

# Implementación de un nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza proveniente de los lavadores de gases de combustión de las calderas del Ingenio San Carlos

Autor: Julio Alexander Vizueta Méndez & Coautor: Ernesto Martínez Lozano Ing.  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
jvizueta@espol.edu.ec & emartine@espol.edu.ec

## Resumen

*Para la producción de azúcar y energía eléctrica el Ingenio San Carlos quema bagazo de caña en sus calderas generándose cantidades considerables de cenizas con los gases de combustión. El Ministerio del Ambiente regula la cantidad de particulado de cenizas que este tipo de caldera emite hacia la atmósfera y la empresa está obligada a cumplir con los parámetros establecidos para las emisiones. Para el control del particulado de ceniza, las calderas cuentan con sistemas lavadores de gases alimentados con agua de proceso que capta las cenizas en suspensión. En estos sistemas es de suma importancia el suministro continuo de agua. Este trabajo de tesis documenta la implementación de un nuevo sistema de tratamiento del agua que alimenta a dichos lavadores de gases, buscando hacer de este un proceso continuo y confiable que permita el pleno cumplimiento de los lineamientos que establece el ente regulador gubernamental. La documentación comprende desde la concepción del proyecto, su construcción, puesta en marcha y operación. Finalmente se realiza un análisis comparativo del particulado emitido en cada una de las calderas trabajando sus lavadores de gases con el anterior y el nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza.*

**Palabras Claves:** Agua de proceso, lavadores de gases, particulado de ceniza, Ministerio del Ambiente.

## Abstract

*For the production of sugar and electricity the Ingenio San Carlos burning bagasse in the boilers generating considerable amounts of ash with the flue gases. The Ministry of Environment regulates the amount of particulate ash that this type of boiler emits into the atmosphere and the company is obliged to comply with the parameters established for emissions. To control particulate ash, boiler systems have scrubbers fed process water captured fly ash. In these systems is critical continuous supply of water. This thesis documents the implementation of a new water treatment system that feeds these scrubbers, looking to make this a continuous and reliable process that allows full compliance with the guidelines established by the government regulator. Understand the documentation from the project design, construction, commissioning and operation. Finally, a comparative analysis of the particulate emitted in each of their working boilers with scrubbers old and new water treatment system with ash.*

**Keywords:** Process water, scrubbers, particulate ash, Ministry of Environment.

## 1. Introducción

Los ingenios azucareros a nivel mundial transforman la energía térmica y potencial presente en el bagazo de la caña de azúcar utilizándolo como combustibles de sus calderas. Con la quema del bagazo se obtiene vapor súper calentado que va a mover las turbinas de los molinos y generadores eléctricos. Ese vapor, luego de haber entregado parte de su energía, pasa a los equipos evaporadores a cocinar el jugo de caña. La producción de energía eléctrica con biomasa (bagazo de caña de azúcar) está en auge actualmente y las empresas azucareras

realizan importantes inversiones para incrementar su producción y al mismo tiempo cumplir con las normas ambientales que regulan la emisividad de ceniza de sus calderas. En el Ecuador esta regulación la realiza el Ministerio del Ambiente mediante dos auditorías ambientales durante el tiempo de producción de la empresa.

El Ingenio San Carlos desde el año 2005 emprendió su proyecto de cogeneración donde actualmente vende al sistema interconectado de energía un promedio de 10000 kwh durante su periodo de producción de azúcar. Sus calderas están equipadas con sistemas lavadores de gases, los cuales con el uso continuo de atomización de agua industrial atrapan las

partículas de ceniza suspendidas en los gases de combustión. El agua, luego de la captación de ceniza, es llevada a un sistema de tratamiento por decantación para separarla de la ceniza y volverla a reutilizar en los lavadores de gases. La ceniza separada es transportada a los canteros y usada como abono natural gracias a sus propiedades químicas bondadosas para el suelo.

Para el tratamiento del agua con ceniza el Ingenio San Carlos contaba con un decantador de bandeja y rastras, las cuales eran movidas por una transmisión tipo rueda dentada y tornillo sin fin. Este equipo de decantación sufría constantes paros debido a saturación de ceniza, daños en la transmisión o trabamientos de sus rastras, interrumpiendo de esta forma la alimentación de agua hacia los lavadores de gases hasta por 24 horas continuas. Durante el tiempo que duraba el daño en el sistema de tratamiento de agua, los lavadores de gases no operaban por lo que la emanación de ceniza hacia la atmosfera no podía ser controlada, incumpliendo así los parámetros de emisiones establecidos por el Ministerio del Ambiente.

En el año 2010 el ingenio San Carlos emprende un proyecto que busca reemplazar su obsoleto sistema de recuperación de agua con ceniza, buscando obtener una recuperación de agua de mejor calidad, dar continuidad al sistema de lavado de gases y cumplir con los lineamientos que el ente regulador ambiental establece. Este nuevo sistema de recuperación de agua alimentara a los sistemas lavadores de gases de sus calderas principales de vapor de 220 psi (#2 y #7) y su caldera de 600 psi (#8).

## 2. Generación de vapor con bagazo de caña de azúcar

El bagazo rico en celulosa es el rechazo producto de la molienda de la caña de azúcar. Este bagazo sale al final del último molino del tandem con una humedad que esta entre 40 y 50%. La quema de este tipo de biomasa genera grandes cantidades de ceniza de las cuales una parte considerable es arrastrada con los gases de combustión.

### 2.1. Normas reguladoras para emisiones de fuentes fijas de combustión

El Ministerio del Ambiente ha establecido límites máximos permisibles para las emisiones de gases de las calderas de los ingenios azucareros, es decir las calderas que queman bagazo como combustible. Estos límites están divididos en fuentes existentes y fuentes nuevas, definiéndose existentes las que estuvieron instaladas antes del año 2003 y nuevas las que se instalaron luego de ese año. Para el caso del ingenio San Carlos sus fuentes existentes son la caldera #2 y #7, mientras que la caldera #8 seria considerada una

fente nueva. En la figura a continuación se muestra la tabla de las normas de emisiones al aire desde combustión de bagazo en equipos fijas de combustión, punto 4.3.5 del Libro VI anexo 3 de la Ley de Gestión Ambiental del estado ecuatoriano.

