

# **MODELO DE ACCIONES PARA ESTABLECER UN MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE ALÚMINA EN UNA REDUCTORA DE ALUMINIO**

**4to Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008. Montevideo – Uruguay**

**Henry Castro**  
**CVG-Venalum**  
**Puerto Ordaz**  
**Venezuela**  
castro@venalum.com.ve

**Joaquín Santos**  
**Universidad**  
**Simón Bolívar**  
**Venezuela**  
jsantos@usb.ve

**Alfonso Quiroga**  
**Universidad**  
**Simón Bolívar**  
**Venezuela**  
aquiroga@usb.ve

**Leonardo Contreras**  
**Universidad**  
**Simón Bolívar**  
**Venezuela**  
leocon@usb.ve

## **RESUMEN**

Este trabajo se centra en desarrollar un modelo de acciones que permitan establecer un mantenimiento preventivo del sistema de transportación de alúmina hacia las celdas de reducción. El sistema tiene como función principal transportar la alúmina desde los silos hasta las celdas electrolíticas donde se realiza el proceso de reducción de la misma y se obtiene el aluminio primario. El sistema de transporte es del tipo neumático y está constituido por silos de 100 TM, cajas de distribución y vasijas de presión de 6 y 3 m<sup>3</sup>. En el año 2004 el sistema de transportación representó el 18,63 % del total de fallas en el área del complejo II. Posteriormente en el año 2005 aumentó a 36,17% del total de fallas del complejo y en el año 2006 representó el 35,83%. Esta situación generó la necesidad de establecer acciones hacia un mantenimiento preventivo, el cual debe ser orientado a implantar posteriormente un modelo de mantenimiento a ser soportado con los recursos disponibles, bajo planes adecuados con una disminución de las acciones correctivas y aumento de la confiabilidad y disponibilidad del sistema. Se utilizan análisis de Pareto para establecer un enfoque de criticidad que permita identificar los subsistemas más críticos en cuanto a generación de fallas. Se complementa el trabajo con análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF) de cada subsistema, se utilizan los datos de fallas para establecer, mediante herramientas estadísticas, las frecuencias de mantenimiento adecuadas a dicho sistema. Posteriormente se analizan y discuten los resultados obtenidos para establecer las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

**Palabras claves: AMEF, Mantenimiento, Pareto, Confiabilidad, Disponibilidad.**

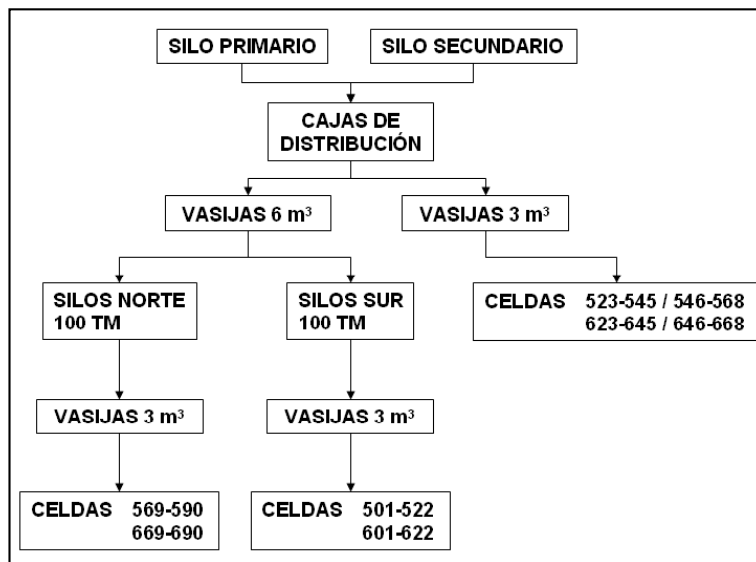
## **INTRODUCCIÓN**

La empresa fue inaugurada en la ciudad de Puerto Ordaz, al sur de Venezuela, el 10 de Junio de 1978; posee una capacidad instalada de producción de aluminio de 430.000 TM/año. Existen 5 líneas de producción de las cuales las cuatro primeras poseen tecnología Reynold P-19 y la quinta posee tecnología Hydro Aluminium. Las Líneas I, II, III y IV poseen 180 celdas de reducción electrolítica cada una, y en cada línea hay dos salas con 90 celdas. En el denominado complejo II se encuentra la línea de celdas III. Desde su inauguración las celdas eran alimentadas por punto de alúmina a través de las grúas marca ECL. Entre los años 1996 y 1997 se inician mejoras operativas en el proceso de reducción, pasando de alimentación por punto, a la alimentación vía fase densa (transporte neumático). Las mejoras han permitido una alimentación automática y controlada de los insumos suministrados a las celdas.

Los sistemas de transporte neumático de alúmina tienen como objetivo el transporte de la alúmina desde los silos hasta las celdas de reducción electrolítica para contribuir con el proceso de obtención del aluminio primario. En la figura 1 se presenta un flujograma ilustrativo. El sistema en su aspecto general lo conforman los silos de 100 TM, las vasijas de presión de 6 m<sup>3</sup>, las vasijas de presión de 3 m<sup>3</sup> y las cajas de distribución.

Este sistema funciona con 2 redes de aire comprimido que suministran el aire necesario. A continuación se identifican los componentes de cada subconjunto:

- Los silos de 100 TM constan del Silo propiamente dicho, las válvulas doble péndulo, las válvulas mariposa, el motor soplador para fluidificación y los sensores de nivel.
- La vasija de presión de 6 m<sup>3</sup> está compuesta por la estructura de la vasija, los sensores de nivel, las válvulas tipo cuchilla, las válvulas cono y las válvulas de bola.
- Las vasijas de presión de 3 m<sup>3</sup> contienen las válvulas tipo plancha, las válvulas tipo cuchillas, las válvulas cono, las válvulas de bola, los sensores de nivel y las válvulas de estrangulamiento conocidas como “pinch”.
- Las cajas de distribución están constituidas por una válvula tipo plancha, un aerodeslizador (tobogán), las válvulas mariposa, un motor soplador para fluidificación y la estructura de la caja como tal.



**Figura 1.** Flujograma general Sistema de Transportación Alúmina Línea III de Complejo II.

Fuente: Dpto. Ing. Mantenimiento. / C.V.G. Venalum

Existen tres sistemas de transporte neumático de materiales en el proceso de reducción, ellos son: el transporte de alúmina, el transporte de baño y el transporte de fluoruro, estos transportes suministran los insumos al proceso de reducción.

