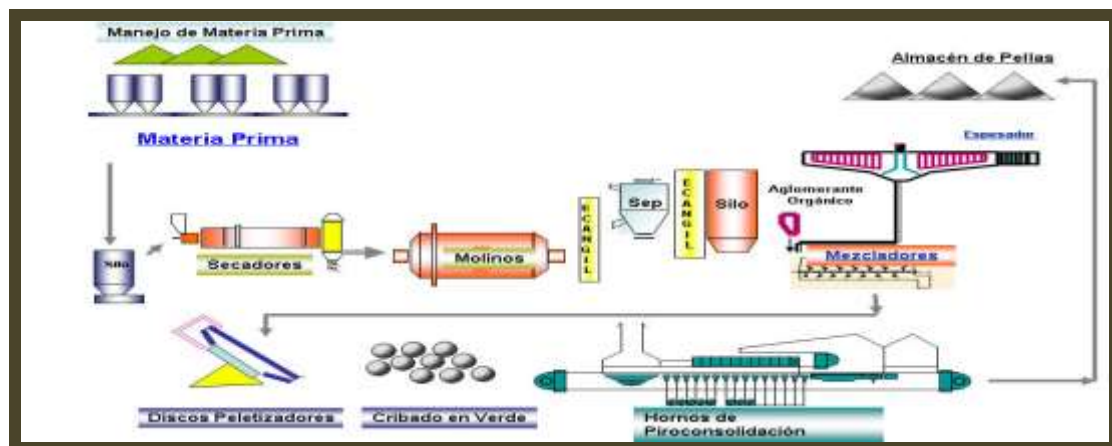
**c) Peletizacion:** Al igual que el área de preparación, está constituida por dos líneas (A y B) que a su vez se dividen en peletización verde, sección de induración y estación de cribado. En ella el mineral toma la forma de aglomerado esférico y se aprovechan los finos naturales de mineral de alto tenor y los beneficios de los minerales de bajo tenor, también aquí el mineral es sometido a la acción de rotación, a la vez que se adiciona agua y un elemento aglomerante formándose así las pellas verdes las cuales son clasificadas mediante el uso de una criba de doble rodillos, que separa las pellas con el tamaño requerido.

**d) Piroconsolidación:** En ella se lleva a cabo el posterior quemado de las pellas verdes (Pella sin cocción) las cuales se consolidan en un horno de parrilla móvil mediante la utilización de un perfil térmico en donde se inyecta gas natural y aire logrando así dar las propiedades físicas.

Las pellas verdes que poseen el tamaño requerido son quemadas en el horno de piroconsolidación, con el fin de otorgarles dureza y una alta resistencia a la compresión lo cual garantiza su uso en los procesos de reducción directa.

### 5.1.2 Descripción del proceso

Este proceso consiste en la transformación del mineral de hierro proveniente de FMO, en un aglomerado de forma esférica con características físicas, metalúrgicas y granulométricas específicas.



**FiguraV-21: Flujograma del proceso**  
(Fuente: Intranet de SIDOR 2012)

El proceso de fabricación de pellas se siguen las siguientes etapas: acondicionamiento de mineral bajo patrón de carga, secado, molienda, mezclado, boleo, cribado y piroconsolidación.

En el primer proceso, se adicionan al mineral los aditivos que servirán para darle las características químicas de calidad especificadas por los clientes. Seguidamente el mineral es secado, molido y seleccionado. A la mezcla seca se le agrega una pulpa proveniente de un tanque espesador y se envía hacia el proceso de peletización. Es en esta etapa donde se aprovechan los finos naturales de mineral de alto tenor y los beneficios de los minerales de bajo tenor. Aquí el mineral es sometido a la acción de rotación a la vez que se adiciona agua y un elemento aglomerante.

La partículas de mineral rotan sobre unos discos de 6 metros de diámetro donde las partículas sólidas se adhieren entre si, formando puentes entre el elemento aglomerante, el mineral y el agua. Las pellas fabricadas en esta etapa reciben el nombre de pellas verdes y son clasificadas mediante el uso de una criba de doble rodillo, que separa las pellas con el tamaño requerido para la piroconsolidación.

Finalmente las pellas cribadas se consolidan en un horno de parrilla móvil mediante la utilización de un perfil térmico en donde se inyecta gas natural y aire logrando así dar las propiedades físicas.

#### **5.1.2.1 Fases de la formación de pellas verdes**

La formación de pellas verdes se produce en varias fases por la acción de los discos:

1. Las partículas sólidas entran en contacto con el agua y la superficie del mineral es humedecida formándose una película de agua.
2. Las partículas humedecidas entran en contacto formando puentes de líquido entre ellas, que dan lugar a los primeros aglomerados con una contextura “floja”.

3. Las partículas unidas inicialmente en forma de malla, pasan a una fase de consolidación aumentando su densidad y aumentando su crecimiento. A partir de este momento comienza a denominarse “pella verde”.
4. Las partículas de mineral se cubren totalmente con partículas de agua y las fuerzas capilares del líquido se activan.
5. Finalizado el crecimiento de las pellas, salen por rebose del disco peletizador.

#### **5.1.2.2 Clasificación de la Doble Criba**

Una vez que salen de los discos peletizadores, las pellas verdes se clasifican por tamaño en la doble criba, para garantizar una granulometría uniforme.

El material grueso no logra pasar a través de los rodillos y cae al final de la doble criba.

El material con la granulometría requerida, atraviesa la primera línea de rodillos y cae en la parrilla móvil del horno de piroconsolidación.

El material fino atraviesa ambas líneas de rodillos y cae al fondo de la doble criba. Tanto el material grueso como el fino se cargan nuevamente a los discos peletizadores mientras que el material con la granulometría requerida continúa hacia la fase de quemado.

#### **5.1.3 Procesos de Redacción Directa Midrex**

Los procesos de reducción directa son aquellos en los cuales se obtiene hierro metálico por reducción mediante un agente reductor, siempre que las temperaturas involucradas en los distintos procesos no superen la temperatura de fusión de cualquiera de los componentes. Al producto

obtenido llamado se le llama hierro de reducción directa (HRD), así como también se le denomina hierro esponja, nombre derivado de la alta porosidad del producto.

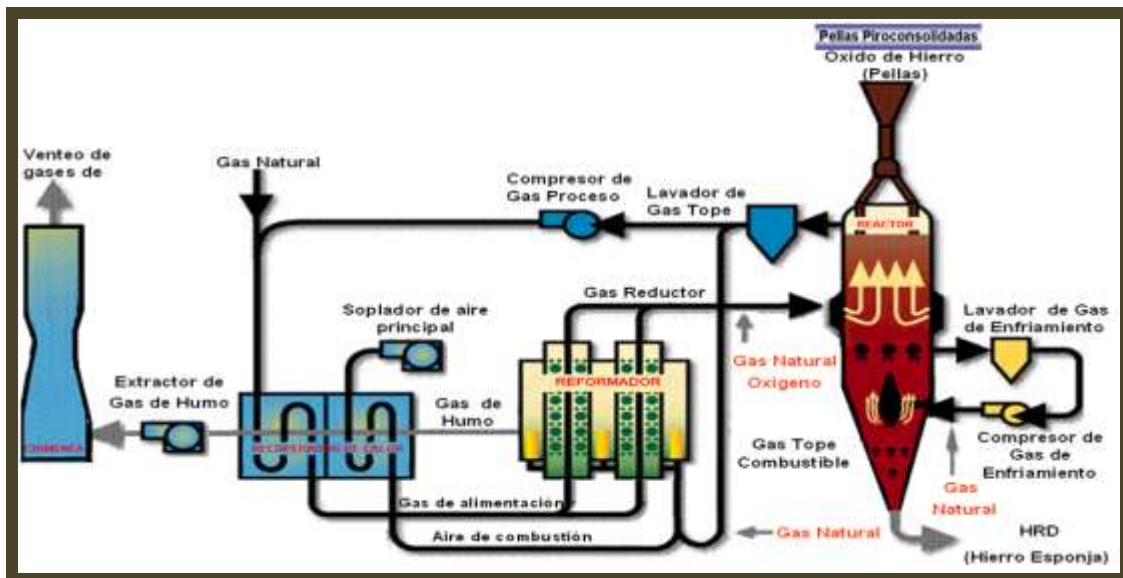
El proceso de reducción directa Midrex utiliza el flujo continuo de gases reductores que químicamente extraen el oxígeno del óxido de hierro. Los gases reductores, hidrógeno y monóxido de carbono, son producidos en un reformador estequiométrico y luego son introducidos en el horno de reducción con un análisis a presiones y temperaturas controladas.

Después de ser utilizado en el reactor durante el proceso de reducción del óxido, el gas sale del mismo como gas tope, a través de una tubería horizontal ubicada en la parte superior de la pared cilíndrica del horno y desciende hacia el lavador de gas tope.

El gas tope sale del reactor con una temperatura máxima de 550 °C y contaminado con partículas de polvo de mineral que se reduce; y entra al lavador por la parte superior, donde se encuentra ubicado el venturi. A su paso por el venturi es sometido a un lavado intensivo, por medio de una fuerte corriente de agua forma de sprays, con la finalidad de retirarle el polvo y disminuir drásticamente su temperatura. Continuando su recorrido a través del lavador, el gas de tope desciende hasta su parte inferior, para ascender posteriormente a través de una cama de empaques.

Durante su ascenso en el lavador, el gas tope es dividido en dos corrientes conocidas una como gas tope combustible, y la otra como gas proceso, la cual sale del lavador de gas tope hacia los compresores de gas proceso, mientras que el gas tope combustible es dirigido hacia los quemadores del reformador.

Una vez realizada la inyección de gas natural al gas reformador, el gas reformador recibe la denominación de gas reductor, y es inyectado al reactor por un distribuidor en forma de anillo o bustle, por lo cual también se le conoce como gas bustle. La inyección se hace alrededor de todo el reactor, y una vez dentro, el gas inicia su ascenso por la zona de reducción para salir finalmente por la línea de gas tope, cerrándose así el circuito para el sistema de flujo normal.



**FiguraV-22: Flujograma del proceso**  
(Fuente: Intranet de SIDOR 2012)

### 5.1.3.1 Sistemas de reacciones durante el proceso de reducción directa Midrex.

En el proceso de reducción directa Midrex existen dos reactores, el horno de reducción y el reformador, cada una de ellas presentan una serie de reacciones químicas.

### 5.1.3.2 Sistema de manejo de materiales.

- Sistema de manejo de materia prima (Pellas, Mineral de hierro).
- Sistema de manejo del producto (HRD).



El óxido de hierro en forma de pellas, llega a la planta Midrex mediante cintas transportadoras, donde es apilado en los patios de almacenamiento y de allí es cribado y enviado a la pila de consumo diario para la carga del reactor.

Las pellas, antes de su ingreso al horno, son tratadas con una lechada de cal para así evitar su aglomeración dentro del horno de reducción al operar con altas temperaturas en el gas de bustle. Esto se realiza cuando las pellas están en las cintas que las transportan a la tolva de carga del reactor.

El material ya metalizado (HRD) es descargado del reactor y mediante cintas transportadoras es trasladado a los patios de almacenamiento o silos, de allí los HRD que cumplan con las especificaciones de calidad requeridas son trasladados mediante camiones a los patios que distribuyen el material para las acerías.

#### **5.1.3.3 Equipos del sistema de reducción directa Midrex.**

##### **Horno de reducción directa.**

El horno de reducción o reactor es un equipo que tiene la forma de un horno de cuba y está compuesto por todo el sistema que va desde la carga de material hasta la descarga del producto (HRD).

Este tiene como función principal extraer químicamente el oxígeno del óxido de hierro mediante un flujo continuo de gases reductores en contra corriente a las pellas que descienden por gravedad dentro del reactor.

La zona superior del horno es conocida como zona de reducción, y es aquí donde ocurren las reacciones químicas que dan como producto hierro reducido.

El reactor de reducción directa de las plantas Midrex puede ser dividido de la siguiente manera:

- Sistema de carga.
- Zona de reducción.
- Zona de transición,
- Zona de enfriamiento.
- Sistema de descarga.

## **5.2 Determinación del impacto o incidencia del porcentaje de alúmina que viene de las pellas verdes y su comportamiento en piroconsolidación.**

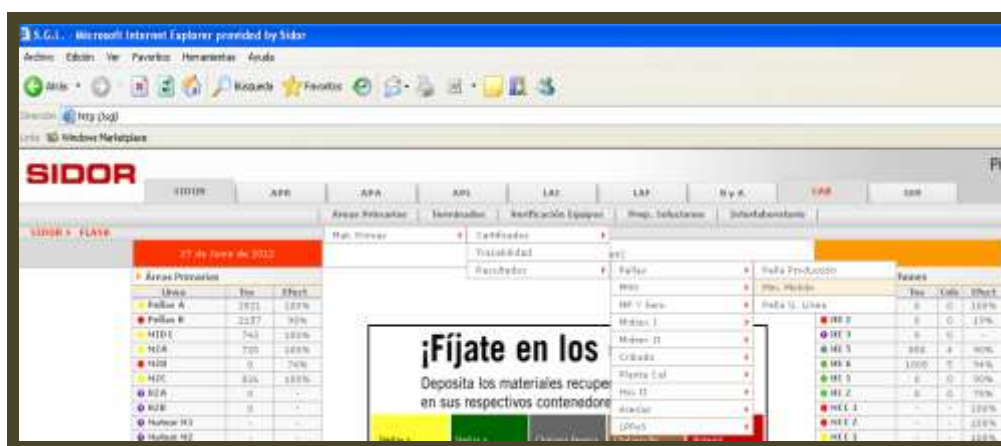
Seleccionar los atributos que se consideren impactados por el  $\%Al_2O_3$  la pella piroconsolidadas.

- **Atributos de las propiedades granulométricas:**
  - Granulometría de  $+5/8"$ ,  $1/2"$ ,  $3/8"$ ,  $1/4"$ ,  $-1/4"$ ,  $+3/8"$ ;  $-5/8"$
- **Atributos de las propiedades físicas:**
  - Índice de Abrasión (I.A)
  - Índice de Tambor (I.T)
  - Resistencia a la compresión (R.C)
  - Porosidad.
- **Atributos de las propiedades Metalúrgicas.**
  - Reducibilidad.

- Hinchamiento.

### 5.2.1 Levantamiento de la data.

Una vez descrito los atributos que intervienen en el proceso de piroconsolidación, se procedió a descargar los datos de cada una de las variables, trabajando con una data comprendida desde el 01 de enero del 2009 hasta el 31 de marzo del 2012.



**FiguraV- 23: SGL- LAB áreas primarias- Resultado-Pellas**

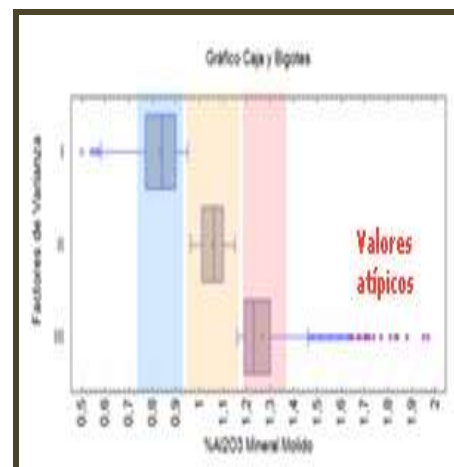
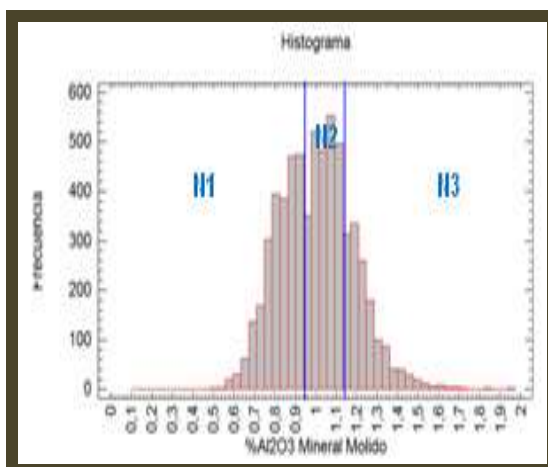
(Fuente: Intranet de SIDOR 2012)

Una vez descargado los datos se procedió con la depuración y desafeé de la data, luego de obtener el histórico de datos de los atributos de la pellas quemadas, fue necesario depurar o descartar valores atípicos y alejados del comportamiento real de la planta, esto se logro excluyendo eventos de parada de planta y arranque de planta. Es de gran importancia depurar datos antes de aplicar los análisis para así tener un comportamiento más cercano al ideal de la planta.