4.3.5 Elaboración de azúcar: equipos de combustión que utilicen bagazo como combustible

Tabla 10. Límites máximos permisibles de emisiones al aire desde combustión de bagazo en equipos de instalaciones de elaboración de azúcar

CONTAMINANTE EMITIDO	OBSERVACIONES	FUENTES EXISTENTES	FUENTES NUEVAS	UNIDADES
Partículas Totales	--	300	150	mg/m <sup>3</sup> <sup>1)</sup>

Notas:  
<sup>1)</sup> mg/m<sup>3</sup>: miligramos por metro cúbico de gas a condiciones normales de de 1 013 milibares de presión y temperatura de 0 °C, corregidos a 12% de O<sub>2</sub> en base seca.

Figura 1. Límites máximos permisibles para emisión de gases para la industria azucarera.

### 2.2. Sistemas lavadores de gases de combustión

Con la finalidad de cumplir con los límites máximos permisibles establecidos, las calderas están equipadas con sistemas lavadores de gases que cumplen la función de captar las cenizas en suspensión presentes en los gases de combustión. Para el caso particular del ingenio San Carlos las calderas #7 y #8 poseen lavadores de gases del tipo flujo cruzado o contraflujo, esto es que flujos atomizados de agua se cruzan con los flujos de gases lo que permite que la ceniza en suspensión gane peso al humedecerse y se precipiten hacia el fondo del lavador.

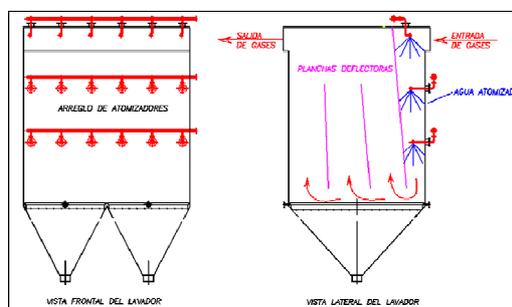
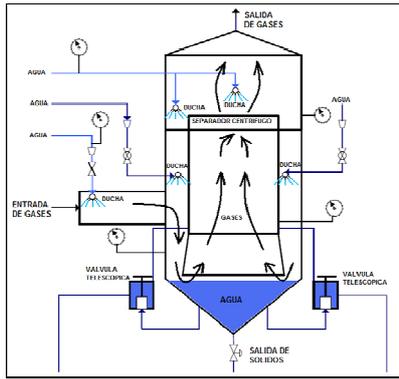


Figura 2. Lavador de gases tipo flujo cruzado o contraflujo.

Una vez que los gases han ingresado al cuerpo del lavador, el flujo de atomización es en dirección del flujo de los gases lo que contribuye a mejorar la precipitación de los sólidos suspendidos.

La caldera #2 posee otro tipo de lavador de gases, este combina la atomización con una película de agua hasta el fondo del lavador por donde se fuerza a los gases a pasar al límite de dicha película. Por ultimo para asegurar que ninguna partícula suspendida haya superado los procesos anteriores, este lavador posee un juego de duchas con un separador centrífugo en la salida de los gases hacia la atmosfera.



**Figura 3.** Lavador de gases tipo lámina de agua.

Luego del paso de los gases por estos equipos lavadores se observa salir hacia la atmósfera gases de color blanco similares al vapor de agua lo que es clara muestra de que están cumpliendo su función a cabalidad.

### 2.3. Recuperación del agua para los lavadores de gases

Esta recuperación de agua es de gran importancia debido a los grandes volúmenes que se manejan. En mediciones efectuadas para el desarrollo de este proyecto se determinó que el consumo de agua de los sistemas lavadores de gases está en el orden de los 330 m<sup>3</sup>/h fuera de las reposiciones necesarias por pérdidas en la evaporación y humedad que se lleva la ceniza.

Para la recuperación del agua el ingenio San Carlos hasta el año 2009 contaba con un sistema de decantación de lodos tipo bandeja y rastras, el cual sufría constantes paros debido a su frágil sistema de transmisión y a su saturación de ceniza. Este sistema requería de grandes cantidades de agua de reposición debido a que su desalojo de ceniza era de arrastre con agua.

La para de este sistema de recuperación de agua interrumpía la alimentación hacia los lavadores de gases lo que era crítico para la caldera #2 debido a que su separador centrifugo se obstruía con ceniza dejándola sin su tiro inducido. Esto ocasionaba que la caldera no produzca vapor lo que afectaba directamente a la producción de la planta. Otro problema era el incumplimiento de los límites máximos permisibles de emisiones.

### 2.4. Aprovechamiento de la ceniza para la actividad productiva de la empresa

La ceniza producto de la combustión de elementos vegetales posee altas concentraciones de potasio, hierro, fósforo y calcio. Estas propiedades convierten a las cenizas de las calderas que usan bagazo como combustible, en un abono o fertilizante orgánico

ampliamente utilizado en los ingenios azucareros a nivel mundial.

Es por esto que los ingenios azucareros invierten mucho dinero y esfuerzo en recuperar y transportar la ceniza hacia los canchales. En los países con tecnología azucarera de punta se implementan ya grandes estaciones de preparación de compostaje orgánico, que no es más que ceniza mezclada con hojas y lodos de cachaza los cuáles atraviesan un proceso de putrefacción. Este compostaje es un abono orgánico muy eficaz.

## 3. Alternativas de solución.

Para dar solución al problema de incumplimiento de los límites permisibles de emisión, para de producción por falta de vapor, excesivo consumo de agua y dificultades para el manejo de ceniza como abono, el ingenio San Carlos emprendió un proyecto de mejora para su sistema de tratamiento de agua con ceniza, para lo cual se barajaron 3 posibilidades:

**Reparar y mejorar el sistema actual.** Esto era continuar con lo que se venía haciendo cada año con el sistema, puesto que este se reparaba y mejoraba antes del arranque de cada zafra.