El proceso de transporte de alúmina se realiza partiendo de los silos de alúmina primaria la cual es conducida hasta las cajas de distribución. Una serie de sopladores mantiene fluidificada la alúmina en las cajas y de allí es depositada en las vasijas de 6 m<sup>3</sup> mediante unos deslizadores conocidos como toboganes. Al llenarse las vasijas éstas se presurizan y comienza el transporte por tuberías hacia los silos de 100 TM. Los silos se mantienen fluidificados con aire proveniente de unos sopladores, luego la alúmina se deposita en las vasijas de 3 m<sup>3</sup>, las cuales al estar llenas, se presurizan y comienza el transporte por tuberías hacia las celdas de reducción. Este proceso de transporte corresponde al conjunto de celdas 569-590, 669-690, 501-522 y 601-622. Para las celdas 523-545, 546-568, 623-645 y 646-668 el proceso sólo contempla los silos de 100 TM, las cajas de distribución y vasijas de 3 m<sup>3</sup> (ver figura 1).

En el año 2004 el sistema de transportación de alúmina del complejo II representó el 18,63 % del total de fallas en su área de Reducción. En el año 2005 representó el 36,17% del total de fallas y en el año 2006 se mantuvo en el orden del 35,83%, los totales de fallas se pueden observar en la tabla 1. De la situación identificada surge la necesidad de diseñar un modelo de acciones para establecer un mantenimiento preventivo que permita aumentar la disponibilidad y confiabilidad del sistema. Para lograr el diseño se establece un proceso de análisis e identificación que genera una metodología orientada a obtener acciones que permitan dicho mantenimiento para el sistema de transportación de alúmina. [Ballou, 1991].

**Tabla 1.** Fallas generales vs. Fallas del sistema de transporte de alúmina

Año	Total General de fallas	Total de fallas del sistema de transporte	Valor en % de las fallas del sistema de transporte
2004	5882	1096	18,63
2005	4294	1553	36,17
2006	3765	1349	35,83

Fuente: Dpto. Ing. Mantenimiento. / C.V.G. Venalum

En este trabajo se identifica cada uno de los sistemas y procesos, y se recopilan los datos de fallas para los años 2004, 2005 y 2006. Se analizan los planes de mantenimiento rutinario y preventivo del sistema de transporte en estudio. Se realiza un pareto del sistema con el objeto de tener un punto de referencia para iniciar un análisis de criticidad de los subsistemas involucrados. Luego se realiza un análisis de los modos y efectos de fallas (AMEF) para establecer las fallas potenciales del sistema de transporte y tomar las acciones adecuadas para minimizar las mismas bajo un enfoque sistemático y sistémico. Se establece la frecuencia de mantenimiento más adecuada para el sistema de transportación de alúmina, apoyado en la base estadística que ayude a desarrollar dicho modelo de acciones de mantenimiento y finalmente se presenta el flujograma del mismo, ilustrando la secuencia de pasos que permiten la aplicación del modelo.

## **FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS**

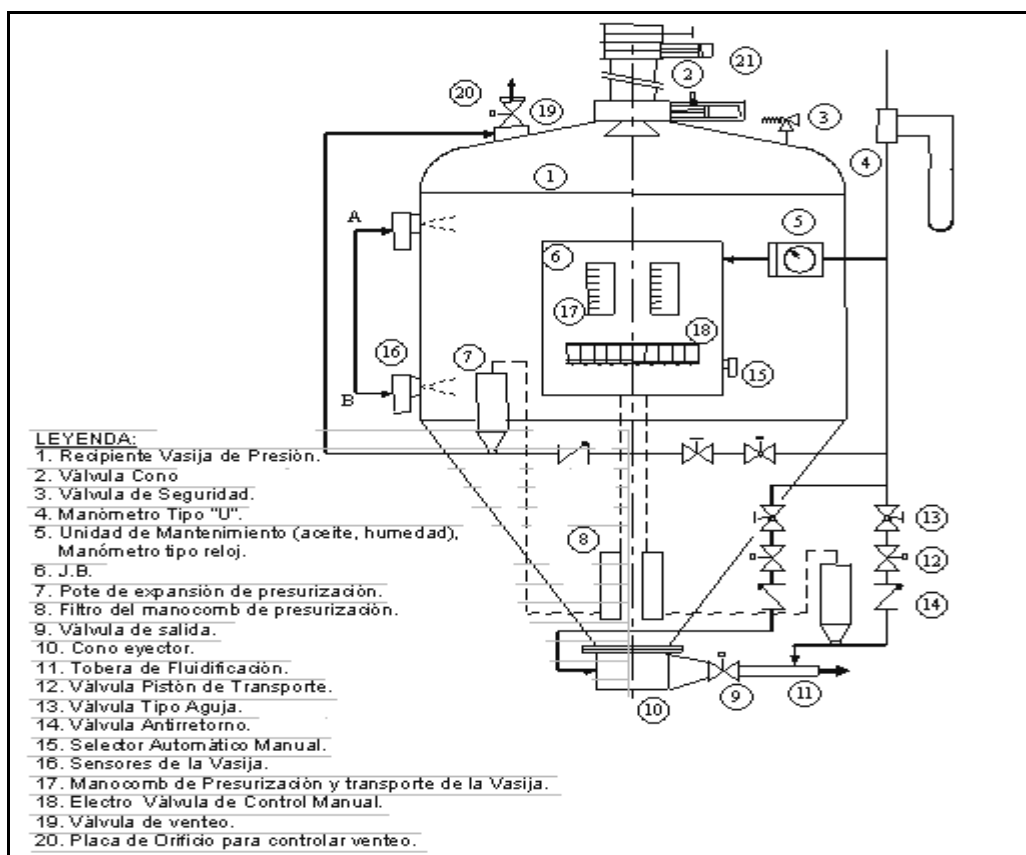
A continuación se comenta el conjunto general de los sistemas y de los procesos de funcionamiento, se destaca el funcionamiento de la vasija de presión, la cual representa el subsistema más complejo desde el punto de vista de operación del sistema de transporte en estudio.