Los datos recolectados del SGL, no poseen igual hora de toma de muestra, ya que dependiendo de la sección se encuentra un criterio de tomas de muestra diferentes, desfazar significa unificar los datos a una misma hora de toma y correspondiendo al seguimiento de la materia prima desde su ingreso hasta su salida.

## 5.2.2 Establecer los niveles de trabajo del porcentaje de alumina del mineral molido.

Para determinar los niveles en los cuales opera el porcentaje de alúmina, se utilizo el análisis estadístico descriptivo para una variable, a través de un Histograma para el porcentaje de Alúmina ( $Al_2O_3$ ) del mineral molido, con el fin de dividir los datos de dicha variable en tres niveles en los cuales trabaja esta variable y su frecuencia de ocurrencia.



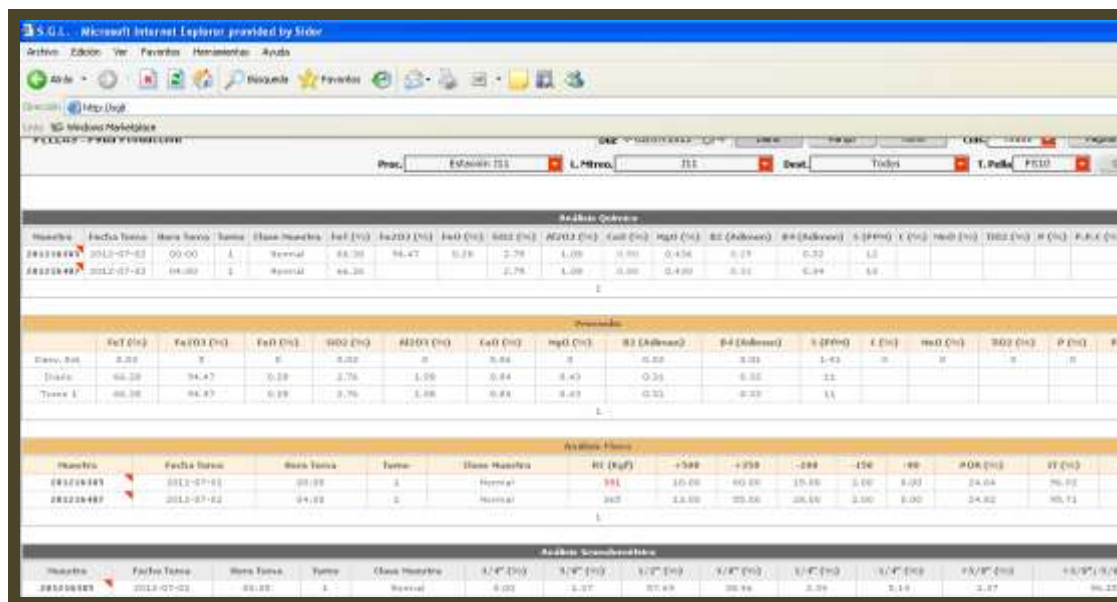
GraficoV-1: Histograma del porcentaje de Alúmina del Mineral Molido.

En la siguiente tabla se observa los niveles establecidos para el porcentaje de alúmina del mineral molido.

### Resumen Estadístico para el % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Mineral Molido.

Resumen Estadístico para el % Al2O3 Mineral Molido.			
Factores	Media	Des. Esta.	Coef.Var.
I (0 – 0,95)	0,831563	0,0879799	10,5801%
II (0,95 – 1,15)	1,05503	0,0555461	5,26487%
III (1,15 – 2)	1,26532	0,110582	8,73943%

Una vez obtenido los rangos se procedió a realizar la recodificación, de la variable mediante la clasificación de los datos en tres factores que corresponde a los rangos ya mencionados, A continuación se muestra la ventana del SGL donde se recodifican las variables.

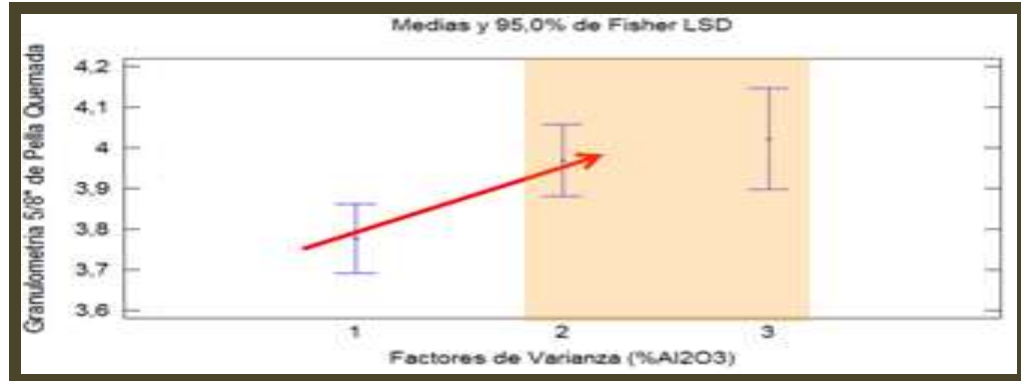


FiguraV-24: Ventana de las variables de pella quemadas  
(Fuente: SGL- Intranet de SIDOR 2012)

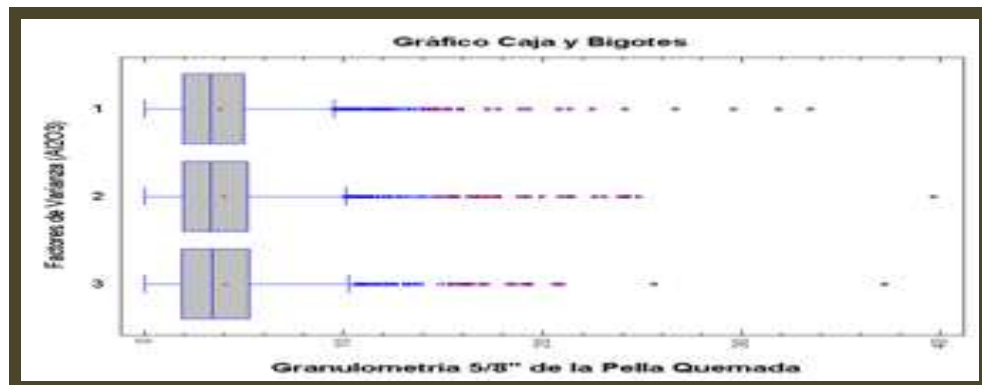
**5.3 Determinar el impacto en los atributos de la pella piroconsolidada que se vean influenciados directamente por la variación del %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.**

### 5.3.1 Análisis de Granulometría de las pellas quemadas.

- Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de 5/8" (%) de pellas quemadas.



GraficaV-2: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" de pellas quemadas.



Grafica V-3: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" de pellas quemadas.

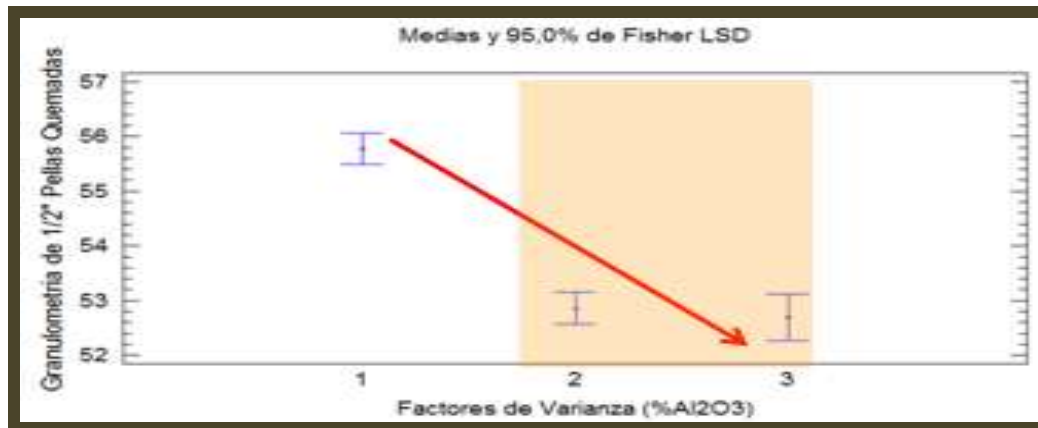
TablaV-3: Resumen estadístico granulometría 5/8" pellas quemadas.

Resumen estadístico para la Granulometría de 5/8" de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Deev.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2605	3,77643	2,93938	77,8349%
2(0,95 – 1,15)	2423	3,96894	3,17563	80,012%
3(1,15 - 2)	1210	4,02204	3,32259	82,6097%

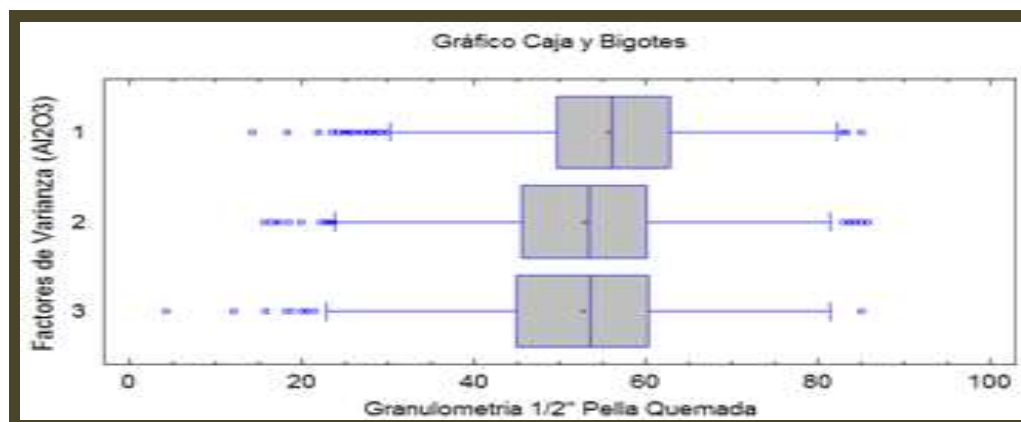
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar de la fracción retenida en el tamiz  $>5/8''$  cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con Valor-P = 0.0278 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de 1/2'' (%) de pellas quemadas.**



GraficaV-4: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 1/2'' pellas quemadas.



GraficaV-5: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/2'' pellas quemadas.

**TablaV-4: Resumen estadístico granulometría 1/2" pellas quemadas.**

Resumen estadístico para la granulometría de 1/2" de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media dela granulometria.	Deev.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2605	55,7718	10,0945	18,0997%
2(0,95 – 1,15)	2423	52,8573	10,6216	20,0948%
3(1,15 - 2)	1210	52,6936	11,2753	21,3979%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir de la fracción retenida en el tamiz >1/2" cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con un Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

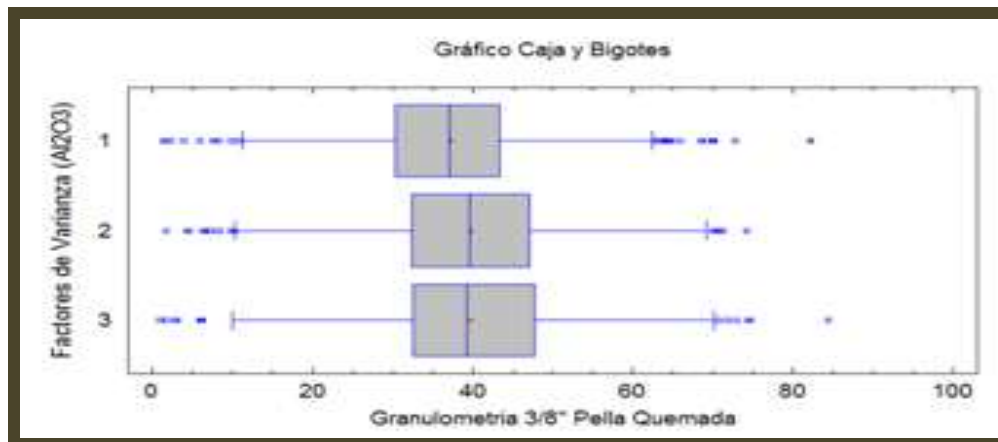
Sin embargo a escala industrial, este seria un atributo para seguir estudiando ya que la incidencia es aproximadamente 3 puntos. Lo cual tiene impacto en reducción.

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de 3/8" (%) de pellas quemadas.**



**GraficaV-6: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 3/8" pellas quemadas.**





GraficaV-7: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" pellas quemadas.

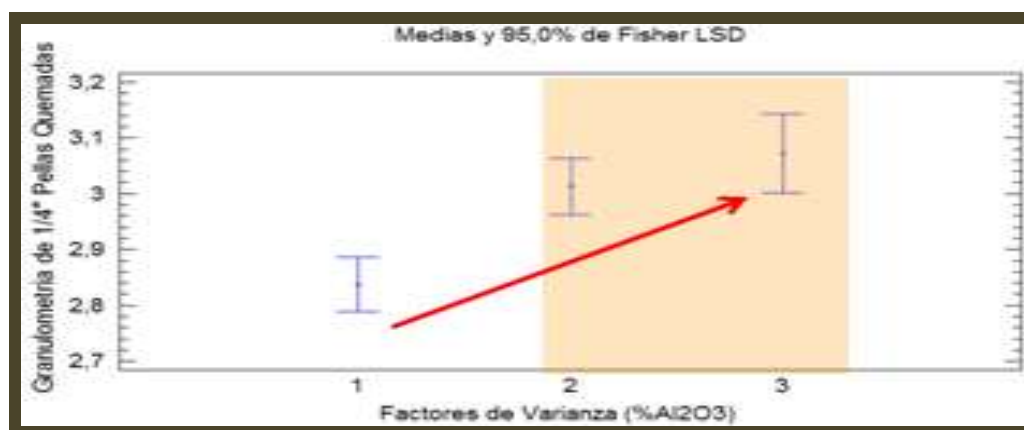
TablaV-5: resumen estadístico granulometría 3/8" pellas quemadas.