**Diseñar un nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza.** Esta opción conllevaría arduo trabajo de ingeniería e investigación y el diseño resultante se asemejaría a los equipos de decantación de lodos existentes en planta.

**Adquirir la ingeniería de un sistema de tratamiento de agua con ceniza existente y probado.** Esta es una opción muy confiable debido a que el sistema a implementar ya se habría puesto a prueba en otros ingenios azucareros y se tendrían muchos datos para su correcto funcionamiento.

Con la finalidad de definir cual es la solución óptima que se debe escoger, se lleva estas opciones a una calificación de los parámetros más importantes para la ejecución del proyecto, estos parámetros se han definido como:

- Costo
- Viabilidad
- Supervisión y mantenimiento
- Eficacia
- Confiabilidad

A cada una de las soluciones se les calificara los parámetros con un peso de 0% hasta 100%, luego estos pesos se promediaran resultando la de mayor peso la solución elegida.

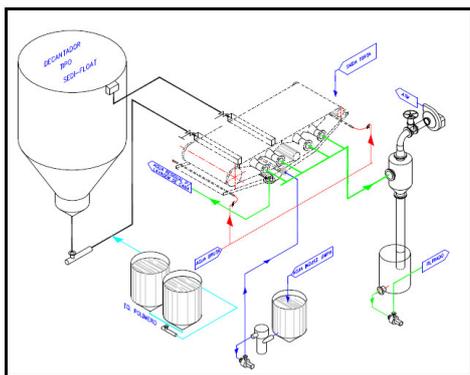
**Tabla 1.** Cuadro de evaluación de la solución optima

	REPARAR Y MEJORAR EL SISTEMA ACTUAL	DISEÑAR UN NUEVO SISTEMA	ADQUIRIR LA INGENIERIA DE UN SISTEMA EXISTENTE
<b>COSTO</b>	100% (bajo)	20% (alto)	20% (alto)
<b>VIABILIDAD</b>	100 % (viable)	20% (poco viable)	100% (viable)
<b>SUPERVISION Y MANTENIMIENTO</b>	20% (critico)	50% (promedio)	50% (promedio)
<b>EFICACIA</b>	20% (baja)	50% (promedio)	90%(alta)
<b>CONFIABILIDAD</b>	20% (baja)	50% (promedio)	100% (alta)
<b>% PROMEDIO</b>	<b>52%</b>	<b>38%</b>	<b>72%</b>

Luego de la asignación de los pesos, se ha seleccionado como la solución optima la adquisición de la ingeniería de un sistema existente de tratamiento de agua con ceniza.

Las empresas que presentaron sus propuestas para la venta de su ingeniería desarrollada para el tratamiento de agua con ceniza fueron:

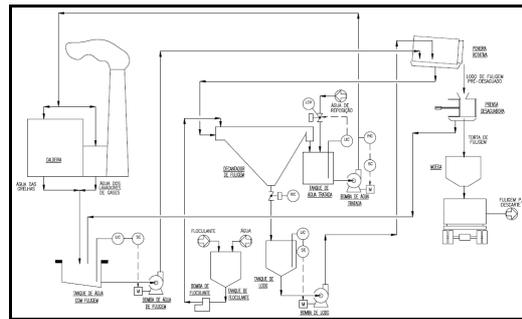
FOURTEAM ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA. Su propuesta consiste en un decantador de tipo bandeja y rastras mejorado, un filtro prensa a vacío para el secado de la ceniza y un sistema de tolva para su recolección y alimentación a volquetes.



**Figura 4.** Propuesta de Fourteam Engenheiros Associados.

Su ingeniería incluye cálculos estructurales, procesos hidráulicos. No se incluye el proyecto civil, eléctrico ni automatización del sistema.

ENGENHO NOVO TECNOLOGIA LTDA. Su propuesta consiste en decantadores de ceniza estáticos tipo celdas, un tamiz rotativo para la separación de la ceniza, fabricación de una prensa hidráulica para el secado de la ceniza con un sistema de recolección y despacho de la misma en volquetes.



**Figura 5.** Propuesta de Engenho Novo.

Su propuesta incluye la ingeniería de procesos hidráulicos, cálculos estructurales, civiles y control/automatización del sistema.

#### 4. Selección de la ingeniería e implementación del nuevos sistema de tratamiento de agua con ceniza

Los criterios de selección aplicados para la adquisición de la ingeniería que satisfaga los requerimientos del proceso de lavado de gases fueron los siguientes:

- Continuidad del proceso de clarificación.
- Confiabilidad del sistema de decantación.
- Optimización del uso del agua.
- Posibilidades de ampliación de capacidad futura.
- Capacidad de automatización de todo el sistema.

Con los criterios de selección definidos, se realizara un análisis rápido de lo que las propuestas pueden cumplir. Para el caso de la continuidad y confiabilidad del proceso, un decantador de tipo rastras es poco confiable por su punto critico en la transmisión y porque maneja todo el flujo de agua con ceniza, en el caso de las celdas de decantación, se trata de equipos estáticos sin elementos móviles y con flujos de agua con ceniza individuales, en caso de para de una de las celdas la otra puede continuar con el proceso. El filtro prensa de Engenho Novo ha sido diseñado para poder ser sacado de funcionamiento sin parar el proceso de clarificación. El filtro prensa al vacío de Fourteam no puede salir de funcionamiento sin parar el proceso.

Los dos sistemas optimizan el uso del agua por ser sistemas cerrados, es decir recuperan toda el agua que usan, aunque ambos van a requerir un sistema de reposición.

El sistema con celdas de decantación individuales puede ser ampliado en su capacidad con el incremento en su número de celdas abaratando de esta forma su inversión inicial. El decantador tipo rastras se construye con una capacidad definida no pudiéndose incrementar su capacidad a futuro.

La propuesta de Engenho Novo incluye la automatización total del sistema. La propuesta de Fourteam la excluye de su oferta.

A continuación se muestra una tabla donde se le han asignado pesos a los criterios de selección, estos van de 0 a 100%, por último se promedian estos pesos puesto que la mayor será la ingeniería escogida.