### **Sistema de transporte de alúmina del complejo reductor II en la línea III**

Este sistema de transporte y distribución está diseñado para lograr con aire comprimido desplazamiento de la alúmina en una mezcla en estado de polvo mediante la fluidificación o suspensión “en paquetes” del material. El sistema transporta el material a través de tuberías con la aplicación de presión estática. El sistema se denomina “fase densa” porque la relación aire-material es más pesada que en otros sistemas convencionales que utilizan aire comprimido para el transporte. El proceso de transporte se realiza desde los silos de alúmina primaria y se conduce la alúmina hasta las cajas de distribución mediante unos deslizadores. Una serie de sopladores mantiene fluidificada dicha alúmina en las cajas y de allí es depositada en la vasija de 6 m<sup>3</sup> a través de otros deslizadores. Al llenarse la vasija de 6 m<sup>3</sup>, ésta se presuriza y comienza el transporte por tuberías hacia los silos de 100 TM. Dichos silos se mantienen fluidificados con unos sopladores y posteriormente de allí se deposita la alúmina en las vasijas de 3 m<sup>3</sup>. Luego del llenado de las mismas, estas vasijas se presurizan y comienza el transporte por tubería hacia las celdas de reducción. El transporte de alúmina en dichas vasijas de presión se divide en tres zonas distintas: la zona de mezcla, la zona de transporte y la zona de descarga.

### **Proceso de la zona de mezcla en las vasijas de 3 m<sup>3</sup>**

En esta zona ocurre la mezcla aire-material que será inyectada bajo presión en estado de polvo a las tuberías. Se usa un dispositivo presurizado llamado vasija de presión que actúa como bomba de polvo (ver figura 2). La vasija es alimentada por gravedad y en el silo se mantiene la fluidificación de la mezcla. Al abrir las válvulas de: cuchilla y cono, cae el material desde los silos de 100 TM situados en la parte superior de las vasijas. A medida que la vasija es llenada, el material desplaza el volumen de aire presente en el interior de la misma a través de la válvula de venteo (normalmente abierta). Una vez llenada la vasija, lo cual se confirma a través de un sensor de nivel, se cierran la válvula cono y la de venteo. A continuación se inicia el proceso de presurización mediante la apertura simultánea de las válvulas de presurización y fluidificación. Antes de la presurización se realiza una inyección de aire a las tuberías transporte para despejarlas de material que haya quedado en las mismas. Cuando se abre la válvula de salida se da inicio al transporte del material debido al efecto venturi producido por la presión del interior de la vasija y la presión de la tubería. Las acciones de abrir o cerrar las válvulas de las vasijas son controladas en forma neumática por electroválvulas en un panel de control ubicado en la misma vasija, dicho panel a su vez es controlado por un controlador lógico programable central (PLC) el cual gobierna todas las operaciones del transporte.



**Figura 2.** Vasija de Presión.

Fuente: Práctica de trabajo "Pruebas de fugas y calibración de vasijas". Código SC-O-005.

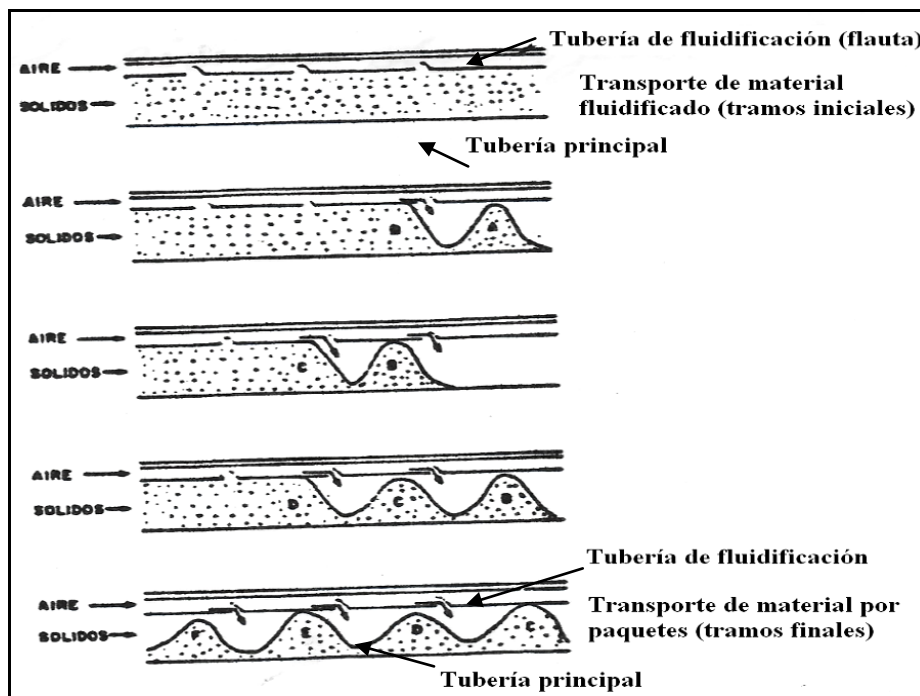
### Proceso de la zona de transporte en las vasijas de 3 m<sup>3</sup>

En esta zona existen tramos de tuberías con diámetros que van de 77 mm a 88 mm. Ellos se utilizan para el transporte de materiales desde la vasija de presión hasta la descarga en las celdas de reducción. El flujo de material es regulado y controlado desde la vasija de presión por válvulas de bola, desviadores de flujo (Pots)

y válvulas de estrangulamiento. Los desviadores de flujo hacen la función de un codo normal de tubería con la diferencia de que su diseño permite la formación de un “colchón” de material que evita el desgaste excesivo por abrasión. El sistema de tuberías, válvulas y codos está conectado por medio de bridas apertadas con la finalidad de facilitar el desmontaje en caso de obstrucción. Los tramos de tubería constan de tres subcomponentes:

- Tubería principal de diámetro acorde a la capacidad de transporte.
- Tubería con orificios denominada “flauta” usada para la fluidificación.
- Tornillo regulador de flujo para controlar el caudal de aire en la tubería de fluidificación.