Resumen estadístico para la granulometría de 3/8" de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media dela granulometría	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2605	37,2185	10,1141	27,1748%
2(0,95 – 1,15)	2423	39,6816	10,9663	27,6358%
3(1,15 - 2)	1210	39,7017	11,7264	29,5362%

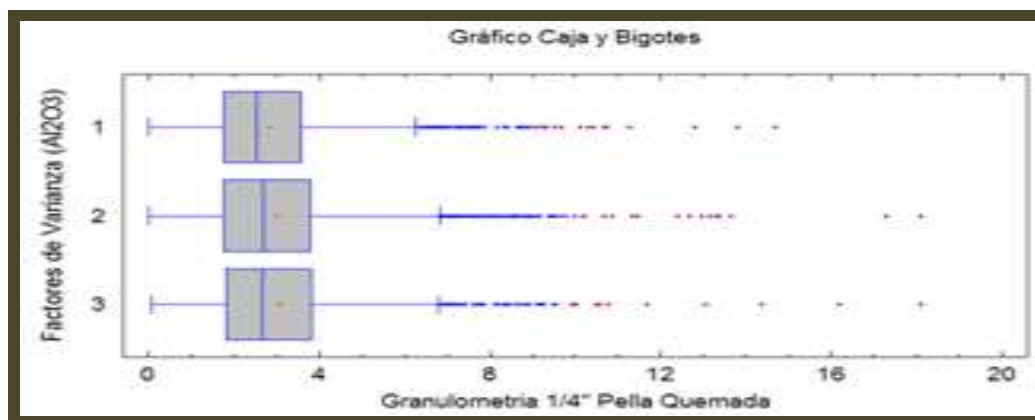
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar de la fracción retenida en el tamiz >3/8" cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial, este seria un atributo para seguir estudiando ya que la incidencia es aproximadamente 3 puntos. Lo cual tiene impacto en reducción.

- Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de 1/4" (%) de pellas quemadas.



GraficaV-8: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría 1/4" pellas quemadas.



GraficaV-9: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" de pellas quemadas.

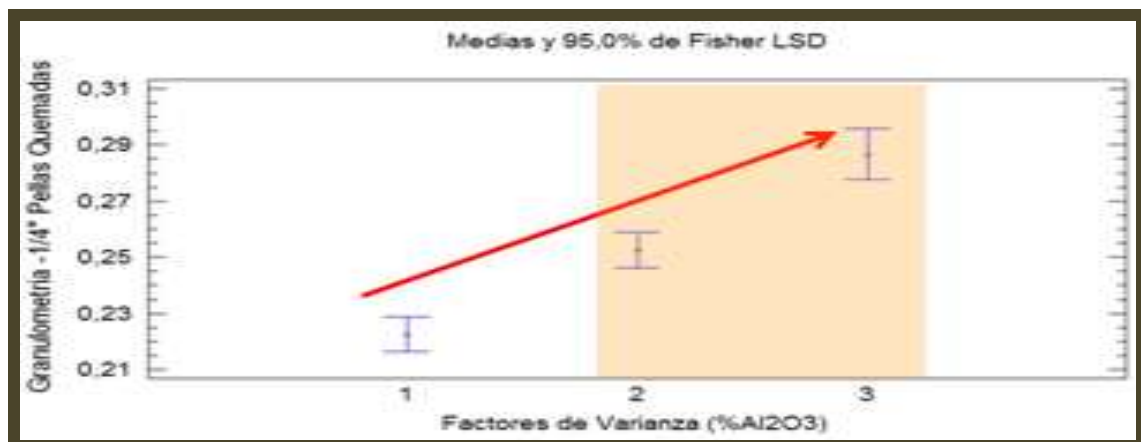
TablaV-6 resumen estadístico granulometría 1/4" pellas quemadas.

Resumen estadístico para la granulometría de 1/4" de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	2605	2,83706	1,59301	56,15%
2(0,95 – 1,15)	2423	3,01319	1,8648	61,8878%
3(1,15 -2)	1210	3,07293	1,97295	64,204%

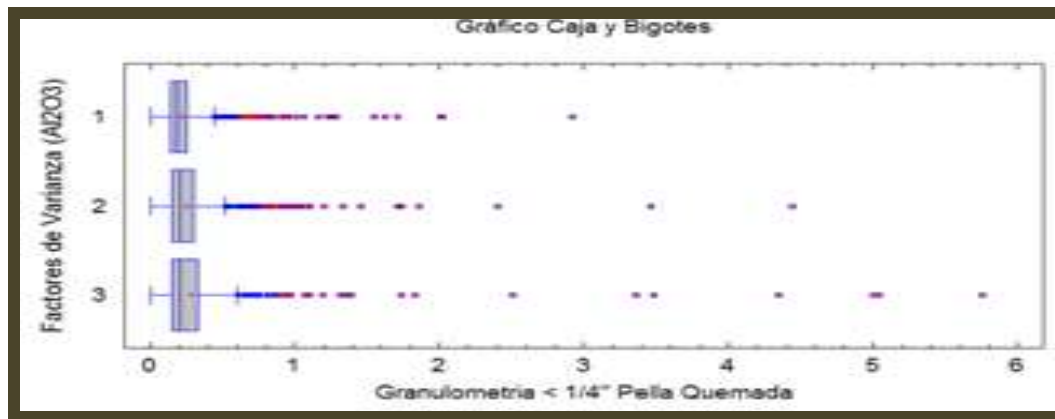
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar de la fracción retenida en el tamiz  $>1/4''$  cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con Valor-P = 0.0001 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de  $-1/4''$  (%) de pellas quemadas.**



GraficaV-10: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría  $-1/4''$  pellas quemadas.



GraficaV-11: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de <1/4" de pellas quemadas.

TablaV-7: resumen estadístico granulometría -1/4" pellas quemadas.

Resumen estadístico para la granulometría de -1/4" de pellas quemadas				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	2605	0,222564	0,1566	70,3616%
2(0,95 – 1,15)	2423	0,252435	0,200253	79,3285%
3(1,15 - 2)	1210	0,28662	0,363852	126,946%

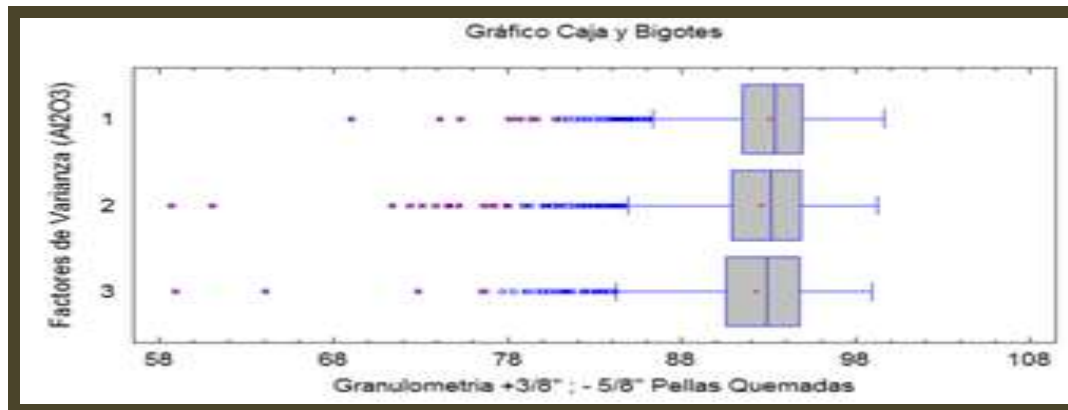
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar de la fracción retenida en el tamiz <1/4" cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial, este seria un atributo para seguir estudiando ya que entre el máximo está establecido en 1%, por lo tanto no hay que descartar su incidencia.

- Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs granulometría de +3/8", -5/8" (%) de pellas quemadas.



GraficaV-12: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría +3/8"; -5/8" pellas quemadas.



GraficaV-13: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de +3/8" 5/8" de pellas quemadas.

TablaV-8: resumen estadístico granulometría +3/8"; -5/8" pellas quemadas.

Resumen estadístico para la granulometría fracción útil de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2605	93,0098	3,01855	3,24542%
2(0,95 – 1,15)	2423	92,5636	3,55245	3,83784%
3(1,15 - 2)	1210	92,2825	3,74065	4,05348%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir de la fracción retenida en el tamiz +3/8";-5/8" cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

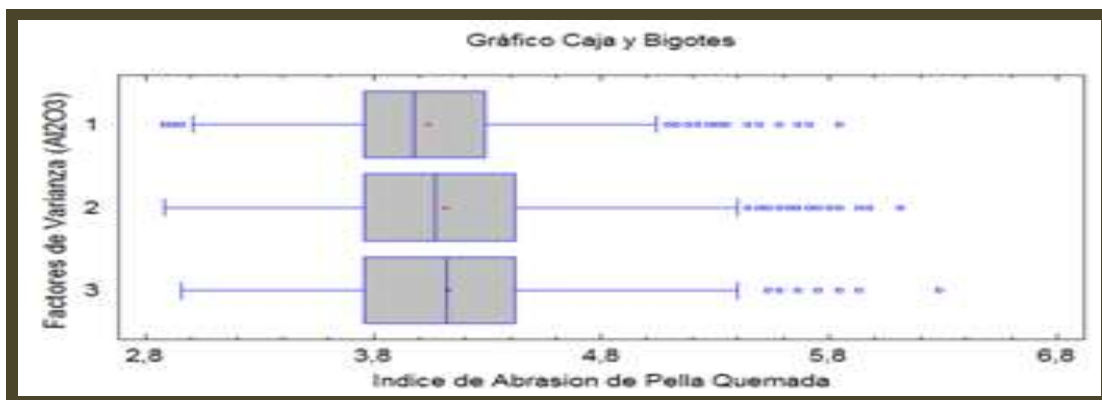
Sin embargo a escala industrial, este sería un atributo para seguir estudiando ya que entre el N1 y N3 la variación es aproximadamente 1 punto.

### 5.3.2 Análisis de las propiedades físicas de las pellas quemadas.

- Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs Índice de Abrasión (I.A).



GraficaV-14: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de abrasión pellas quemadas.



GraficaV-15:Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Abrasión de pellas quemadas

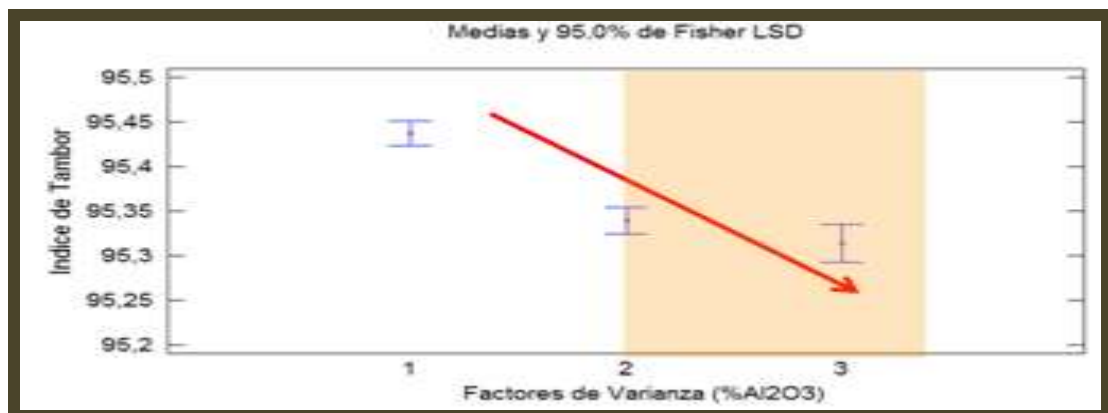
TablaV-9: resumen estadístico Índice de abrasión de pellas quemadas.

Resumen estadístico para el índice de abrasión de pellas quemadas				
factores	Numero de muestra	Media del índice de abrasión	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	2625	4,04187	0,428861	10,6105%
2(0,95 – 1,15)	2450	4,12469	0,498839	12,094%
3(1,15 -2)	1222	4,13467	0,510247	12,3407%

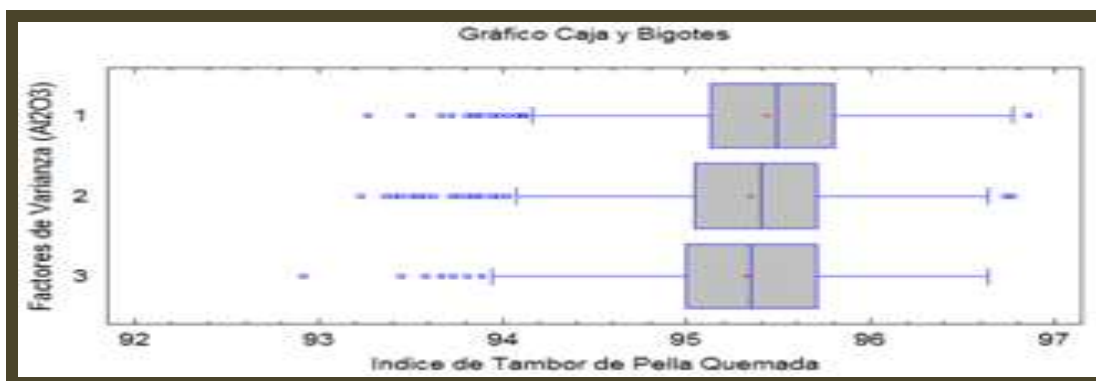
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar en el índice de abrasión de las pellas quemadas cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con Valor-P = 0.0278 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

*Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.*

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs Índice de Tambor (I.T).**



GraficaV-16: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de tambor de pellas quemadas.



GraficaV-17: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice de tambor de pellas quemadas

TablaV-10: resumen estadístico índice de tambor de pellas quemadas.

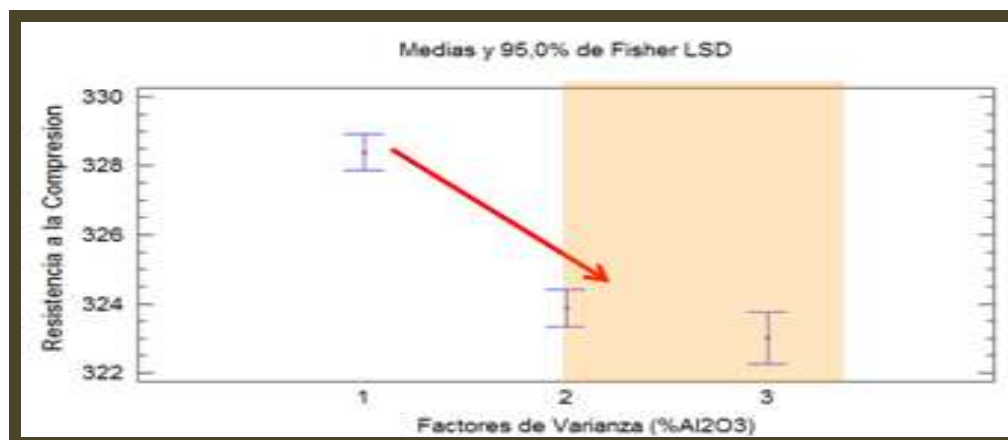
Resumen estadístico para el índice de tambor de pellas quemadas				
factores	Numero de muestra	Media de índice de tambor	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2625	95,4369	0,48834	0,511689%
2(0,95 – 1,15)	2450	95,3396	0,545464	0,572128%
3(1,15 - 2)	1222	95,3139	0,557752	0,585174%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en el índice de tambor cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con Valor-P = 0.0278 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

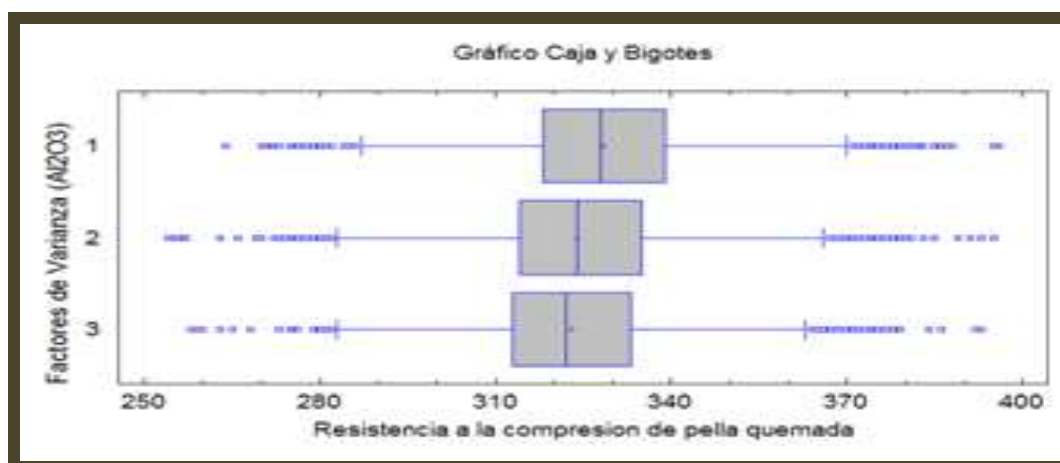
*Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.*

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs Resistencia a la compresión (R.C).**





GráficaV-18: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión de pellas quemadas.