**Tabla 2.** Matriz de selección de la ingeniería

CRITERIOS DE SELECCION	FOURTEAM ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA.	ENGENHO NOVO TECNOLOGIA LTDA.
Continuidad del proceso de clarificación	0%	100%
Confiabilidad del sistema de decantación	20%	80%
Optimización del uso de agua	100%	100%
Posibilidad de ampliación futura	50%	100%
Capacidad de automatización	60%	100%
PROMEDIO	46%	96%

Gracias a la tabla de selección y asignación de pesos según cumplimiento de los criterios, se selecciono la ingeniería de Engenho Novo.

#### 4.1. Descripción del nuevo sistema para tratamiento de agua con ceniza

El nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza se implemento en dos etapas durante la interzafra 2010 y 2011. En la primera etapa se implemento las celdas de decantación que vinieron a reemplazar el decantador de bandeja y rastras y se instalo la primera etapa en lo que respecta a bombas y tuberías. El sistema continuaba siendo un sistema abierto, es decir que se descartaba la ceniza húmeda y su transporte se lo hacia con flujo de agua. En la primera etapa se consiguió la continuidad del sistema con las celdas de decantación pero se continuó trabajando con un tamiz estático para la separación de la ceniza de mayor tamaño y no se implemento aun el descarte de la ceniza mediante volquetes.

En la 2da etapa ya se implemento la separación inicial de la ceniza con un tamiz rotativo y el secado de la misma mediante una prensa desaguadora. La ceniza para descarte se la deposita en una tolva para alimentar volquetes que la llevaran a los canteros.

El nuevo sistema de tratamiento inicia su proceso con la recolección del agua con ceniza proveniente de los lavadores de gases y de la limpieza de las calderas, esta agua con ceniza es conducida a un canal donde antes de entrar a un tanque es tamizada con un sistema de malla y barajas que retira las cenizas mas gruesas. El agua con ceniza ya tamizada, pasa al tanque de recolección desde donde se bombea al tamiz rotativo que es otra malla para la separación de las cenizas que pasaron por el primer proceso de separación, es decir cenizas mas finas.



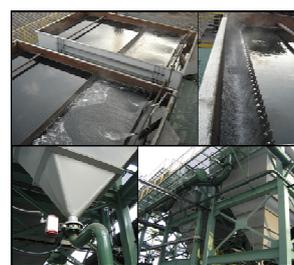
**Figura 6.** Tamiz rotativo.

La ceniza que se separa con el tamiz rotativo cae en el ducto de alimentación de la prensa desaguadora que la exprime hasta alcanzar un humedad del 65%. La ceniza después de prensada cae a una tolva desde donde se alimentan los volquetes que la llevaran a los canteros.



**Figura 7.** Prensa desaguadora.

Por otro lado, el agua que sale del tamiz rotativo todavía lleva consigo cenizas muy finas, esta agua pasa a las celdas de decantación donde con la inyección de floculante estas cenizas finas se precipitan hacia el fondo de las celdas. El resultado es cenizas acumuladas en el fondo de las celdas y en la parte superior de estas, rebalse de agua cristalina. Las celdas están equipadas con válvulas automáticas de purga de fondo para el retiro del lodo de ceniza acumulado.



**Figura 8.** Celdas de decantación.

El floculante que se inyecta en las celdas es preparado en una estación que esta equipada con sus respectivos tanques y bombas dosificadoras.

La ceniza descartada automáticamente mediante las purgas de fondo es llevada a un tanque de lodos desde donde se bombea nuevamente al tamiz rotativo. Esto hace que el sistema sea cerrado, puesto que no se descarta la ceniza mediante agua como en el anterior sistema.



**Figura 9.** Estación de floculante.



**Figura 10.** Tanque de lodos.

Con la finalidad de hacer completamente cerrado el sistema, todas las aguas con ceniza que caigan de los reboses de tanques o de limpiezas del sistema se recogen en un tanque de drenos desde donde se bombean nuevamente al tamiz rotativo.

El agua clarificada, es recolectada en el tanque de agua tratada para luego ser bombeada nuevamente hacia los sistemas de lavadores de gases de las calderas. En este tanque se hace la reposición de agua que se pierde por evaporación del proceso.



**Figura 11.** Tanque de agua tratada.

#### **4.2. Fabricación, montaje y puesta en marcha del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza**

La implementación del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza comienza con el desmontaje del antiguo sistema, el cual fue realizado por personal contratista. A la par de este desmontaje, se iniciaron los trabajos de obra civil.

**Obra civil.-** Esta inicia con el trazado en sitio de la ubicación de las construcciones civiles, este trazado es de gran ayuda para realizar las excavaciones. La obra civil del proyecto contempla la construcción de las bases civiles para el proyecto desde su etapa inicial

hasta sus futuras ampliaciones de capacidad. Para estos se dejara listo las bases para la construcción de 4 celdas de decantación, aunque el proyecto contempla solo la construcción de 2 celdas.

Una vez listo el trabajo de excavación y compactación, se inician los trabajos de armado de hierros y encofrado para las riostras y las bases. El trabajo crítico en el armado de las bases es la instalación de los pernos de anclaje, los cuales con la ayuda de una placa guía son colocados en su posición correcta.



**Figura 12.** Trabajos de excavación, compactación, armado de hierros y encofrado

La empresa Hormigones Hércules proveyó el hormigón para la fundición de toda la obra civil. Este hormigón fue solicitado con un valor de resistencia a la compresión de 280 Kg/cm<sup>2</sup>. Una vez culminada la fundición de las bases y riostras, se procedió al encofrado de los dados para su posterior fundición.

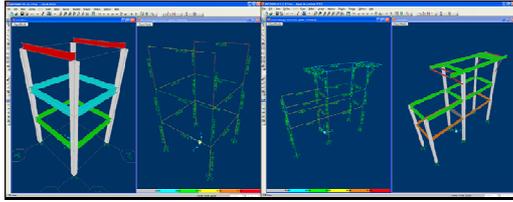


**Figura 13.** Trabajos de vaciado de hormigón.

**Estructuras metálicas.-** La fabricación de las estructuras metálicas están a cargo de otro grupo de contratistas, los cuales instalan las placas bases y las nivelan, en estas placas bases se soldaran las columnas metálicas que conformaran las estructuras.