En los tramos de tubería durante el movimiento de la mezcla existen caídas de presión que disminuyen la fluidificación alcanzada al inicio, esta situación ocasiona que el material sólido tiende a depositarse en la parte inferior de la tubería separándose del aire y este circula por la parte superior del interior de las tuberías. Estas acumulaciones disminuyen el estado de la mezcla en suspensión. Para solventar dicha situación se instala la tubería de fluidificación en la parte superior interna de la tubería principal. Esta instalación permite dirigir aire hacia la parte inferior de la tubería principal y así lograr en los primeros tramos de las tuberías la fluidificación necesaria del material. La tubería de fluidización además hace que en los tramos finales del transporte por la tubería principal se genere un transporte del material por “paquetes”, en la figura 3 se observa una representación del proceso. El transporte por paquetes disminuyendo el caudal de aire pero aumentando la presión de transporte [Robles, 1994].



**Figura 3.** Esquema del transporte de alúmina por los tramos de tuberías.

Fuente: Manual de operaciones y mantenimiento del sistema fase densa en V línea (Tomo 1)

### Proceso de la zona de descarga y separación vasijas de 3 m<sup>3</sup>

En esta zona se separa el aire de la mezcla transportada desde la vasija de presión. Existe un separador llamado “turbobin”, el cual aprovecha el impacto del material contra una superficie y el efecto gravedad en una tolva receptora de material que tiene instalada un tubo de venteo para desalojar por allí el aire separándolo del material sólido. Las vasijas de 3 m<sup>3</sup> tienen un tiempo programado de transporte a cada celda

que oscila desde los 4 hasta los 11 minutos dependiendo de la distancia entre la celda y la vasija. Cada vasija alimenta material a 22 o 23 celdas y cada celda es llenada de alúmina tres (3) veces por día. Cada vasija opera en promedio 7,12 horas/día.

Los subsistemas de vasijas de 3 m<sup>3</sup> y 6 m<sup>3</sup> funcionan con 2 redes de aire comprimido. El transporte del material, la abertura y cierre de las válvulas de estrangulamiento se lleva a cabo con aire comprimido de la red ZR. Los paneles de control e instrumentación de las vasijas utilizan aire comprimido de la red GA para la abertura y cierre de las demás válvulas.

La red ZR consta de cuatro (4) compresores que trabajan en serie y cuya presión de trabajo está en el rango de 7 a 8 bar. Cada compresor está constituido por un (1) motor y dos (2) etapas de compresión libre de aceite separadas por un enfriador intermedio. El aire comprimido al salir de la segunda etapa ingresa a un separador de agua y luego a un enfriador posterior de allí se conduce a un pulmón para luego pasar por una secadora y de allí a la línea de tuberías. La red GA consta de dos (2) compresores que trabajan en paralelo (uno en "stand by") con una presión de trabajo de hasta un máximo de 10 bar. Cada compresor está constituido por un (1) motor y una (1) etapa de compresión bañada en aceite. El aire comprimido al salir de la unidad compresora llega a un pulmón y luego de este se conduce a una secadora para posteriormente dirigirse a la línea de tuberías.

## DESARROLLO DEL MODELO

El desarrollo del modelo comienza por identificar los sistemas, procesos y equipos, clasificarlos para su estudio y análisis, recopilar sus datos de fallas, analizar los planes actuales de mantenimiento, realizar un Pareto de los equipos y desarrollar un análisis de criticidad. Se complementa todo con un Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) para afianzar en el modelo la confiabilidad y se realiza un análisis estadístico para evaluar las frecuencias de mantenimiento. El modelo obtenido se presenta en forma de flujograma.

### Identificación general de los equipos.

El sistema de transportación de alúmina de la Línea III se encuentra clasificado en cuatro (4) subsistemas. La tabla 2 muestra los subsistemas en cantidad, datos de horas de operación y producción [Gil 1997].

**Tabla 2.** Identificación de los cuatros subsistemas de transportación línea III. Fuente: SIMA

Subsistema	Cantidad instalada	Producción en TM/Horas	Operación en horas/año
Caja de distribución	5	10	3.100
Vasija de 6 m <sup>3</sup>	2	9,2	3.600
Silo de 100 TM	2	12,6	5.200
Vasija de 3 m <sup>3</sup>	8	6,3	2.600

De los cuatro subsistemas se identifican los conjuntos de componentes o bloques que los conforman y algunas de sus características principales. Esta información se encuentra resumida en las tablas 3, 4, 5 y 6.

**Tabla 3.** Bloques componentes del subsistema Caja de Distribución. Fuente: SIMA

Subsistema Caja de distribución	Descripción
<b>Bloques componentes</b>	
Válvula manual tipo plancha	Válvula diámetro NB-200
Aerodeslizador (Tobogán)	Conformado por malla de fluidificación y abrazaderas antimagnéticas.
Caja de distribución	Estructura de recepción - distribución

Motor soplador	Potencia: 8,6 Kw. 460V 14,6ª Marca: SIEMENS
----------------	---

**Tabla 4.** Bloques del Subsistema Vasija de 6 m<sup>3</sup>. Fuente: SIMA

<b>Subsistema Vasija</b>	
<b>Bloques componentes</b>	<b>Descripción</b>
Válvula neumática tipo cuchilla	Válvula diámetro NB-200
Válvula neumática de cono	Válvula diámetro NB-200
Válvula neumática de bola	Válvula diámetro NB-80
Válvula neumática de bola	Válvula diámetro NB-125
Vasija de Presión	Estructura de recepción y mezcla
Válvula neumática de bola	Válvula diámetro NB-65
Sensor de nivel	Modelo: FTM-930, Marca: E.Hauser

**Tabla 5.** Bloques del Subsistema Silo 100 TM. Fuente: SIMA

<b>Subsistema Silo 100TM</b>	
<b>Bloques componentes</b>	<b>Descripción</b>
Válvula de seguridad doble péndulo	Modelo: JDP, Marca: JAUDT
Sensor de nivel	Modelo: FTM-230, Marca: E. Hauser
Silo de Alúmina 100 TM	Estructura y malla de fluidificación
Motor soplador	Potencia: 3,45 Kw. 460V 6A Marca: SIEMENS
Válvula neumática de mariposa	Válvula diámetro NB-80

**Tabla 6.** Bloques del Subsistema Vasija de 3 m<sup>3</sup>. Fuente: SIMA.

<b>Subsistema Vasija de 3 m<sup>3</sup></b>	
<b>Bloques componentes</b>	<b>Descripción</b>
Válvula manual tipo plancha	Válvula diámetro NB-200
Válvula neumática tipo cuchilla	Válvula diámetro NB-200
Válvula neumática de cono	Válvula diámetro NB-200
Vasija de Presión	Estructura
Válvula neumática de bola	Válvula diámetro NB-50
Válvula neumática de bola	Válvula diámetro NB-80
Válvula de estrangulación (Pinch)	Válvula diámetro NB-80 (para cada celda)
Sensor de nivel	Modelo: FTM-930, Marca: E. Hauser

### Recopilación de los datos de fallas.

La recopilación de los datos de fallas se hace utilizando el manejador de datos denominado "SAS enterprise guide" cuya base de información lo retroalimenta el SIMA. Los valores se muestran en las tablas 6, 7, 8 y 9. El tiempo promedio entre fallas se denomina TPEF, el tiempo promedio operativo es TPO y el tiempo promedio fuera de servicio es TPFS. El número de fallas en el período de estudio se reflejan en la figura 4.