GráficaV-19: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión de pellas quemadas

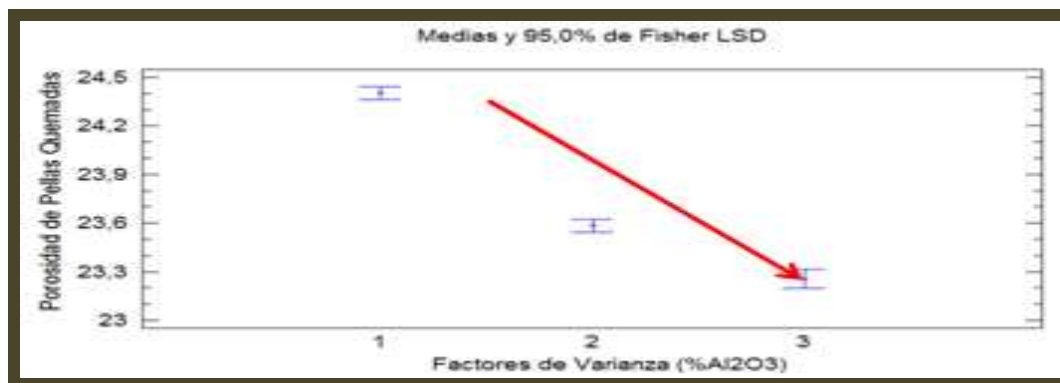
TablaV-11: resumen estadístico Resistencia a la compresión de pellas quemadas.

Resumen estadístico para la resistencia a la compresión de pellas quemadas				
factores	Numero de muestra	Media de resistencia a la compresión	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	2624	328,398	18,9849	5,78105%
2(0,95 – 1,15)	2450	323,882	19,2723	5,9504%
3(1,15 -2)	1222	323,013	18,7162	5,79424%

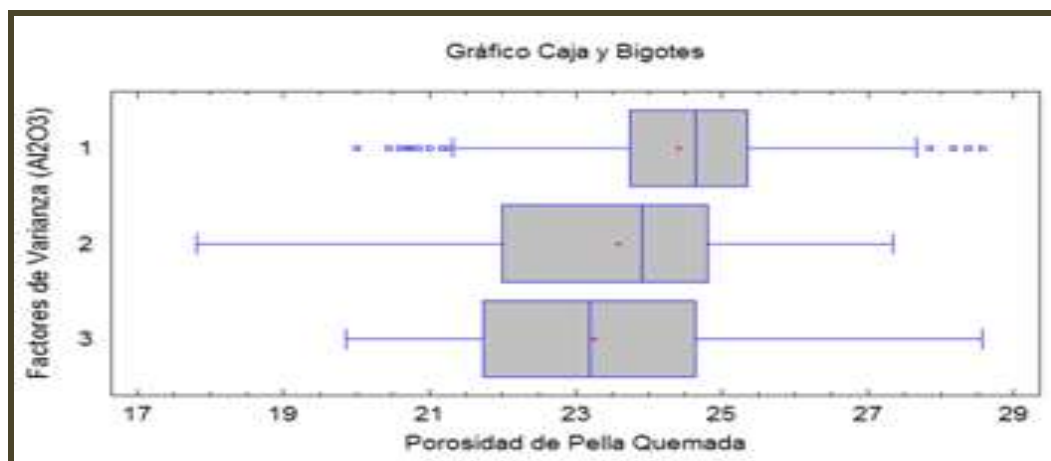
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en la resistencia a la compresión pellas quemadas cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial, este sería un atributo para seguir estudiando ya que entre el N1 y N2 la variación es en 5 puntos aproximadamente, por lo tanto no hay que descartar su incidencia.

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs Porosidad.**



GraficaV-20: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Porosidad de pellas quemadas.



GraficaV-21: Caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Porosidad de pellas quemadas.

TablaV-12: resumen estadístico Porosidad de pellas quemadas.

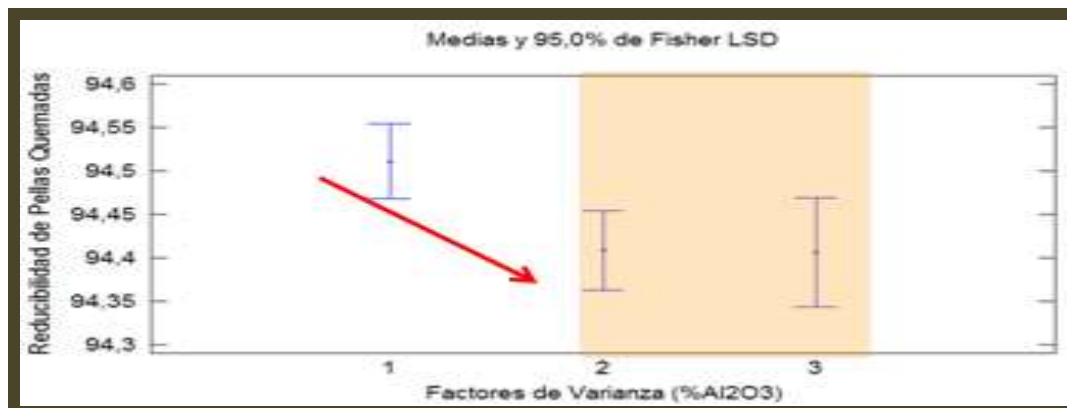
Resumen estadístico para la porosidad de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media de la porosidad	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	2623	24,4031	1,28247	5,25536%
2(0,95 – 1,15)	2450	21,679	104,812	483,471%
3(1,15 -2)	1222	23,2546	1,63956	7,05048%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en la Porosidad de pellas quemadas cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con valor - p = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

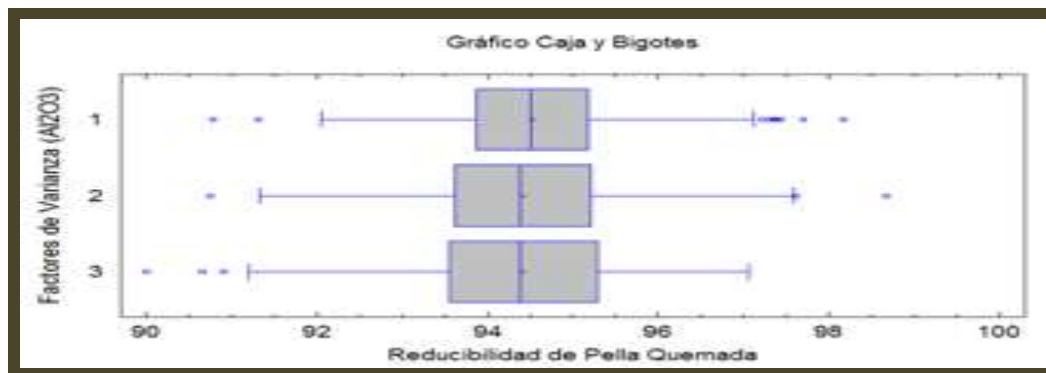
A escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

### 5.3.3 Análisis de las propiedades metalúrgicas de pella quemadas.

- Grafico de media porcentaje de alúmina Vs Reducibilidad.



GraficoV-22: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Reducibilidad de pellas quemadas.



GraficoV-23: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Reducibilidad de pellas quemadas.

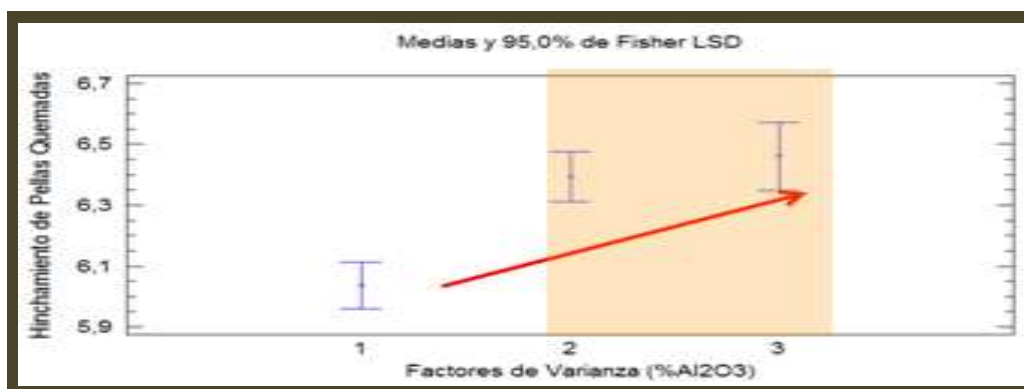
TablaV-13: resumen estadístico Reducibilidad de pellas quemadas.

Resumen estadístico para la Reducibilidad de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media de la Reducibilidad	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	1202	94,511	1,00618	1,06461%
2(0,95 – 1,15)	1062	94,4082	1,10457	1,17%
3(1,15 - 2)	563	94,4063	1,13586	1,20316%

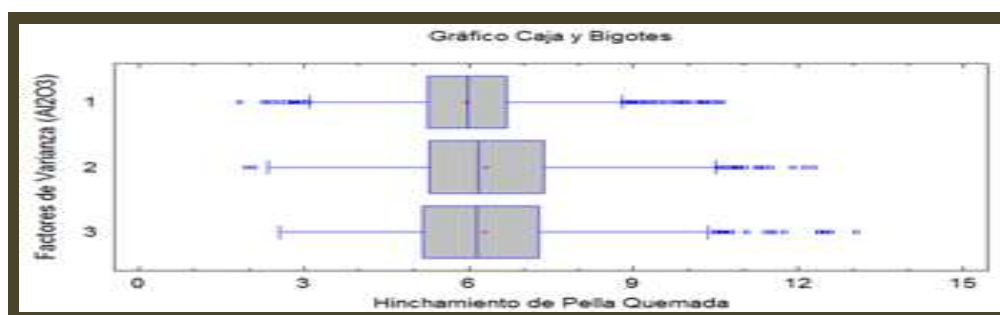
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en la Reducibilidad de las pellas quemadas cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0398 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- **Grafico de media Porcentaje de alúmina Vs Hinchamiento.**



GráficoV-24: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Hinchamiento de pellas quemadas.



GráficoV-25 caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Hinchamiento de pellas quemadas.

TablaV-14: resumen estadístico del hinchamiento de pellas quemadas.

Resumen estadístico para el Hinchamiento de pellas quemadas.				
factores	Numero de muestra	Media del hinchamiento.	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	1202	6,03715	1,58284	26,2183%
2(0,95 – 1,15)	1062	6,39334	1,95862	30,6354%
3(1,15 -2)	563	6,46066	2,42504	37,5355%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar del hinchamiento de pella quemadas cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

TablaV-15: resumen estadístico de los atributos de las Pellas Quemadas.

Variables	influencia		
	Alta	Media	Baja
Granulometría 5/8"		↑	
Granulometría 1/2"		↓	
Granulometría 3/8"		↑	
Granulometría 1/4"	↑		
Granulometría -1/4"	↑		
Granulometría +3/8"; -5/8"	↓		
Índice de Abrasión		↑	
Índice de tambor		↓	
Resistencia a la compresión	↓		
Porosidad	↓		
Reducibilidad		↓	
Hinchamiento		↓	

#### 5.4 Determinación del impacto o incidencia del porcentaje de alumina en el comportamiento de los parámetros de procesos y los atributos del HRD de las plantas de reducción MIDREX II.

Seleccionar los atributos que se consideren impactados por el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la pella de alimentación en los atributos del HRD.

- **Atributos de las propiedades granulométricas:**
  - Granulometría de +5/8", 1/2", 3/8", 1/4", 1/8"; -1/8" -1/4"
- **Atributos de las propiedades físicas:**
  - Índice de Abrasión (I.A)
  - Índice de Tambor (I.T)
  - Resistencia a la compresión (R.C)

#### 5.4.5 Levantamiento de la data de los atributos del HRD.

Una vez descrito los atributos que intervienen en el proceso de planta de Midrex II-C, se procedió a descargar los datos de cada una de las variables, trabajando con una data comprendida desde el 01 de enero del 2009 hasta el 31 de marzo del 2012.



**FiguraV- 25: SGL-LAB áreas primaria-pella de alimentación**

(Fuente: Intranet de SIDOR 2012)

Una vez descargado los datos se procedió con la depuración y desafeé de la data descartando valores atípicos y alejados del comportamiento real de la planta, esto se logro excluyendo eventos de parada de planta y arranque de planta. Es de gran importancia depurar datos

antes de aplicar los análisis para así tener un comportamiento más cercano al ideal de la planta.

Los datos recolectados del SGL, no poseen igual hora de toma de muestra, ya que dependiendo de la sección se encuentra un criterio de tomas de muestra diferentes, desfasar significa unificar los datos a una misma hora de toma y correspondiendo al seguimiento de la materia prima desde su ingreso hasta su salida.

#### 5.4.2 Establecer los niveles de trabajo del porcentaje de alúmina de la pella de alimentación.

Para establecer los factores de varianza del porcentaje de alúmina ( $Al_2O_3$ ) de la pella de alimentación se utilizó el análisis estadístico descriptivo para una variable donde se graficó un Histograma con el fin de dividir los datos en tres factores de varianza I (0 – 0.95) II (0.95 – 1.15) III (1.15 - 2) los cuales trabaja esta variable y su frecuencia de ocurrencia.

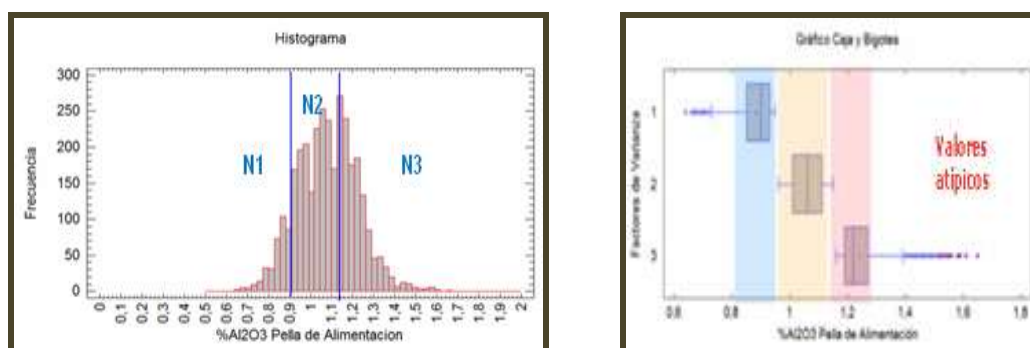


Gráfico V-26: Histograma del porcentaje de Alúmina de pella de alimentación.