Para la fabricación de las estructuras se realiza un análisis previo de esfuerzos y cargas en el software SAP 2000 versión 11, además se considera la ubicación sísmica de la obra. Con estos datos, el departamento de diseño estructural del ingenio San Carlos, emite un plano de construcción de las estructuras donde se especifica los materiales a utilizar, refuerzos, cartelas, soldaduras, etc.

En la figura a continuación se muestra la pantalla del software SAP 2000 versión 11.



**Figura 14.** Análisis de esfuerzos de las estructuras usando SAP 2000 versión 11.

Con la ayuda de una grúa se ubican las columnas sobre las placas ya niveladas en los dados de hormigón armado. Para verificar su verticalidad se utiliza un nivel de burbuja y se va aplicando cordones cortos de soldadura, una vez que estas estén perfectamente verticales se procede a soldarlas con cordón corrido a las placas. Para todos los procesos de soldadura de este proyecto se está considerando el código de soldadura AWS D1.1 de la sociedad americana de soldadura.



**Figura 15.** Construcción de estructuras

Una vez instaladas las columnas, se montan sus vigas de amarre y demás elementos que conforma las estructuras.

**Celdas de decantación.-** Para la construcción de estas celdas, la empresa Engenho Novo suministro toda la información referente al material, planos, detalles, construcción y montaje. Una vez construidas y montadas las celdas, se realizó una limpieza superficial para retirar cualquier resto de soldadura y se realizaron pruebas hidrostáticas para corregir fugas o fallas en las soldaduras.



**Figura 16.** Montaje de celdas de decantación.

Una vez montadas las celdas de decantación se procedió a instalar los pasillos de operación y las escaleras de acceso, todos estos con sus respectivos pasamanos. El diseño y forma de estos elementos fueron proporcionados por la ingeniería de Engenho Novo.

**Tamiz estático y rotativo.-** En la primera etapa del proyecto se reutilizó el tamiz estático del antiguo sistema el cual fue instalado en la estructura preparada para soportar al tamiz rotativo. Para la segunda etapa el tamiz rotativo fue adquirido y montado en reemplazo del tamiz estático. El tamiz rotativo fue adquirido con una capacidad para el manejo de 700 m<sup>3</sup>/h de agua con ceniza, su cesto interno está fabricado en acero inoxidable y conformado de 5 cuerpos con malla de diferente medida. Posee movimiento propio gracias a dos motoreductores y tiene sistema de limpieza automática.



**Figura 17.** Montaje de tamiz rotativo.

**Sistema de prensado, recolección y descarte de ceniza.-** Este sistema fue implementado en la 2da etapa del proyecto, puesto que en la 1era etapa la ceniza se descartaba empujada con agua hacia las piscinas de oxidación de la empresa. Luego la ceniza era recogida con la ayuda de palas mecánicas y depositadas en volquetes para ser llevada a los canteros. En la 2da etapa se construyó la estructura para soportar la prensa desaguadora y la tolva recolectora de ceniza.

La prensa desaguadora fue diseñada y construida por la empresa Engenho Novo, esta prensa hidráulica tiene una capacidad de 10 Tm/h de sólido húmedo y la capacidad de compresión del sistema hidráulico es de 10 toneladas. La humedad de la ceniza luego de ser prensada baja hasta un valor entre los 55 a 70%. Esta prensa posee un sistema de control automático que permite el ajuste del tiempo de recepción y prensado de la ceniza.



**Figura 18.** Instalación de prensa desaguadora.

La ceniza ya prensada es depositada en una tolva recolectora la cual se fabricó en acero ASTM A36 y cuyo diseño es propio de la ingeniería adquirida. Esta tolva posee una compuerta accionada por dos cilindros

neumáticos que permiten el descarte de la ceniza hacia los volquetes que la llevaran a los canteros.



**Figura 19.** Construcción y montaje de tolva recolectora de ceniza.

El sistema de recolección y descarte de ceniza es complementado por un ducto que direcciona la ceniza desde el tamiz rotativo hacia la prensa. Este ducto permite también el bypass de la prensa, pudiendo depositar ceniza húmeda directamente en la tolva. Esto hace que el sistema no pare en caso de mantenimiento de la prensa desaguadora.



**Figura 20.** Ducto de descarga de ceniza con bypass

**Tanques de floculante.-** Fueron construidos en acero ASTM A36 y poseen sistema de agitación por paleta. En estos tanques se prepara el floculante que será alimentado al sistema de clarificación.



**Figura 21.** Construcción de tanques de floculante.

**Tanque de recolección de lodos.-** Fabricado en acero ASTM A36. Este tanque permite que el circuito sea cerrado, es decir que los lodos que se descartan del proceso regresen al sistema de clarificación. Este tanque recoge el lodo decantado en las celdas y mediante sus 2 bombas de 90m<sup>3</sup>/h los devuelve al tamiz rotativo. Es posible también enviar hacia este tanque el agua extraída del prensado de la ceniza.

Este tanque tiene instalado un sensor de nivel que automáticamente arranca y controla la velocidad de operación de sus bombas.



**Figura 22.** Construcción de tanque de lodos.

**Tanque de drenos.-** Este tanque de hormigón se construyó junto con la obra civil. Sus principales alimentadores son los canales de drenaje del sistema, de aquí que su nivel está por debajo de estos canales. Regularmente el agua producto del prensado de la ceniza es direccionando hacia este tanque que está equipado con dos bombas centrífugas de 30m<sup>3</sup>/h. Estas bombas envían el agua con ceniza de los drenos y el agua producto del prensado hacia el tamiz rotativo para evitar pérdidas del sistema.



**Figura 23.** Montaje de bombas y tuberías de tanque de drenos.

**Tanque de agua tratada.-** Este tanque fue recuperado del antiguo sistema de clarificación, solo se modificó su altura para adaptarlo a los requerimientos del nuevo sistema.