Todos los datos recopilados se utilizan para desarrollar los análisis de Pareto, criticidad y AMEF [Duffua, 2005; Parra, 2005].

**Tabla 6.** Datos de fallas Subsistema Caja de Distribución. Fuente: SIMA-SAS Enterprise guide.

Año	Cantidad	TPFS Hr/falla	Costos Mantto. Bs.	TPEF Hr/falla	TPO Hr/falla
2004	11	2,53	4.182,00	584,13	581,7
2005	7	49,38	2.620,30	1484,27	1443,16
2006	7	0,55	2.497,33	818,05	817,48

**Tabla 7.** Datos de fallas Subsistema Silo 100 TM. Fuente: SIMA-SAS Enterprise guide.

Año	Cantidad	TPFS Hr/falla	Costos Mantto.Bs.	TPEF Hr/falla	TPO Hr/falla
2004	3	1,22	183,37	3369,17	3367,71
2005	3	0,75	378,78	1266,06	1265,44
2006	5	0,4	374,74	2633,58	2632,99

**Tabla 8.** Datos de fallas Subsistema Vasija de 6 m3. Fuente: SIMA-SAS Enterprise guide.

Año	Cantidad	TPFS(Hr/falla)	Costos Mantto. Bs.	TPEF Hr/falla	TPO Hr/falla
2004	15	1,28	2.900,63	483,99	482,69
2005	31	3,16	7.18664	334,54	329,43
2006	43	2,17	28.730,83	172,06	169,83

**Tabla 9.** Datos de fallas subsistema vasija de 3 m3. Fuente: SIMA-SAS Enterprise guide.

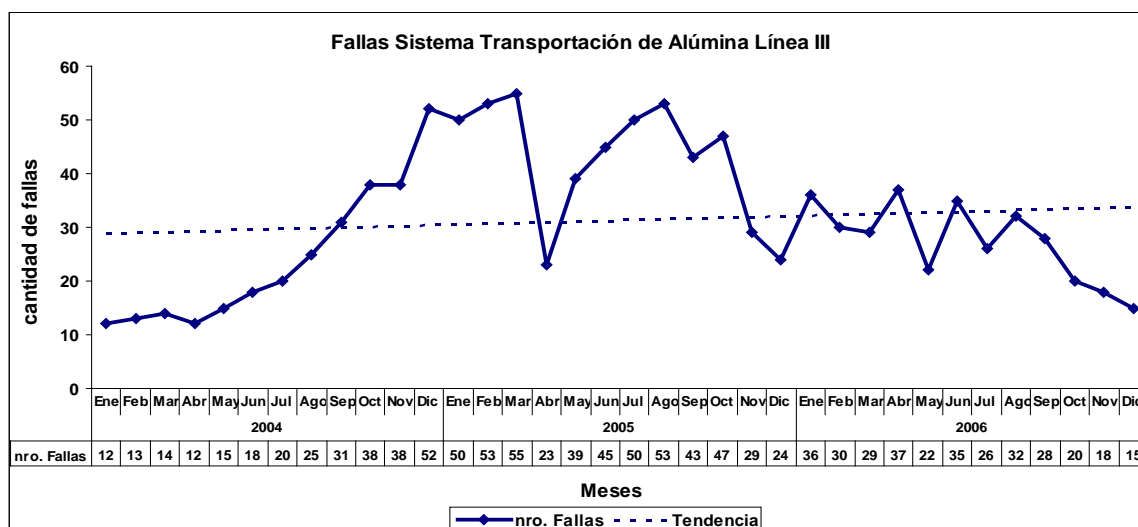
Año	Cantidad	TPFS (Hr/falla)	Costos Mantto.Bs.	TPEF Hr/falla	TPO Hr/falla
2004	214	0,93	400.528,73	40,83	38,98
2005	498	1,05	175.275,4	15,93	15,02
2006	290	2,61	166.390,64	27,38	25,15

### Análisis de Pareto.

El análisis de Pareto relaciona el número de fallas y su valor porcentual, los valores se reflejan en la tabla 10.

**Tabla 10.** Número de fallas y valor %. Fuente: Elaboración propia.

Subsistema	Número de fallas	Valor % sobre el total
Vasija 3 m <sup>3</sup>	1002	89
Vasija 6 m <sup>3</sup>	89	8
Caja de Distribución	25	2
Silo 100 TM	11	1
Total	1127	100



**Figura 4.** Frecuencia de fallas Sistema de Transportación de Alúmina Línea III.  
Fuente: SIMA-SAS Enterprise guide.

Analizando las tablas 6, 7, 8 y 9 junto a la información de la figura 4 permiten establecer que el subsistema con mayor incidencia de fallas para el período objeto de análisis es el de las vasijas de presión de 3 m<sup>3</sup> acumulando 1.002 fallas lo cual representa un 88,9 % del total de fallas registradas en el sistema de transportación para el conjunto de subsistemas. Adicionalmente la vasija representa el mayor costo por mantenimiento correctivo.

### Análisis de criticidad

En el análisis de criticidad se definen los criterios de evaluación, se lista la información requerida de los subsistemas para la evaluación, se selecciona el método de evaluación (ponderación y cuantificación), se aplica el procedimiento (fórmula de criticidad) y finalmente se jerarquiza la lista. Los criterios de evaluación para los subsistemas en estudio son los siguientes:

- Número de falla: Son las veces que falla cualquier componente o bloque del subsistema.
- Nivel de producción: Es la cantidad que se deja de producir cuando ocurre la falla.
- Tiempo promedio para reparar: Es el tiempo para reparar la falla.
- Costo de reparación: Representa Costo de falla.
- Impacto en seguridad: Posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas.
- Impacto ambiental: Posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al ambiente.
- Impacto operacional: Es el porcentaje de producción que se afecta cuando ocurre la falla y definido por la siguiente ecuación:

$$IPO. = \text{Nivel de producción} * TPRR * IMPRO \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: IPO es el impacto operacional

IMPRO es un valor cualitativo del impacto que tiene el subsistema en el conjunto de la producción.