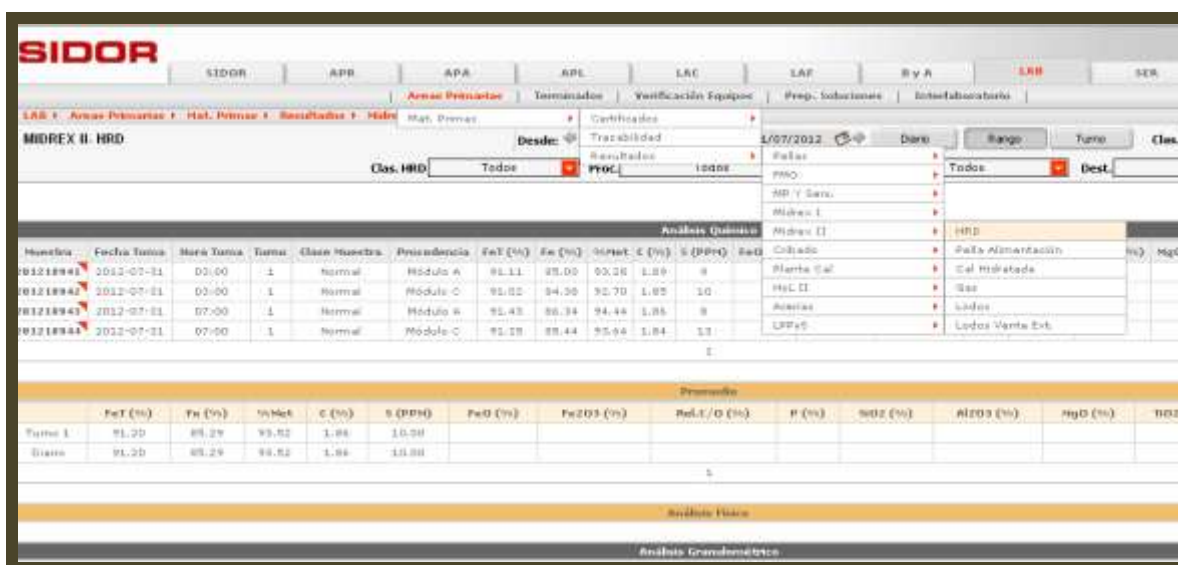
En la siguiente tabla se observa los niveles establecidos para el porcentaje de alúmina de la pella de alimentación de Midrex II.



TablaV-16: Tabla Resumen de los Rangos establecidos para el Porcentaje de Alúmina.

Resumen Estadístico para el % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Pella de Alimentación.			
Factores	Media	Des. Esta.	Coef.Var.
I (0 – 0,95)	0,882829	0,058418	6,61714%
II (0,95 – 1,15)	1,06007	0,0575446	5,42838%
III (1,15 – 2)	1,24223	0,0812974	6,5445%

Una vez obtenido los factores de varianza se procedió a realizar la recodificación, de la variable mediante la clasificación de los datos en tres factores que corresponde a los factores ya mencionados, A continuación se muestra la ventana del SGL donde se decodifican los atributos.

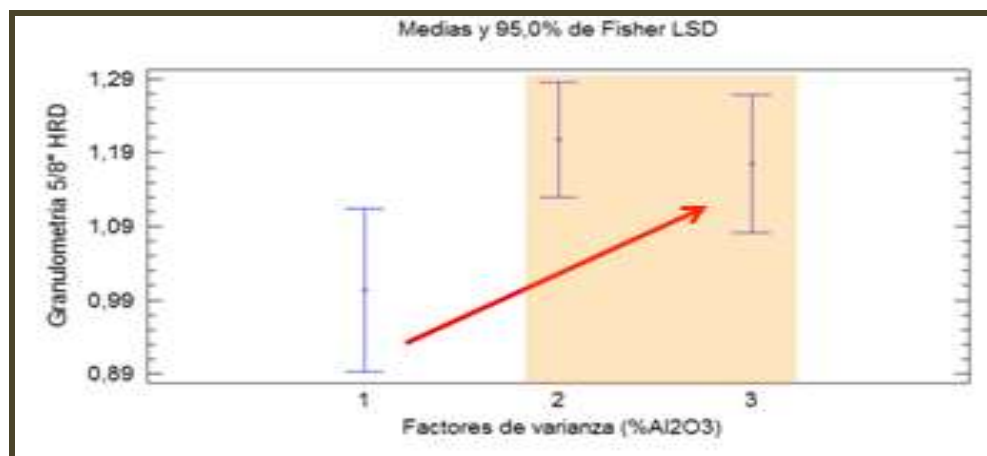


FiguraV-26: Venta de los atributos del HRD.  
(Fuente: SGL- Intranet de SIDOR 2012)

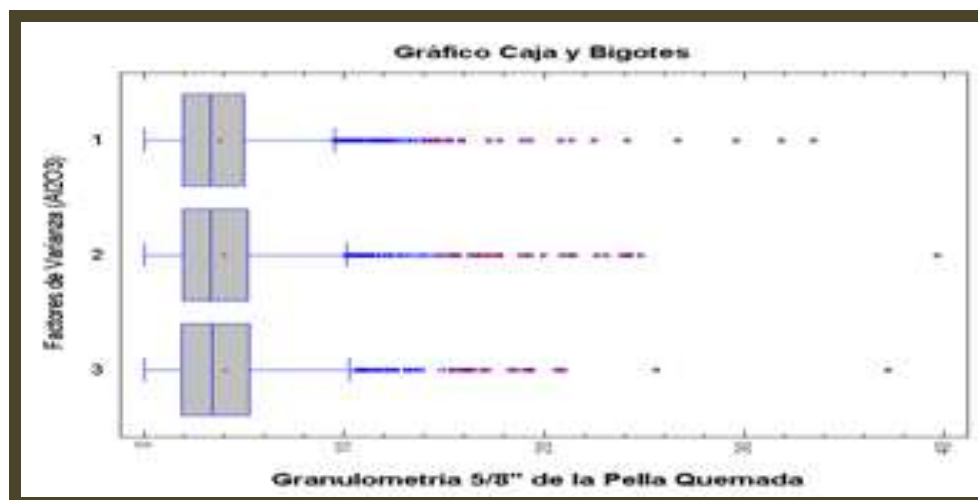
5.5 Determinar el impacto en la productividad y atributos que se vean influenciados directamente por la variación del %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del mineral de hierro utilizando herramientas estadísticas.

### 5.5.1 Análisis de Granulometría del HRD.

- Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de 5/8" (%) del HRD.



GraficoV-27 Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.



GraficoV-28: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.

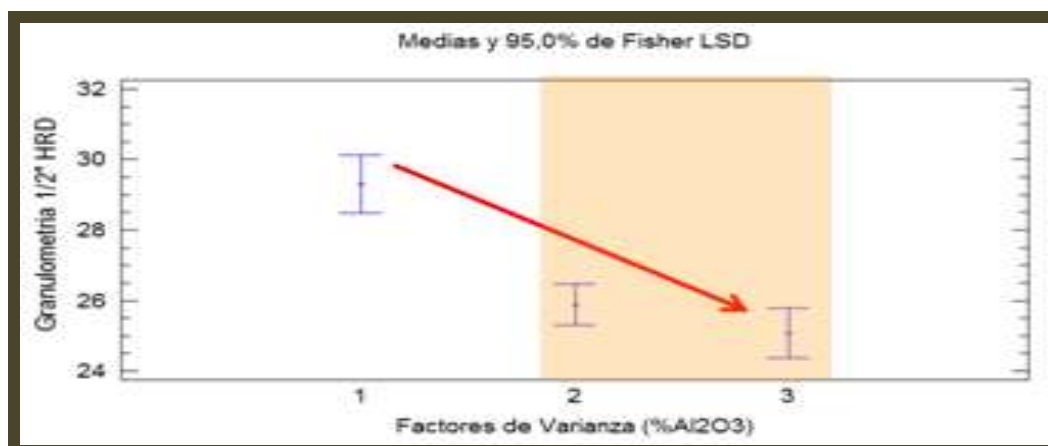
TablaV-17: resumen estadístico Granulometría5/8" del HRD.

Resumen estadístico para la granulometría de 5/8" del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de Granulometría	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	163	1,0038	0,502343	50,0439%
2(0,95 – 1,15)	329	1,20784	0,73166	60,5758%
3(1,15 - 2)	226	1,17558	1,52083	129,369%

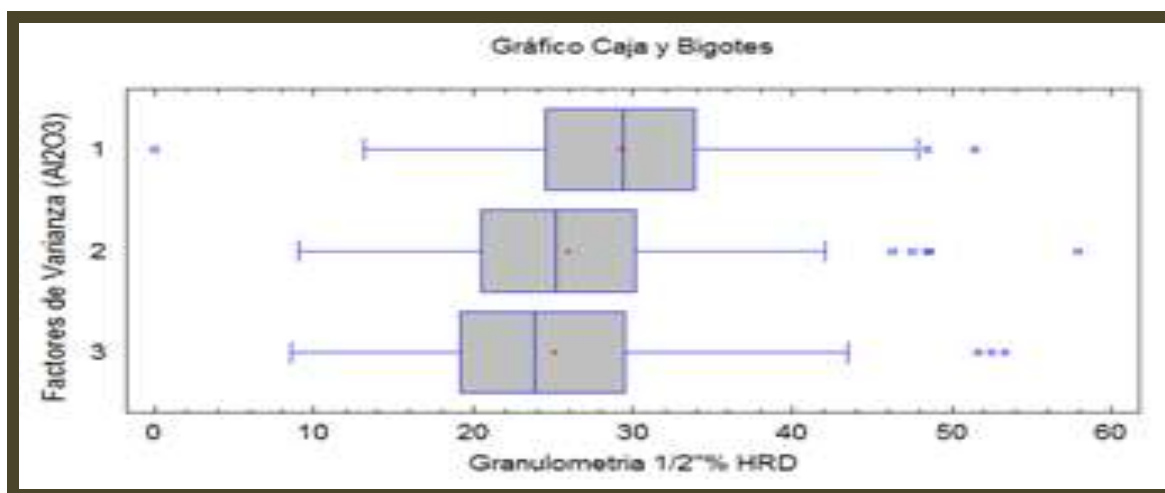
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a incrementar de la fracción retenida en el tamiz >5/8" cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0278 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- **Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de 1/2" (%) del HRD.**



**GraficoV-29: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/2" del HRD.**



GraficoV-30: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 5/8" del HRD.

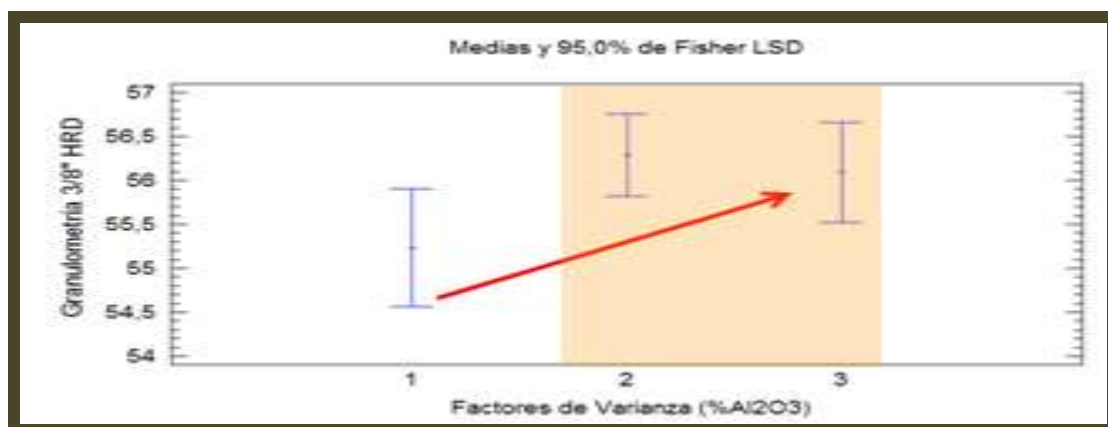
TablaV-18: resumen estadístico Granulometría 1/2" del HRD.

Resumen estadístico para la granulometría de 1/2" del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	163	29,304	7,57258	25,8414%
2 (0,95 – 1,15)	329	25,8853	7,06756	27,3033%
3 (1,15 - 2)	226	25,0802	8,31908	33,1699%

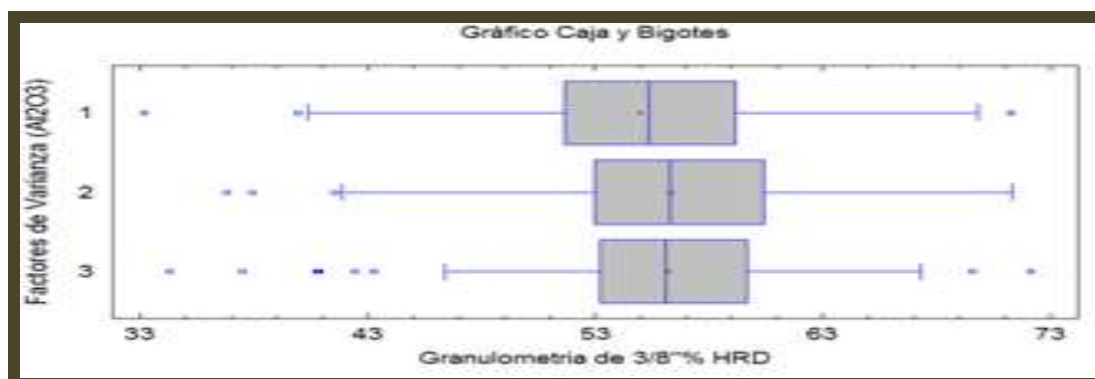
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en la granulometría de 1/2" del HRD, cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de 3/8" (%) del HRD.



GráficoV-31: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" del HRD.



GráficoV-32: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 3/8" del HRD.

TablaV-19 resumen estadístico Granulometría3/8" del HRD.

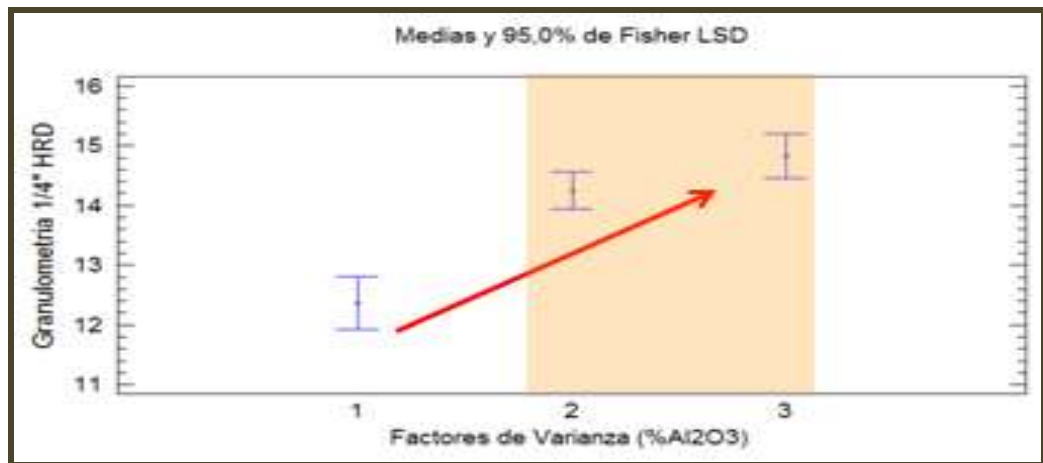
Resumen estadístico para la granulometría de 3/8"del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de granulometria	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	163	55,235	7,10733	12,8674%
2(0,95 – 1,15)	329	56,2833	5,80653	10,3166%
3(1,15 - 2)	226	56,0912	5,87895	10,4811%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia creciente en la granulometría de 3/8" del HRD cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

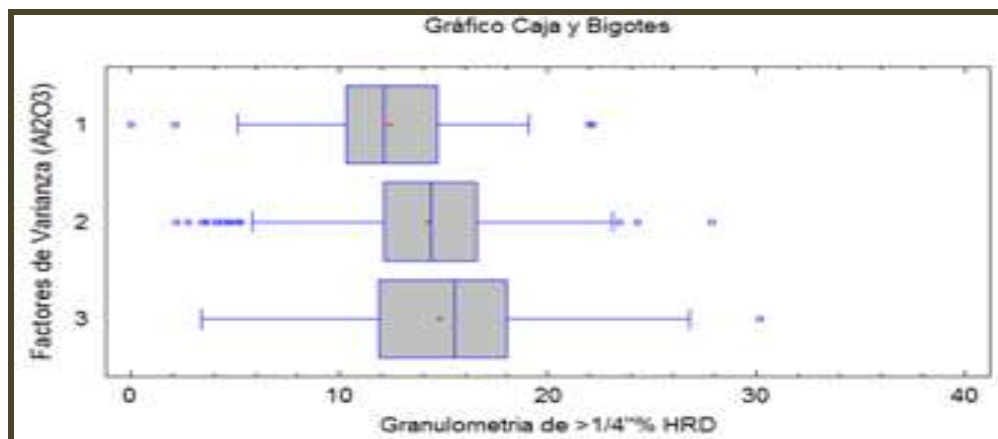
incrementa. Con Valor-P = 0.0269 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- **Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de 1/4" (%) del HRD.**



GraficoV-33: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" del HRD.