**Figura 24.** Recuperación de agua tratada.

**Limpieza superficial y pintura.-** A todos los elementos fabricados para el nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza se le aplicó limpieza superficial según el estándar SSPC-5 que es limpieza con chorro abrasivo de arena o también conocido como sand blasting para luego aplicarles pintura fondo alquídica color gris claro en 25 micras. Una vez montado los equipos se realizó retoques respectivos de limpieza y pintura antes de aplicar su capa final de pintura.



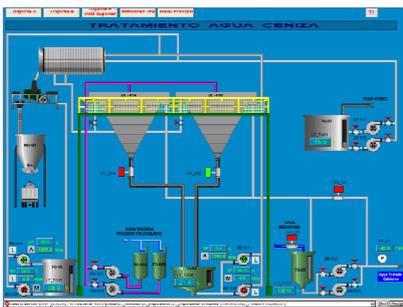
**Figura 25.** Sistema antes y después de pintura.

**Tuberías de interconexión.-** Comprende la instalación de las tuberías de alimentación hacia las celdas de decantación, tanque de lodos, drenos, dosificación de floculante, prensa desaguadora, succión y descarga de bombas, tuberías de agua de reposición, etc. Para la instalación de estas tuberías se siguió el procedimiento de soldadura según código AWS D1.1 (SAW/GMAV/SMAW).



**Figura 26.** Instalación de tubería de interconexión.

**Automatización del sistema.-** Involucra la automatización de las purgas de fondo de las celdas de decantación. El arranque automático y variación de velocidad de las bombas del tanque de lodos y del tanque de drenos. La reposición automática de agua limpia hacia el tanque de agua tratada dependiendo del nivel del mismo. Todos estos parámetros pueden ser variados, ajustados y visualizados en línea desde el supervisorio de operación gracias a su software de control. El operador bajo su criterio podrá variar estos parámetros para controlar el trabajo del sistema.



**Figura 27.** Pantalla de supervisión y control de parámetros.

Existen otros sistemas automáticos que no se gobiernan desde la pantalla de control sino que son parte de cada equipo, como es el caso del control de tiempos de alimentación y prensado de la prensa desaguadora y la limpieza del filtro rotativo.

Todos los parámetros de control automático son críticos, destacándose el de control de tiempos de purgas de las celdas de decantación que van a marcar

la diferencia en el tiempo de trabajo o saturación de las celdas.

**Puesta en marcha del sistema.-** Se inicia con el proceso de arranque para lo cual es necesario llenar las dos celdas de decantación por igual y al mismo nivel, para lo cual se abren sus dos válvulas para realizar el efecto de vasos comunicantes. Una vez llenas la celdas se ajusta los dientes vertederos de su descarga y se permite que se llene con agua limpia el tanque de agua tratada.

- Antes del arranque se debe preparar un tanque de polímero floculante y tenerlo listo para el proceso.
- Motores eléctricos probados y listos para arrancar. Válvulas de succión y descarga de las bombas en posición de apertura. Válvulas de purga de las celdas en posición de cerrado.
- El tamiz rotativo debe estar trabajando y con su válvula de recepción de agua con ceniza abierta.
- La prensa desaguadora debe estar bypassada para que la ceniza inicialmente pase directamente a la tolva recolectora de ceniza. Se debe haber seteado ya un tiempo de recepción y prensado que luego deberá ser ajustado.
- Debe haberse comprobado el correcto funcionamiento de la compuerta de la tolva receptora de ceniza y estar un volquete listo bajo la tolva para el desalojo de la ceniza.

Una vez que se hayan realizado todos estos procedimientos se da arranque al sistema de la siguiente forma:

- Se inicia el bombeo de agua hacia los lavadores de gases de las calderas poniendo en funcionamiento estos sistemas. El agua con ceniza se recoge en su tanque de recolección desde donde se bombea hacia el tamiza rotativo.
- En el tamiz rotativo se separa la ceniza más gruesa y pasa directamente a la tolva recolectora puesto que en la prensa esta aplicado su bypass. El agua con ceniza más fina que sale del tamiz rotativo alimenta a las celdas de decantación.
- Se inicia el proceso de bombeo de polímero floculante hacia las celdas.
- Se realiza el ajuste de apertura y cierre de las válvulas de purga de fondo de las celdas de decantación.
- La purga de fondo de las celdas se deposita en el tanque de lodos, cuando alcance nivel de operación se debe dar arranque a una de sus bombas, para luego pasarla a automático bajo su control de nivel.
- La reposición automática de agua limpia hacia el tanque de agua tratada debe estar

activada y alimentando a dicho tanque a pesar que en un sistema cerrado las reposiciones son mínimas.

- En este punto el nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza está operando a excepción de su prensa desaguadora que es el último equipo a poner en marcha. La ceniza húmeda está siendo descartada por los volquetes. Para poner en marcha la prensa desaguadora, se abre su válvula de descarga de agua con ceniza hacia el tanque de drenos. A continuación se da arranque a la prensa y se abre la compuerta del bypass permitiendo la alimentación de ceniza húmeda hacia su cámara de prensado. Se ajustan los tiempos de recepción-prensado observando el tamaño de la torta de ceniza y su humedad.
- Por último, una vez que el tanque de drenos alcance nivel de operación se arranca una de sus bombas, luego esta se pasa a modo automático para que el desalojo del agua sea continuo y con control de nivel del tanque.

Una vez realizado todos estos pasos, el nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza estará en operación.



Figura 28. Nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza en plena operación.

### 4.3. Costos del proyecto

A continuación se presenta una tabla resumen de los costos incurridos para el desarrollo de este proyecto.