El resumen de información para el análisis de criticidad se refleja en la tabla 11. Se realizaron ponderaciones y se establecieron puntuaciones a los criterios de evaluación considerando el conjunto del sistema de transportación de alúmina en su relación operativa y entorno. [Parra, 2004; Granela, 2004; Huerta, 2001].

**Tabla 11.** Datos de los subsistemas en estudio para el análisis de criticidad. Fuente: Elaboración propia.

Subsistema	Fallas/año	TPPR Hr./falla	CORE en Bs.	NIP TM/hr.
Caja Distribución	8	12,44	3.099,89	10
Silo 100 TM	4	0,75	312,30	12,6
Vasija 6 m <sup>3</sup>	30	2,41	12.939,37	9,2
Vasija 3 m <sup>3</sup>	334	1,78	247.298,26	6,3

La guía de criticidad reflejada en la tabla 12 se hace partiendo del conjunto de experticias que posea el grupo de trabajo, de la información obtenida de entrevistas a los especialistas y enfocada hacia los objetivos centrales del mantenimiento en la empresa.

**Tabla 12.** Guía de criticidad para el modelo de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

<b>1. Número de fallas</b>	<b>Puntaje</b>
- Menos de 10 por año	1
- Entre 10 y 50 por año	2
- Entre 50 y 100 por año	4
- Más de 100 por año	6
<b>2. Impacto operacional asociado</b>	
<b>2.1 Nivel de producción (NIP) en TM/Hr.</b>	<b>Puntaje</b>
- Menos de 6,5 TM/Hr.	3
- Entre 6,5 y 9,5 TM/Hr.	6
- Más de 9,5 TM/Hr.	9
<b>2.2 Tiempo promedio para reparar (TPPR)</b>	<b>Puntaje</b>
- Menos 1 hora	1
- Entre 1 y 2 horas	2
- Entre 2 y 3 horas	4
- Mas de 3 horas	6
<b>2.3 Impacto en producción por falla (IMPRO)</b>	<b>Puntaje</b>
- No afecta producción	0,05
- 25% de impacto	0,30
- 50% de impacto	0,50
- 75% de impacto	0,80
- 100% de impacto	1
<b>2.4 Costo de reparación (CORE) en Bs.</b>	<b>Puntaje</b>
- Menos de 10 Mil	3
- Entre 10 y 45 Mil	5
- Entre 45 y 85 Mil	10
- Más de 85 Mil	25
<b>2.5 Impacto en la seguridad personal (Cualquier tipo de daño, heridas, fatalidad) (IPS)</b>	<b>Puntaje</b>
- SI.	35
- NO.	0
<b>2.6 Impacto Ambiental (daños a terceros, fuera de la instalación) (IPAM)</b>	<b>Puntaje</b>
- SI.	30
- NO.	0

Para hacer la evaluación, se aplica la ecuación de criticidad a cada subsistema y los resultados se registran en la tabla 13. La ecuación de criticidad es la siguiente:

$$\text{Criticidad} = (\text{IPO} + \text{CORE} + \text{IPS} + \text{IMPA}) * \text{NUMF} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: IPO es el impacto operacional  
 CORE es el costo de la reparación  
 IPS es el impacto en la seguridad  
 IPAM es el impacto ambiental  
 NUMF es el número de fallas.

**Tabla 13.** Resultados evaluación de criticidad. Fuente: Elaboración propia.

Subsistema	NIP	TPPR	IMPRO	IPO	CORE	IPS	IPAM	NUMF	TOTAL
Caja Distribución	9	6	0,5	27	3	0	0	1	30
Silo 100 TM	9	1	1	9	3	0	0	1	12
Vasija 6 m <sup>3</sup>	6	4	0,8	19,2	5	35	30	2	178,4
Vasija 3 m <sup>3</sup>	3	2	1	6	25	35	30	6	576

La jerarquía de los subsistemas en cuanto a criticidad tiene un orden descendente y se representa según el puntaje en la tabla 14. La vasija de 3 m<sup>3</sup> tiene la mayor criticidad por lo cual se considera el conjunto más crítico.

**Tabla 14.** Criticidad Sistema de Transportación de Alúmina Línea III. Fuente: Elaboración Propia

Subsistemas	Puntaje
Vasija 3 m <sup>3</sup> .	576
Vasija 6 m <sup>3</sup>	178,4
Caja de distribución	30
Silo 100 TM	3

### Análisis de modo y efecto de falla AMEF.

Para elaborar el AMEF al subsistema más crítico del sistema de transportación de alúmina de línea III, se emplea la estructura de información presentada en la tabla 14 [Crespo, 2006].

De la tabla 14 las seis primeras columnas son de común aceptación en los análisis AMEF, sin embargo se requiere aclarar lo siguiente para las otras columnas sobre el enfoque adoptado:

- Ocurrencia (Columna 7). Se refiere a la probabilidad de que la falla ocurra, considerando los controles existentes para prevenir la ocurrencia de las causas. Los criterios de evaluación se establecen de acuerdo al comportamiento del subsistema más crítico donde una ocurrencia muy alta significa una (1) falla cada 24 horas y una ocurrencia remota significa una 1 falla cada 2600 horas que representa la producción anual de una vasija de 3 m<sup>3</sup>. En el caso de otros subsistemas se debe considerar otro criterio de tasa de fallas, de acuerdo a su producción anual).
- Severidad (Columna 8). Es el factor que representa la gravedad de los efectos de la falla después de que ha ocurrido, cómo podrá ocurrir o cómo se observará. Los efectos se cuantifican en una escala del 1 al 10, siendo el nivel 10 el más severo. Cada falla funcional y su modo de falla se evalúan tomando en cuenta esta consideración.