GraficoV-34: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/4" del HRD.

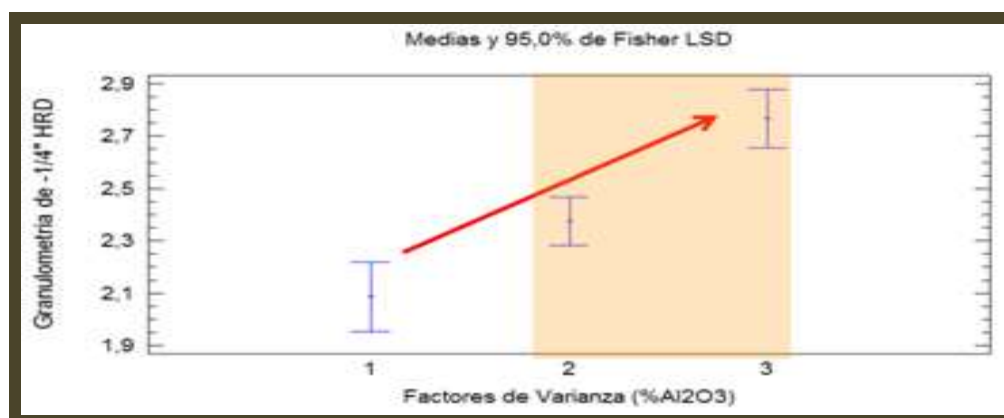
TablaV-20: resumen estadístico Granulometría 1/4" del HRD.

Resumen estadístico para la granulometría de 1/4" del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	163	12,3687	3,29204	26,616%
2(0,95 – 1,15)	329	14,2466	3,70518	26,0075%
3(1,15 -2)	226	14,8305	5,02058	33,853%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia creciente de la granulometría >1/4" del HRD cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

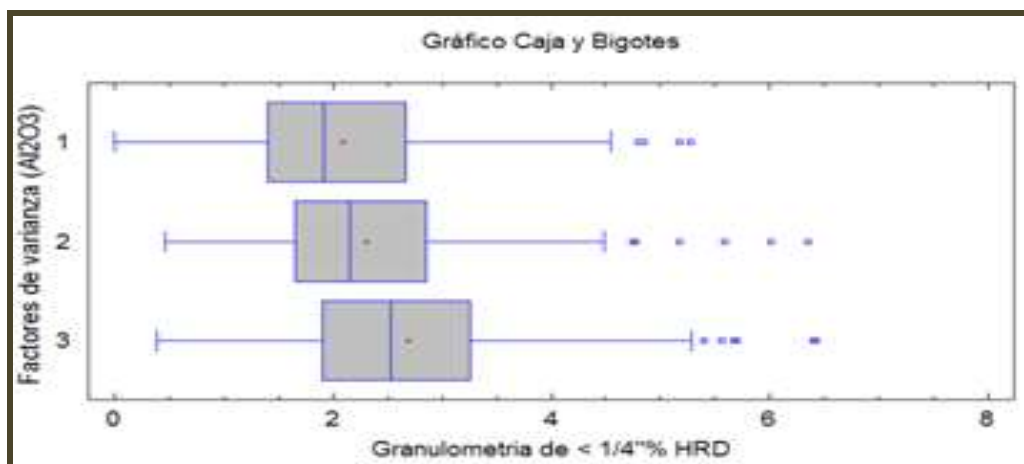
Sin embargo a escala industrial, este seria un atributo para seguir estudiando ya que entre el N1 y N3 la variación es en 2 puntos aproximadamente, por lo tanto no hay que descartar su incidencia.

- **Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de -1/4" (%) del HRD.**



GraficoV-35: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/4" del HRD.





GráficoV-36: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/4" del HRD.

TablaV-21: resumen estadístico Granulometría -1/4" del HRD.

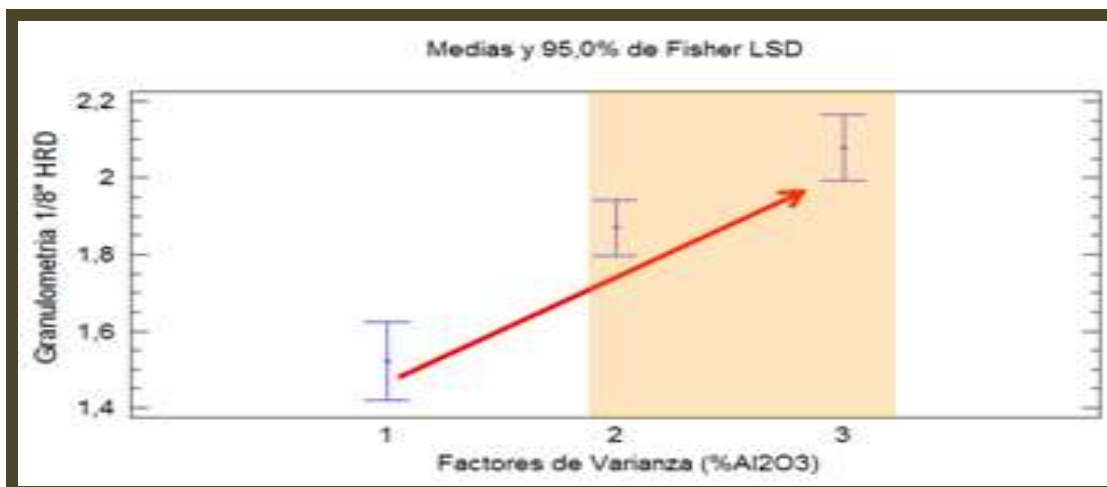
Resumen Estadístico de la Granulometría -1/4" HRD.				
Factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv.estan	Coef.Var
1 (0 – 0,95)	163	2,08687	0,967055	46,3399%
2 (0,95 – 1,15)	329	2,37547	1,22454	51,5492%
3 (1,15 – 2)	226	2,76704	1,37655	49,7482%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia Creciente de la granulometría <1/4" HRD cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

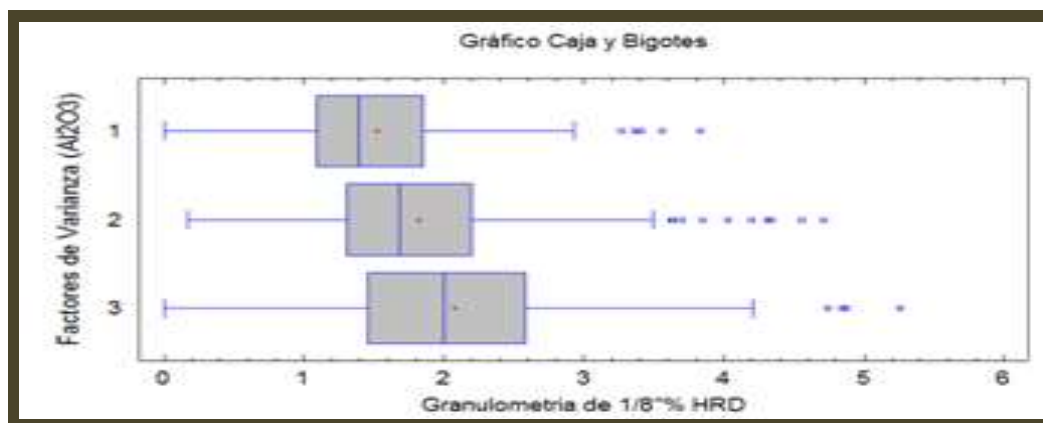
A escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.



- Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de 1/8" (%) del HRD.



GraficoV-37: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/8" del HRD.



GraficoV-38: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de 1/8" del HRD.

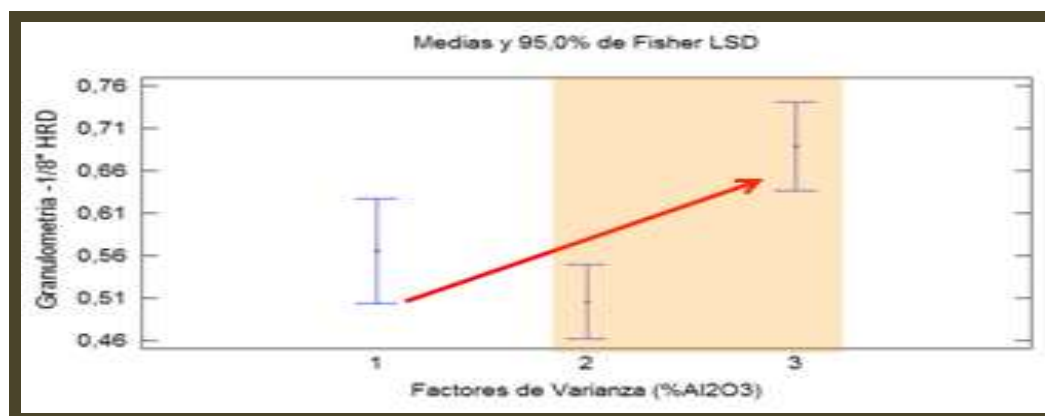
TablaV-22: resumen estadístico Granulometría 1/8" del HRD.

Resumen estadístico para la granulometría de 1/8" del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría.	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	163	1,52178	0,690442	45,3707%
2(0,95 – 1,15)	329	1,86967	1,05702	56,5353%
3(1,15 -2)	226	2,07836	0,89088	42,8645%

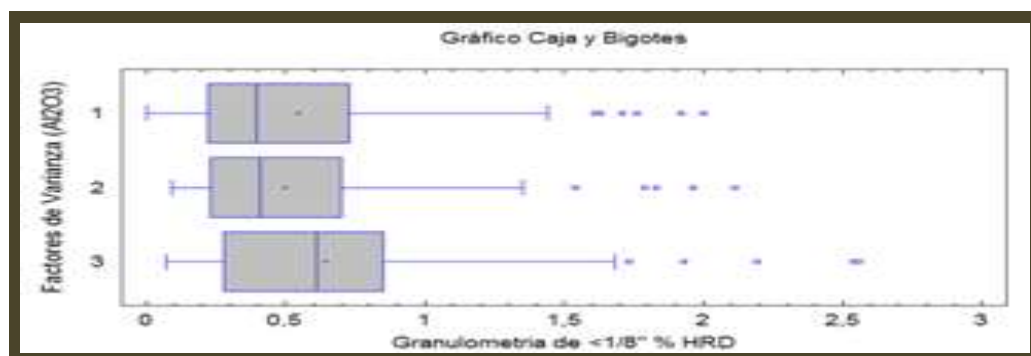
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia creciente en la granulometría de  $>1/8''$  del HRD cuando el  $\%Al_2O_3$  incrementa. Con Valor-P = 0,0000 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

Sin embargo a escala industrial, este sería un atributo para seguir estudiando ya que entre el N1 y N3 la variación es en 0,5 puntos aproximadamente, por lo tanto no hay que descartar su incidencia.

- **Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs granulometría de  $-1/8''$  del HRD.**



GraficoV-39: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de  $-1/8''$  del HRD.



GraficoV-40: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Granulometría de -1/8" del HRD.

TablaV-23: resumen estadístico Granulometría -1/8" del HRD.

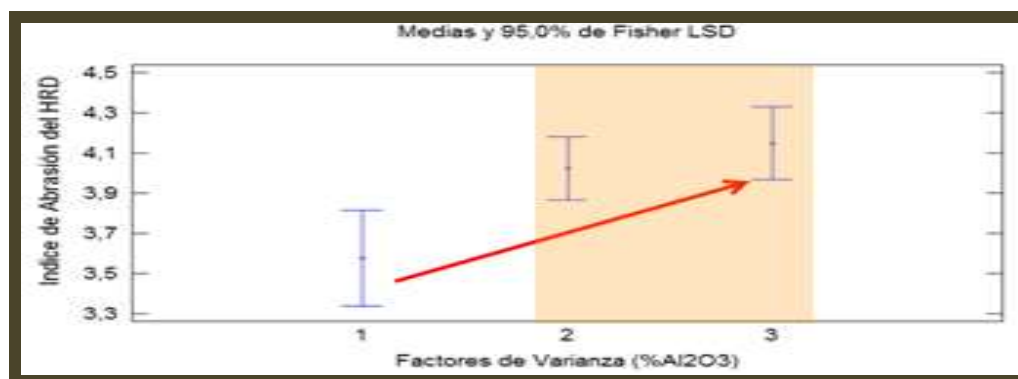
Resumen estadístico para la granulometría de -1/8" del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de la granulometría	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	163	0,565092	0,48383	85,6197%
2(0,95 – 1,15)	329	0,505805	0,369219	72,9962%
3(1,15 -2)	226	0,688673	0,808482	117,397%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia creciente en la granulometría de <1/8" HRD cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0001 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

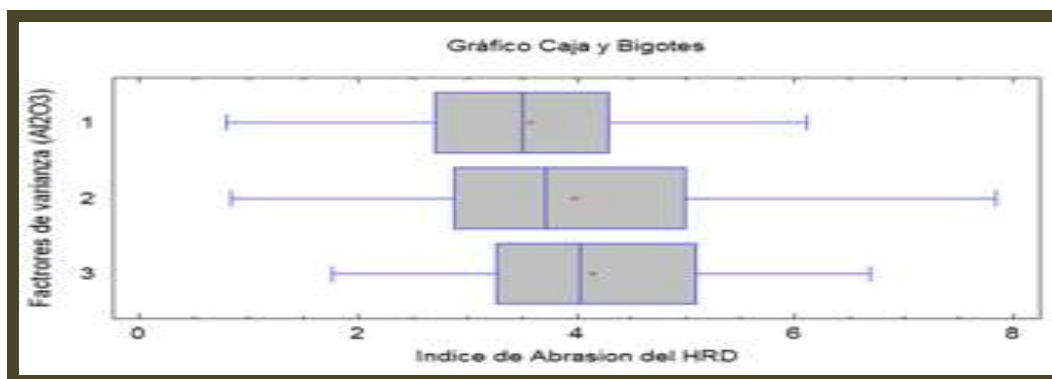
A escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

### 5.5.2. Análisis de las propiedades físicas del HRD.

- Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs Índice Abrasión del HRD.