Tabla 3. Resumen de costos del proyecto

RUBRO	PRESUPUESTADO	COSTO REAL
INGENIERIA	710,000.00	33,750.00
EQUIPOS PARA PROCESO		433,767.00
EQUIPOS CONTROL Y ELECTRICOS		37,802.81
PERFILERIAS, TUBERIAS, ACEROS		166,115.04
OBRA CIVIL		62,000.00
MANO DE OBRA		149,650.34
<b>TOTAL</b>	<b>710,000.00</b>	<b>883,085.19</b>

## 5. Análisis de resultados

Durante la zafra de 6 meses se realizan dos análisis de emisión de gases contratados por el ingenio San Carlos con uno de los laboratorios acreditados por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano (OAE). En la

página web de este organismo se puede encontrar los laboratorios autorizados para estos ensayos y observar el alcance de su acreditación.

Para el caso particular del ingenio San Carlos se contrató al laboratorio Abrus Cia. Ltda. Este laboratorio envía sus técnicos con equipos especializados para realizar el monitoreo de gases de combustión. Entre los parámetros que monitorean están:

- Velocidad
- Humedad
- Presión
- Temperatura
- Material particulado
- Oxígeno y Dióxido de Carbono
- Monóxido de Carbono
- Dióxido y Monóxido de Nitrógeno
- Dióxido de Azufre

El parámetro que se desea monitorear para nuestro caso es el material particulado, que es el valor que vamos a comparar antes y después de la implementación del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza.



Figura 29. Monitoreo de gases de combustión de las calderas

### 5.1. Resultados de emisión de gases en zafra 2009 y 2010

Durante la zafra 2009 se trabajó con el anterior sistema de tratamiento de agua con ceniza. Las calderas monitoreadas son la #2, #7 y #8 que son las que están equipadas con lavadores de gases y suplen la demanda de vapor de la planta. A continuación se muestra la tabla de resultados del monitoreo.

Tabla 4. Particulado de gases en zafra 2009

	CALDERA #2 (mg/m <sup>3</sup> )	CALDERA #7 (mg/m <sup>3</sup> )	CALDERA #8 (mg/m <sup>3</sup> )
SEPTIEMBRE 2009	195	472	1180
DICIEMBRE 2009	33	365	274

De los resultados de particulado del año 2009 se puede observar que la caldera #2 está dentro del rango permisible gracias a su innovador y eficiente sistema de lavador de gases. Para el caso de las calderas #7 y

#8, sus valores de particulado rebasan los límites permisibles sobre todo en la caldera #8 que tiene un dato sumamente elevado.

Para el año 2010 se implementa la 1era etapa del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza con lo que se consigue continuidad y mejor calidad de agua de alimentación a los lavadores de gases. A continuación se muestra la tabla de resultados de monitoreo de ese año.

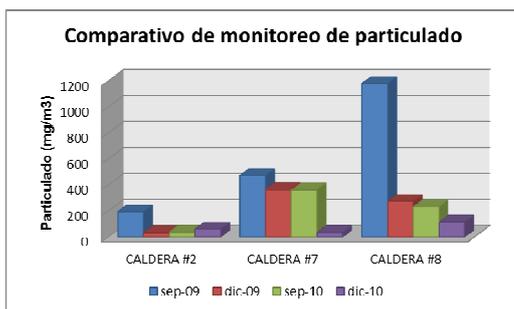
**Tabla 4.** Particulado de gases en zafra 2010

	CALDERA #2 (mg/m <sup>3</sup> )	CALDERA #7 (mg/m <sup>3</sup> )	CALDERA #8 (mg/m <sup>3</sup> )
SEPTIEMBRE 2010	36	364	233
DICIEMBRE 2010	59	35	114

En la caldera #2 los datos de particulado se mantienen sumamente bajos gracias a su sistema de lavado de gases. Para la caldera #7 y #8 el monitoreo del mes de septiembre del 2010 es inferior al mes de septiembre del 2009 volviéndose muy notorio para el caso de la caldera #8. Aun así, esos datos rebasan el límite permisible para fuentes existentes y nuevas que son 300 mg/m<sup>3</sup> y 150 mg/m<sup>3</sup> respectivamente. Esto se puede atribuir a los ajustes de parámetros y operación propios de un sistema nuevo. En el segundo monitoreo del mes de diciembre del 2010, se logra estar por debajo de los límites permisibles que establece el ministerio del ambiente.

## 5.2. Comparativo de resultados y análisis

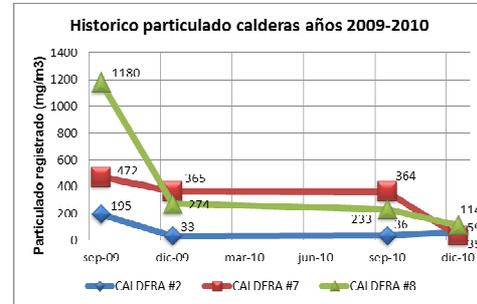
A continuación se presentan diagramas generados con los datos de particulados registrados en los monitoreos de los gases del año 2009 y 2010. El objetivo de estos diagramas es generar una representación gráfica de los datos de particulados que faciliten su observación y análisis.



**Figura 30.** Diagrama de comparativo de monitoreo de particulado

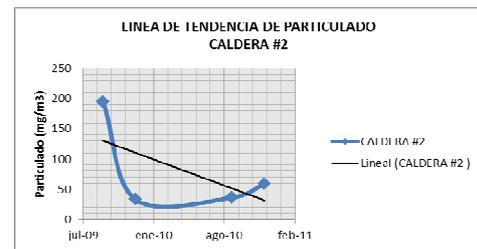
El diagrama de barras anterior permite visualizar claramente los decrementos en particulado que se han ido registrando en los monitoreos desde Septiembre del 2009 hasta Diciembre del 2010. Nótese que el decremento más notorio se ha producido en la caldera #8.

La figura a continuación muestra el histórico de particulado de las calderas, este permite comparar y observar el decremento de los particulados para cada caldera durante la zafra 2009 en la cual se trabajó con el antiguo sistema de clarificación de agua con ceniza, y durante la zafra 2010 que fue en la que se implementó el nuevo sistema.