- Detección (Columna 9): Es la probabilidad de detectar el efecto de la falla antes de que ella llegue a presentarse en forma definitiva. Para determinar esta probabilidad se usa una escala del 1 al 10. La evaluación de la detección de fallas establece que valores altos indican una pérdida en la capacidad de detención. Los valores son relativos y los adjetivos utilizados para describir la probabilidad de detención indican una relación lineal. Un valor de detección 1 no implica 1005 de detección.
- IPR (Columna 10). Es el índice de prioridad de riesgo. Este se define por la siguiente ecuación:

$$IPR = O \times S \times D \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: IPR es el índice de prioridad de riesgo

O es la ocurrencia

S es la severidad

D es la detección

- Ajuste (Columna 11). Describe las acciones preventivas y/o correctivas, para cada modo de falla, que se recomiendan para reducir el índice de prioridad de riesgo.

**Tabla 14.** Formato de AMEF. Fuente: Crespo Germán

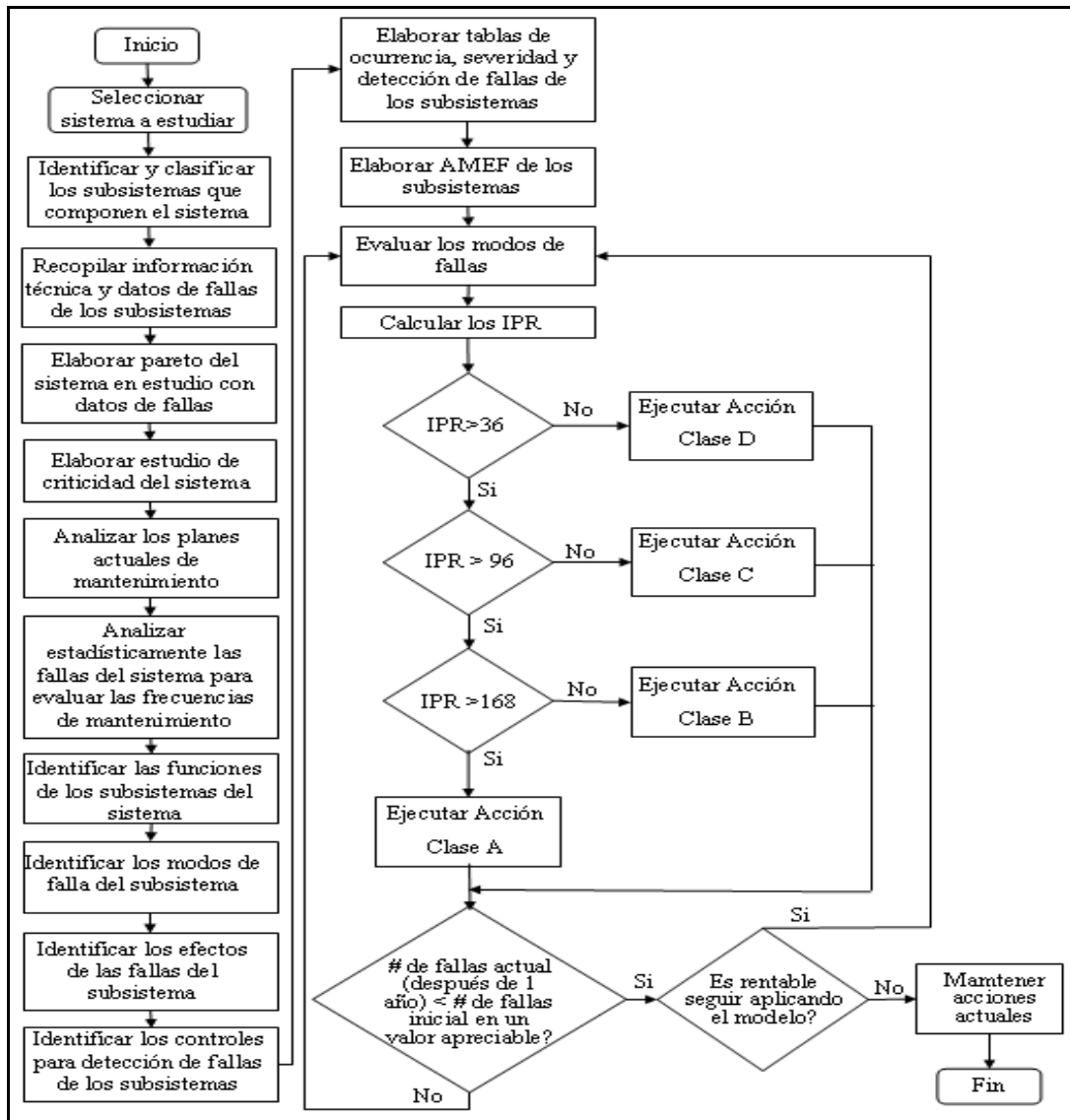
Descripción o Número del equipo 1	Función de la operación 2	Falla potencial			Controles actuales 6	Evaluación				Ajuste 11
		Modo de falla 3	Efecto de la falla 4	Causa de la falla 5		O 7	S 8	D 9	IPR 10	
Descripción del equipo o subsensable que se analiza incluyendo información técnica	Función y operación del equipo que se ha de analizar	Describir cada una de los posibles modos de fallas	Describir los elementos de las fallas	Enumerar las posibles causas de cada modo de falla y su correlación con la falla	Enumerar los controles que previenen cada modo de falla	O C U R R E N C I A	S E V E R I D A D	D E T E C T I O N	R I E S G O	Acción contingente  Acción preventiva  Acción correctiva

### Modelo de acciones para establecer un mantenimiento preventivo.

El modelo obtenido se representa en el flujograma de la figura 5. En el modelo se describe la secuencia de pasos para establecer las acciones que formarán parte del mantenimiento preventivo del sistema de transporte en estudio [Milano, 2005].

Al elaborar las tablas de ocurrencia, severidad y detección de fallas para cada subsistema se tiene información para poder elaborar los AMEF correspondientes. Los AMEF elaborados sirven para evaluar los modos de falla de cada subsistema calculando los respectivos IPR. La gerencia de mantenimiento de acuerdo a los resultados establece la ejecución de las acciones clase A, B, C o D.

Se introduce un elemento de decisión luego de un (1) año de aplicación y seguimiento de las acciones de mantenimiento. Al cabo de un año se verifica si el número de fallas disminuyen en un valor apreciable por las acciones aplicadas. Si no disminuye se requiere: volver a evaluar los modos de fallas, calcular los IPR, ejecutar las acciones clase A, B, C o D y se hacer una nueva evaluación luego de un año hasta que se valore la rentabilidad de la aplicación de dicho modelo de acciones en términos de número de fallas, costos de mantenimiento y utilización de recursos.