GraficoV-41: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Abrasión del HRD.



GraficoV-42: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice abrasión del HRD.

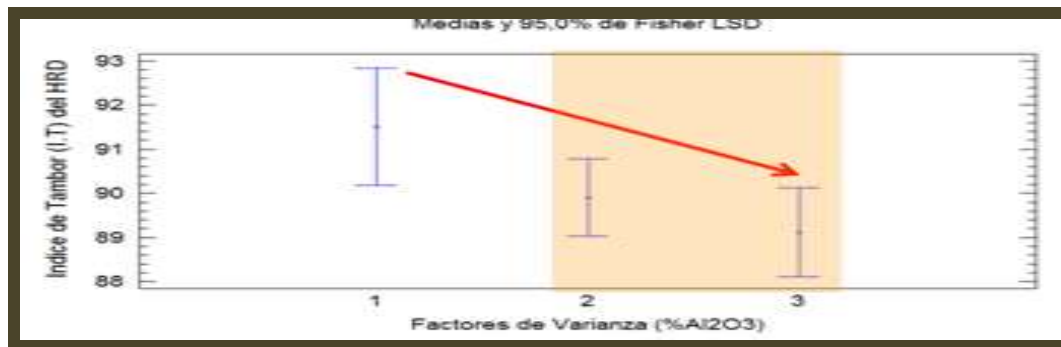
TablaV-24: resumen estadístico del Índice Abrasión del HRD.

Resumen estadístico para: el índice de abrasión del HRD				
factores	Numero de muestra	Media del índice de Abrasión	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	59	3,57814	1,06551	29,7783%
2(0,95 – 1,15)	136	4,02404	1,52503	37,8979%
3(1,15 - 2)	102	4,14706	1,12711	27,1786%

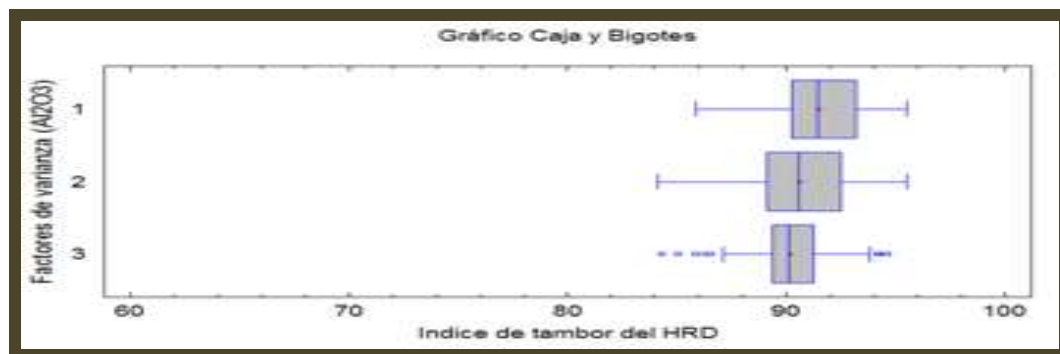
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia creciente en el índice de abrasión del HRD cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0253 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

A escala industrial la variabilidad se podría considerar despreciable.

- Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs índice de tambor del HRD.



GraficoV-43: Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Índice de Tambor del HRD.



GraficoV-44:caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs índice de tambor del HRD.

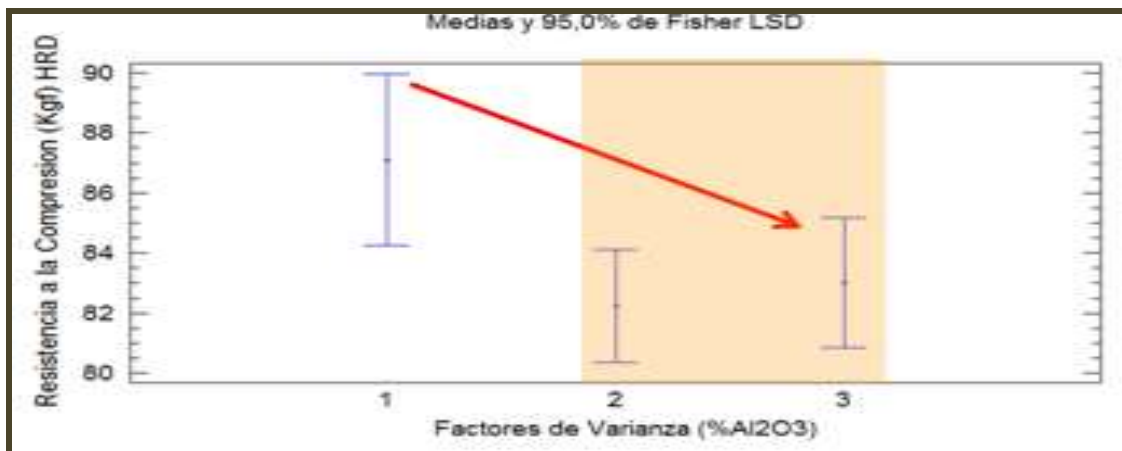
TablaV-25: resumen estadístico del Índice de Tambor del HRD.

Resumen estadístico para el índice de tambor del HRD				
factores	Numero de muestra	Media del índice de tambor	Desv.estan	Coef.var
1 (0-0,95)	59	91,502	2,16066	2,36132%
2(0,95 – 1,15)	136	89,902	7,72978	8,59801%
3(1,15 - 2)	102	89,1163	8,61626	9,66857%

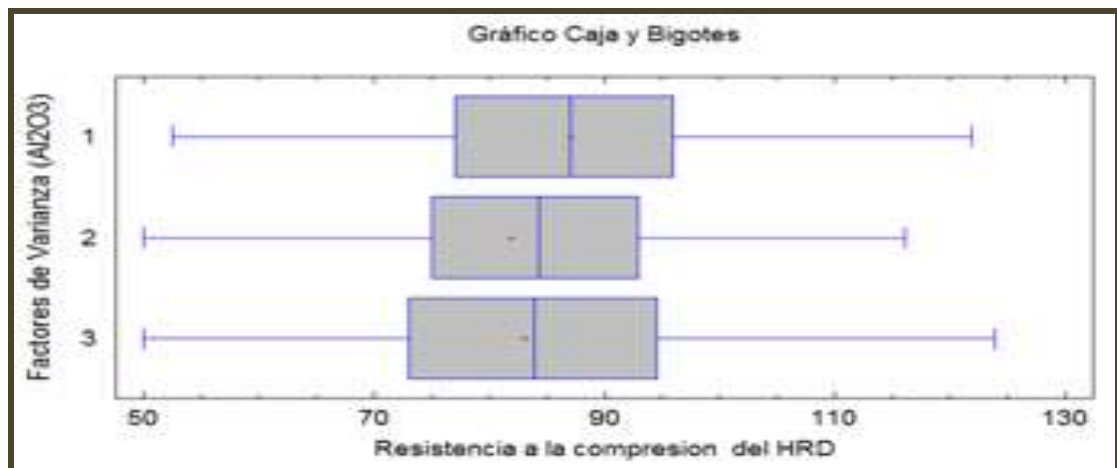
En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en el índice de tambor cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.0018 lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

A escala industrial, este sería un atributo para seguir estudiando ya que entre el N1 y N3 la variación es en 2 puntos aproximadamente, por lo tanto no hay que descartar su incidencia

- **Grafico de medias del Porcentaje de alúmina de pella de alimentación Vs Resistencia a la compresión del HRD.**



GraficoV-45 Análisis del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia de compresión del HRD.



GraficoV-46: caja y bigote del porcentaje de Alúmina Vs Resistencia a la compresión del HRD.

**TablaV-26: resumen estadístico Resistencia de Compresión del HRD.**

Resumen estadístico para la resistencia a la compresión del HRD				
factores	Numero de muestra	Media de resistencia a la compresión	Desv. estan	Coef. var
1 (0-0,95)	59	87,108	14,7304	16,9105%
2 (0,95 – 1,15)	136	82,2432	15,7775	19,1839%
3 (1,15 - 2)	102	83,0235	16,1722	19,4791%

En el análisis de varianza ANOVA simple se puede apreciar la tendencia a disminuir en el índice de tambor cuando el %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incrementa. Con Valor-P = 0.1048 lo cual indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los factores.

**TablaV-27: resumen estadístico de los atributos del HRD.**

Variable-X	Influencia		
	Alta	Media	Baja
Granulometria 5/8"		↑	
Granulometria 1/2"	↓		
Granulometria 3/8"		↑	
Granulometria 1/4"	↑		
Granulometria -1/4"	↑		
Granulometria 1/8"	↑		
Granulometria -1/8"		↑	
Índice de Abrasión		↑	
Índice de tambor		↓	
Resistencia a la compresión			-----

## 5.7 Modelo propuesto de la productividad:

A continuación se muestran la ecuación obtenida para MIDREX II Módulo c en función del rango del porcentaje de alúmina y de las variables más influyentes en la productividad de los mismos.

### 5.5.1 Ecuación para los rangos establecidos del porcentaje de alúmina:

$$\begin{aligned} \text{productividad} = & -1334,16 + 0,534412*\% \text{Met} + 0,296473*C\_ \% + \\ & 14,2337*FeT\_ \% + 3,2601*SiO2\_ \% + 3,70019*Al2O3\_ \% + 7,152*CaO \\ & \_ \% + 8,78167*MgO\_ \% - 1,06983*\_8\_ \% - 0,453158*\_2\_ \% - \\ & 0,594561*\_8\_ \%_1 - 0,0171735*\_4\_ \% + 0,571024*Col\_14 + \\ & 0,0138944*RC\_Kgf - 0,0100278*POR\_ \% + 3,6992*IT\_ \% + 1,08382*IA \\ & \_ \% + 0,00224808*FEGN \text{ a transc} - 0,00237499*FEGN \text{ a Enfr} + \\ & 0,00107392*FEGN \text{ a Zenfr} - 0,0000516117*FEGE\_Ton - 0,0305577*TGB + \\ & 0,00136061*fgp + 0,00139765*GN \text{ a proceso} \end{aligned}$$

R-Cuadrada= 70,59%

Error Estándar= 3,31

Valor-P= 0,0000

Dado que el valor-P es menor que 0,05, esto es indicativo de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0%.

## 5.8 Validación Del Modelo.

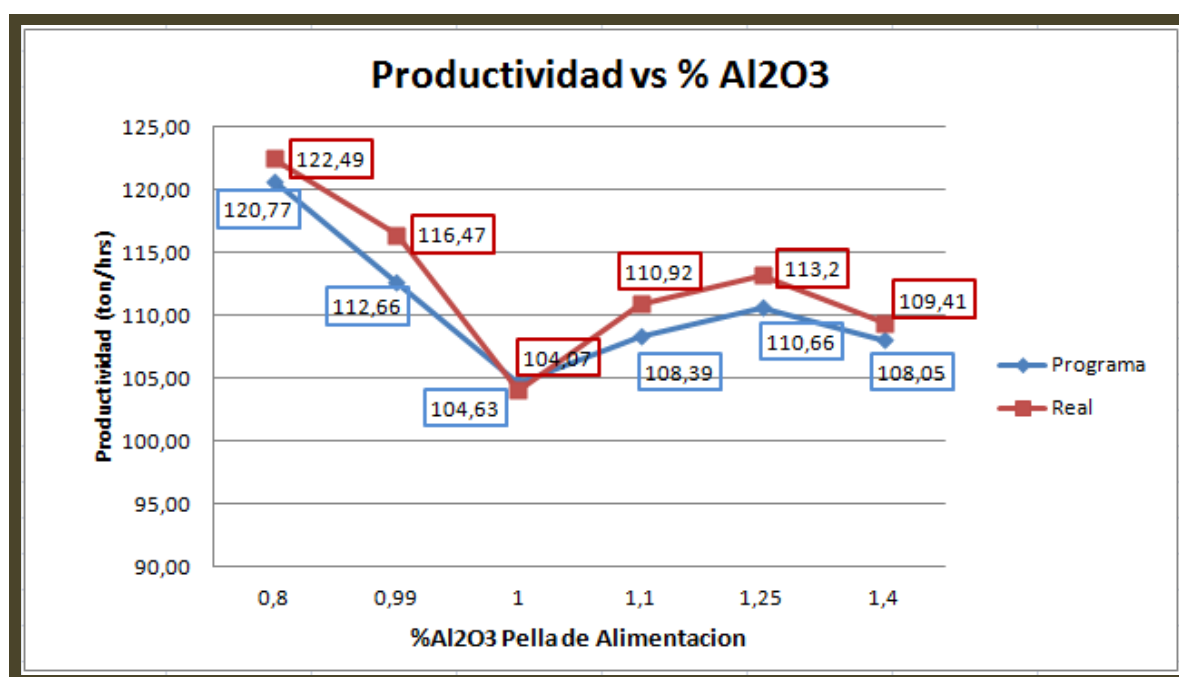
Para validar la ecuación planteada, se tomaron datos reales aleatorios correspondientes a cada una de las variables y a la productividad real del



módulo. Dichos valores fueron multiplicados por cada uno de sus respectivos coeficientes de la ecuación y así obtener la productividad programada para el módulo. Esto permitió comparar la productividad programada con la real. En la tabla se encuentra los valores utilizados en la validación y sus respectivos cálculos.

TablaV-28 Datos para la validación del modelo (0,8 – 1,4).

%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	0,99	1	1,1	1,25	1,4
Programa	120,77	112,66	104,63	108,39	110,66	108,05
Real	122,49	116,47	104,07	110,92	113,2	109,41



GraficaV-47: Validación del modelo productividad Vs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%).

---

## CONCLUSIONES.

Luego de culminado el estudio que requiere el presente trabajo y de acuerdo a los objetivos planteados se tienen las siguientes conclusiones:

1. Para la toma de datos de la pella piroconsolidadas se realizó un desfase de 45 min entre el mineral molido a la entrada del horno de quemado y la pella piroconsolidadas. Para el caso del HRD se desfase 8 horas, tiempo en el cual entra la pella y sale del horno de reducción.
2. Se establecieron los niveles de trabajo porcentaje de Alúmina en función de su comportamiento en el periodo 2009-2012 tanto para el mineral molido como para las pellas de alimentación, donde se obtuvieron tres clases de niveles validos para el estudio. Nivel I (0 - 0,95) Nivel II (0,95 - 1,15) Nivel III (1,15 - 2).
3. Mediante el uso de herramientas estadísticas ANOVA Simple se determino el comportamiento de los atributos de la pella piroconsolidadas y del HRD cuando varia el  $\%Al_2O_3$ , dando como mayor impacto a nivel estadístico la generación de material partido y generación de finos, esto producto de la disminución de la fracción útil de la pella.
4. Luego de identificadas las variables con mayor incidencia en la productividad de los módulos Midrex, se estableció una ecuación en función de los niveles establecido del porcentaje de alúmina de las pellas de alimentación, obteniendo que por cada 0,1 que varia el  $\%AL_2O_3$  la productividad varia en 0,370ton/hr

---

## RECOMENDACIONES.

### Para Planta de Pellas:

1. Realizar análisis estadístico que incluya parámetros operativos que incidan directamente en la calidad del producto tanto para la pella verde como para la pella piroconsolidada, a fin de determinar una ecuación más representativa al comportamiento real de la planta.

### Para Plantas Reductoras:

2. Realizar análisis estadístico con variables operativas que no fueron consideradas en el modelo, a fin de determinar una ecuación más representativa al comportamiento real.
3. Realizar pruebas de cestas con pellas de distintos %Alúmina a fin de determinar el impacto en la calidad del HRD solo con atributos químicos, ya que para el número de cestas introducidas al horno reactor los parámetros operativos serán los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA.

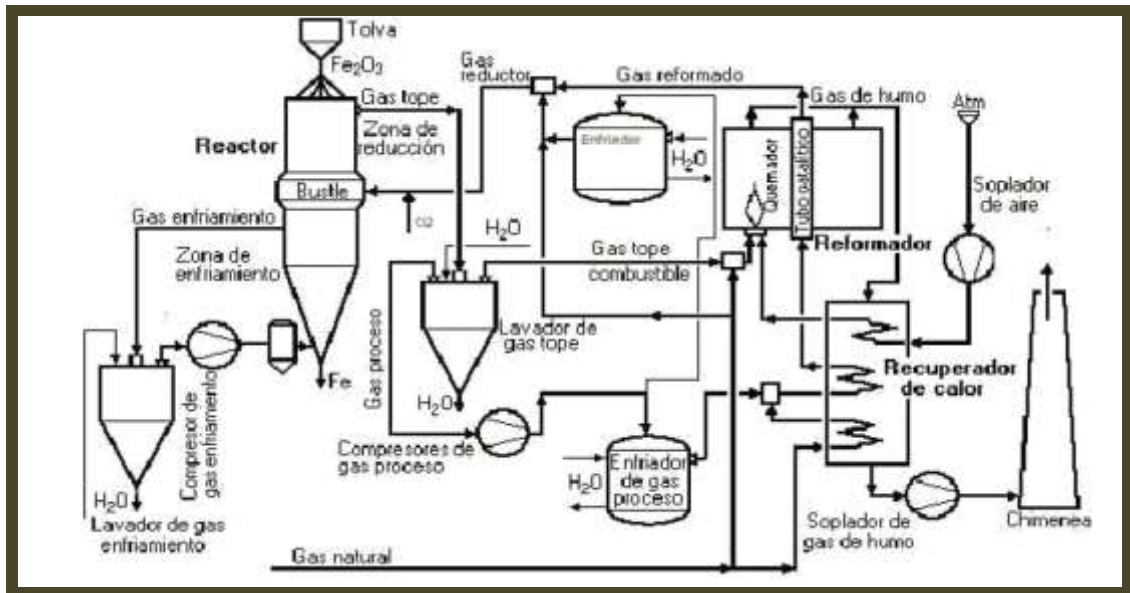
- Hacking, Ian (1990). **Técnicas Estadísticas. Una perspectiva de investigación** 2da Edición. Barcelona.
- HURTADO Y, TORO J. 1997. **Paradigmas y métodos de Investigación en Tiempos de Cambios**. Valencia. Episteme España
- MÉNDEZ A., Carlos (2001): **Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación**, Bogotá.
- NARVÁEZ, Rosa. (1997). **Orientaciones Prácticas para la Elaboración de Informes de Investigación**. Puerto Ordaz.
  - UNEXPO. (2da Edición).

### Páginas Web:

- Midrex (2007). Tecnología Midrex. [Página oficial]. Disponible: [http://www.midrex.com/handler.cfm?cat\\_id=40](http://www.midrex.com/handler.cfm?cat_id=40). [Consulta: 2009 julio 2].
- Sistema de Información en Red “SIDORNET”. Visual Factory.  
<http://www1.uprh.edu/wlopez/GEOP4318/Control%20de%20Calidad/Calidad%20%20%20MODULO%207%20Control%20de%20Proceso%20Estadistico.doc>

## ANEXOS.

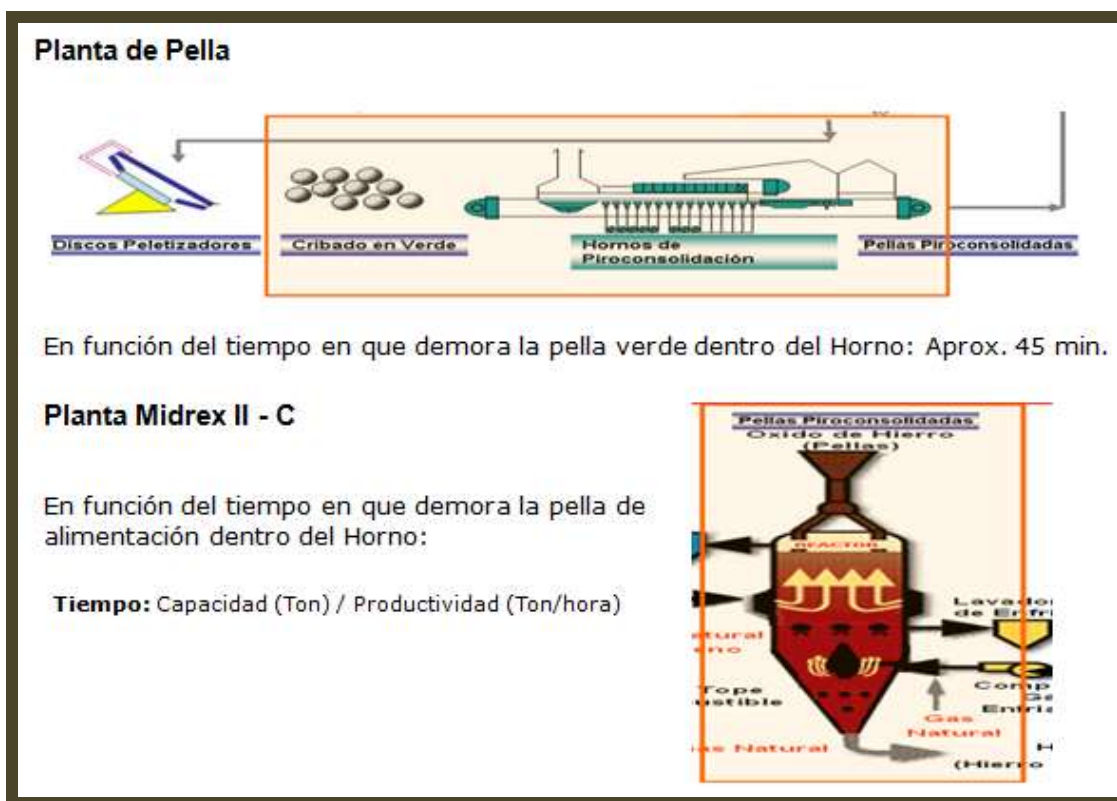
## Anexo 1: Secuencia de operaciones del proceso de Reducción Directa Midrex



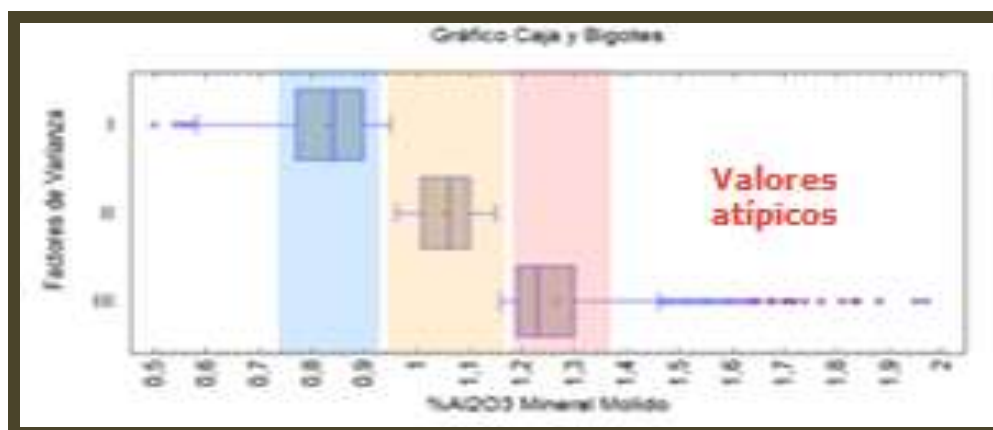
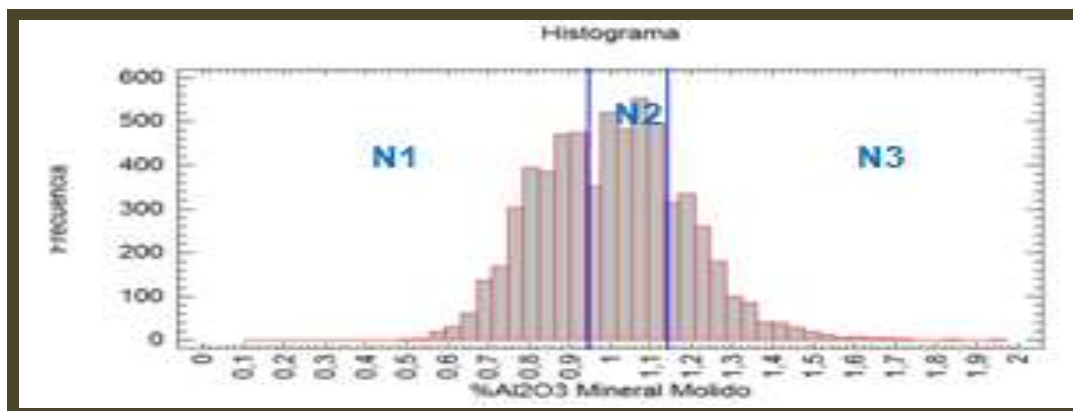
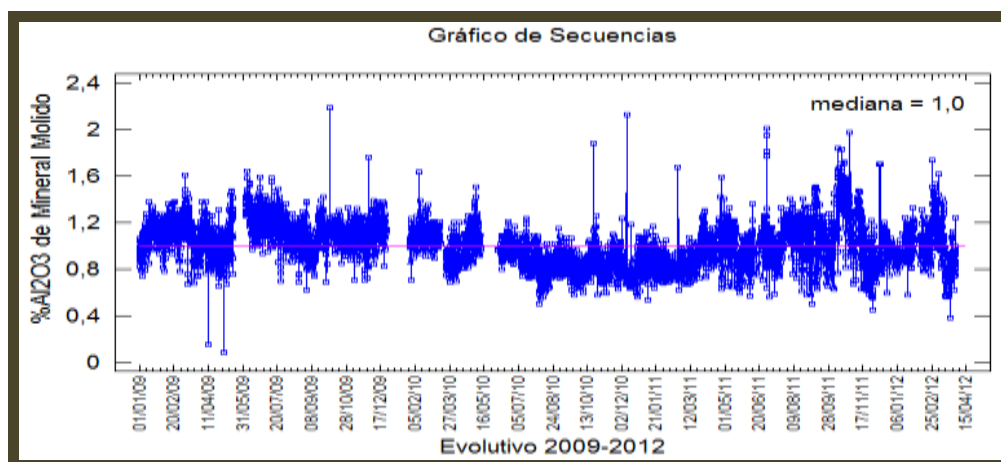
## Anexos 2: Datos para la validación del modelo % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

VARIABLES	COEFICIENTE	VALOR	Producto	Valor	Producto	Valor	Producto	Valor	Producto	Valor	Producto	Valor	Producto
CONSTANTE	-1334,16		-1334,16		-1334,16		-1334,16		-1334,16		-1334,16		-1334,16
%Met	0,53441	96,19	51,4050903	96,19	51,4050903	94,41	50,4538369	93,89	50,1759427	94,45	50,4752134	96,40	51,5654139
C (%)	0,29647	2,18	0,64631114	2,18	0,64631114	2,26	0,67595844	2,32	0,68781736	1,97	0,58405181	1,98	0,5870165
FaT (%)	14,233	66,79	950,62207	66,79	950,62207	66,30	943,6479	65,86	937,38538	65,90	937,9547	66,23	942,6515
SiO <sub>2</sub> (%)	3,2601	2,45	7,987245	2,45	7,987245	3,07	10,008507	3,39	11,051739	3,08	10,041108	2,52	8,21545
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,70019	0,80	2,960152	0,90	3,330171	1,00	3,70019	1,10	4,070209	1,25	4,6252175	1,40	5,180269
CaO (%)	7,152	0,72	5,14944	0,72	5,14944	0,47	3,36144	0,79	5,65008	0,85	6,0792	0,76	5,4355
MgO (%)	8,78167	0,46	4,0395682	0,46	4,0395682	0,47	4,1273849	0,47	4,1273849	0,47	4,1273849	0,47	4,1273849
SiR (%)	-1,06983	2,24	-2,3964192	2,24	-2,3964192	4,79	-5,1244857	0,81	-0,8665623	2,51	-2,6852733	5,10	-5,45613
1/2* (%)	-0,45316	42,35	-19,1912413	42,35	-19,1912413	65,46	-25,1276111	31,48	-14,2654138	26,42	-11,9724344	54,05	-24,493189
3/4* (%)	-0,59456	49,03	-29,1513258	49,03	-29,1513258	36,73	-21,8382255	60,14	-35,7568985	62,45	-37,1303345	35,65	-21,196099
1/4* (%)	-0,01717	5,60	-0,0961716	5,60	-0,0961716	2,32	-0,03984252	7,04	-0,12090144	8,04	-0,13807494	4,89	-0,0839784
<1/4* (%)	0,57102	0,78	0,44539872	0,78	0,44539872	0,32	0,18272768	0,53	0,30264272	0,58	0,33119392	0,31	0,1770174
RC (Kg/t)	0,01389	348,00	4,8352512	348,00	4,8352512	313,00	4,3489472	363,00	4,9047232	334,00	4,6407296	309,00	4,293369
POR (%)	-0,01003	25,36	-0,25430501	25,36	-0,25430501	26,82	-0,26694004	24,82	-0,24889	24,64	-0,24708499	25,18	-0,252
IT (%)	3,6992	95,58	353,569536	95,58	353,569536	94,29	348,797568	95,27	352,422784	96,44	353,051648	95,00	351,42
IA (%)	1,08382	3,94	4,2702508	3,94	4,2702508	5,00	5,4191	4,34	4,7037788	4,07	4,4111474	4,38	4,747131
EGN a trans	0,00225	1410,90	3,17181393	1410,90	3,17181393	1103,70	2,48121512	776,70	1,74607814	999,37	2,24667028	836,46	1,8804341
FEEN a Entr	-0,00237	7,62	-0,01808926	7,62	-0,01808926	0,49	-0,00115948	775,59	-1,84201827	9,54	-0,02266815	0,09	-0,0002246
EGN a Zenit	0,00107	4679,84	5,02576941	4679,84	5,02576941	4700,01	5,04743187	6215,85	6,67532626	6700,12	7,19539562	4451,18	4,780206
FEEN/Ton	-5,2E-05	65416,83	-3,37627391	65416,83	-3,37627391	61872,89	-3,19336527	61010,00	-3,14882962	61042,83	-3,15052413	63787,02	-3,2921565
TGB	-0,03056	877,83	-29,8802121	877,83	-29,8802121	871,94	-29,700113	869,85	-29,6395739	870,15	-29,6455273	878,82	-29,944082
lap	0,00136	89742,02	122,103895	89742,02	122,103895	87055,75	118,448924	90007,76	122,737577	88043,38	121,153285	87271,38	118,74231
IN a proces	0,0014	16499,06	23,0599326	16499,06	23,0599326	16730,83	23,3838439	15094,60	21,7957963	16380,02	22,8935288	16545,75	23,125161
PRODUCTIVIDAD PROGRAMADA			120,767686		121,137705		104,633232		108,388172		110,658573		108,05391
PRODUCTIVIDAD REAL			122,49		116,47		104,07		110,92		113,20		109,41

### Anexo 3: Tiempo para el desfase de datos.



#### Anexo 4: Niveles de trabajo del porcentaje de alúmina de mineral molido.





## Anexo 5: Niveles de trabajo del porcentaje de alúmina de la pella de alimentación de Midrex II-C.