**Figura 5.** Flujograma del modelo de acciones para establecer un mantenimiento preventivo al sistema de transporte de alúmina línea III. Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El análisis de los datos de fallas, el resultado del Pareto por componentes, el estudio de criticidad y los AMEF de cada subsistema permiten establecer criterios para definir hacia donde dirigir las acciones de mantenimiento preventivo. La fortaleza de estas herramientas se apoya en que los datos sean “limpios” y fidedignos. La validez de estas herramientas de trabajo y análisis, reposa en la validez de la data.

El modelo es el resultado de una metodología sistemática y sistémica, que permite consensuar dentro de cualquier grupo de mantenimiento y partiendo de información real, acciones de tipo preventivo para minimizar el impacto de fallas, aumentar la confiabilidad del sistema y disminuir las acciones correctivas.

Al identificar el conjunto más crítico de un sistema en su aspecto de fallas y número de fallas, se centra la atención en el problema, pero no es suficiente, se requiere asociar la situación con su posible riesgo. Para

ello debe vincularse el problema con los niveles de producción, el impacto ambiental, el impacto en la seguridad y los costos de mantenimiento. Esto se logra con los IPR, que complementan el enfoque preventivo de frecuencia y actividades de mantenimiento.

El modelo de acciones aquí propuestas sirve de insumo para la implantación de un modelo de mantenimiento con los recursos y planes que la empresa decida destinar a tal fin. Aunque el modelo de acciones se implante en el conjunto más crítico este puede hacerse extensivo haciendo el diseño específico en cada caso, a los demás sistemas de transportación presentes en planta tales como el sistema de transportación de fluoruro y el sistema de transportación de baño molido.

El modelo se apoya en la información del árbol de componentes y despieces existentes en la base de datos, el mejorar esta información hasta un nivel de bloques que permita analizar en más detalle los subconjuntos presenta una oportunidad para realizar una gestión integral del mantenimiento en forma rentable.

El modelo tiene un elemento de verificación y control anual de las acciones, los niveles de criticidad de los subsistemas variaran de tal manera que se requiere por parte de los responsables analizar si es rentable continuar ajustando el modelo de acciones o por el contrario mantener las acciones definidas para el mantenimiento preventivo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Ballou, Ronald. **Lógica empresarial: Control y Planificaciones**. 1<sup>era</sup> Edición, ediciones Díaz de Santos S.A. 1991.

Robles, Oscar. **Manual de operaciones y mantenimiento sistema fase densa V línea**. Venalum 1994.

Gil, Miguel. **Filosofías de mantenimiento CVG Venalum**. Venalum 1997.

Duffua, Salih. **Sistemas de mantenimiento, planeación y control**. Ediciones Limusa. México. 2005.

Parra, Carlos. **Curso ASME de MCC**. Valencia 2005.

Parra, Carlos. **Modelo integral para mejorar la confiabilidad en instalaciones petroleras de subsuelo**. PDVSA-Intevep. Venezuela 2004.

Granela Martín, Hugo, **EXPERIENCIAS EN LA APLICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD**, Conferencia Internacional de Ciencias Empresariales, 2000.

Huerta Mendoza, Rosendo. **PDVSA, EL ANÁLISIS DE CRITICIDAD, UNA METODOLOGÍA PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL**, Septiembre de 2001.

Crespo, Germán. **Curso de Análisis Modo y Efecto de Fallas**. Universidad Simón Bolívar. Junio, 2006.

Milano, Teddy. **Planificación y gestión del mantenimiento industrial**. 1<sup>era</sup> Edición. Editorial Panapo. 2005.

## **MICROBIOGRAFIAS DE LOS AUTORES.**

Henry Castro. Nació en Caracas, Venezuela, obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Nacional Experimental del Táchira en el 2004. En el 2007 obtuvo el título de Especialista en Diseño y

Mantenimiento Industrial en la Universidad Simón Bolívar. Trabaja en la empresa VENALUM Edo. Bolívar en el Departamento de Ingeniería y Mantenimiento.

Joaquín Santos H. nació en Caracas, Venezuela, obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Simón Bolívar (USB) en 1981 y es graduado del Master of Science en Ingeniería Mecánica de la Universidad Simón Bolívar en el 2005. Su experiencia profesional desde 1981 se ha enfocado hacia la gerencia, el mantenimiento, la automatización y control de sistemas, así como en la asesoría en empresas industriales. Actualmente es Profesor del Departamento de Procesos y Sistemas de la Universidad Simón Bolívar y miembro fundador de la Unidad de Gestión en Mantenimiento adscrita a la Fundación de Investigación y Desarrollo (FUNINDES) de la Universidad Simón Bolívar. Es promotor del Centro de confiabilidad y mantenimiento actualmente en desarrollo en las instalaciones de la Universidad Simón Bolívar

Alfonso Quiroga F. nació en Orense, España, obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Central de Venezuela: (1966) y el Master of Science en la Universidad de Michigan: (1970). Es profesor Titular jubilado de la Universidad Simón Bolívar. Ha trabajado en industrias automotrices y consultoras de Ingeniería. Su experiencia profesional en los últimos años además de la docente, es en sistemas de refrigeración, mantenimiento Industrial y asesorías. Actualmente es el encargado de la Especialización en Diseño y mantenimiento Industrial del Postgrado en Ingeniería Mecánica de la USB y miembro fundador de la Unidad de Gestión en Mantenimiento adscrita a la Fundación de Investigación y Desarrollo (FUNINDES) de la Universidad Simón Bolívar. Es promotor del Centro de confiabilidad y mantenimiento actualmente en desarrollo en las instalaciones de la Universidad Simón Bolívar

Leonardo A Contreras G. Nació en Baruta, Edo. Miranda, Venezuela, en 1963 y obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Simón Bolívar (USB) en 1987, graduado de Master of Science en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Simón Bolívar en 1991, culminado estudios de Doctorado en Ingeniería Industrial en la Universidad de Murcia en 1999. Profesor del Departamento de Procesos y Sistemas de la Universidad Simón Bolívar miembro fundador de la Unidad de Gestión en Mantenimiento adscrita a la Fundación de Investigación y Desarrollo (FUNINDES) de la Universidad Simón Bolívar.