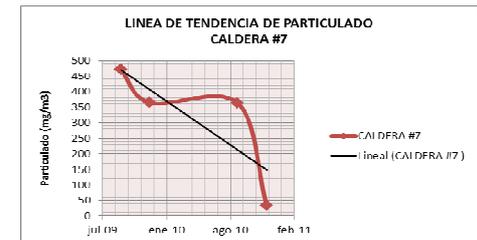


**Figura 31.** Histórico de particulado de calderas años 2009 - 2010

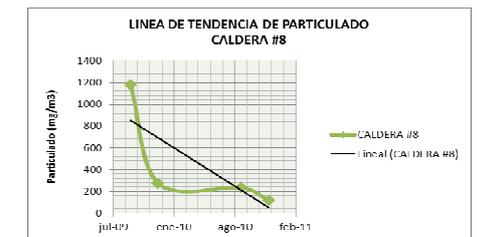
A continuación se presenta las líneas de tendencias de los datos de particulado registrados para cada caldera. Lógicamente, las líneas de tendencia son hacia la baja.



**Figura 32.** Línea de tendencia de particulado caldera #2



**Figura 33.** Línea de tendencia de particulado caldera #7



**Figura 33.** Línea de tendencia de particulado caldera #8

### 5.3. Operación de los lavadores de gases con el nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza

El nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza ha permitido que mejore notablemente la operación de los lavadores de gases de las calderas, no solo por la calidad del agua clarificada que regresa a los lavadores, sino por la continuidad en la alimentación de dicha agua.

Para el caso de la caldera #2, su principal problema era las continuas salidas de funcionamiento del sistema de clarificación de agua con cenizas lo que ocasionaba que su lavador de gases se obstruya, pierda su tiro inducido y la caldera deje de producir vapor. Nótese que en las gráficas de análisis de los datos de particulado, es en esta caldera donde se registraron los datos más bajos con el antiguo y nuevo sistema. El bajo particulado en los gases de esta caldera se atribuye a su moderno e innovador diseño de lavador de gases. En la zafra 2010 con la entrada a operación del nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza, el problema de obstrucciones se redujo a cero gracias a que el nuevo sistema nunca dejó de operar.

En la caldera #7 el funcionamiento de su lavador de gases no presentó problema alguno, aunque la medición inicial de particulado superó el rango permisible de 300 mg/m<sup>3</sup>. Para la segunda medición, y con una mejor operación del nuevo sistema, se logró el objetivo de bajar el particulado de sus gases a niveles permisibles.

El lavador de gases de la caldera #8 fue el que verdaderamente dejó notar la efectividad del nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza, puesto que su funcionamiento fue bastante estable y sus datos de particulado sufrieron una disminución considerable con respecto a la zafra anterior.

A continuación se presentan diagramas generados con los datos de particulados registrados en los monitoreos de los gases del año 2009 y 2010. El objetivo de estos diagramas es generar una representación gráfica de los datos de particulados que faciliten su observación y análisis.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1. Conclusiones

- La implementación del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza ha permitido cumplir a cabalidad con las exigencias del ministerio de ambiente con respecto a las emisiones de gases de las chimeneas de las calderas, con lo que se ha cumplido con el objetivo trazado al inicio del proyecto.

- El nuevo sistema permite una mayor flexibilidad operacional gracias a que cada celda de decantación opera totalmente independiente de las demás, lo que permite su mantenimiento sin la pérdida de continuidad de la operación del sistema de tratamiento de agua con ceniza y de la alimentación de agua limpia hacia los lavadores de gases.
- El agua recuperada por el sistema de tratamiento es compatible con las exigencias de los equipos lavadores de gases, evitando así el taponamiento, desgaste de las boquillas, equipos y tuberías lo que se traduce en mayor eficiencia de los sistemas de captación de ceniza de los gases de las calderas.
- El diseño del nuevo sistema de tratamiento de agua con ceniza permite el by pass de todos los equipos que lo conforman, con la finalidad de que cualquiera de ellos pueda salir a mantenimiento sin ocasionar la interrupción del proceso de clarificación y de suministro de agua hacia los lavadores de gases. Por otro lado, en cada estación de bombeo de agua o lodos existen equipos en stand by listos para entrar en operación.
- Los datos históricos registrados en las pruebas de emisiones de gases de las calderas reflejan un decremento considerable de material particulado emitido, con lo que se reafirma la efectividad del nuevo sistema de tratamiento de agua. En la zafra 2011 los promedios de emisión de particulado para la caldera #2 fue de 41,8 mg/m<sup>3</sup>, para la caldera #7 fue de 31,6 mg/m<sup>3</sup> y en la caldera #8 fue de 69,1 mg/m<sup>3</sup>, estas mediciones están muy por debajo del rango permitido que es de 300 mg/m<sup>3</sup> para fuentes existentes y de 150 mg/m<sup>3</sup> para fuentes nuevas (caldera #8).

### 6.2. Recomendaciones

- La limpieza y mantenimiento de los equipos es primordial para el correcto desempeño del nuevo sistema de clarificación de agua con ceniza, por lo que se recomienda una revisión del sistema por cada guardia de 8 horas por parte del personal de operación.
- Se debe monitorear la cantidad de ceniza decantada en las celdas, ya que a pesar de sus purgas continuas, la ceniza se ira acumulando restando efectividad en la clarificación del agua. Para esto se debe utilizar un tubo plástico que hace las veces de una regla que ayudara a determinar la altura de ceniza en la celda. Cuando la cantidad de ceniza es demasiado elevada, se deberá proceder a su liquidación y enjuague
- La velocidad de las bombas de alimentación de agua con ceniza al sistema deben poder regularse, esto evitara que excesiva cantidad de agua con

ceniza llegue al colador rotativo y esta pase a la prensa desaguadora incrementando la humedad de la ceniza prensada. Para esto se recomienda la instalación de variadores de velocidad para los motores eléctricos de las bombas.

## **7. Agradecimientos**

A los directivos de la Fábrica del Ingenio San Carlos: ing. Diego Varela (jefe de proyectos), ing. Manuel Aguilar (superintendente de fábrica) e ing. Amalio Puga (jefe de calidad) por su colaboración invaluable en el desarrollo de este tema de tesis.

## **8. Referencias**

- [1] E. Hugot, *Manual para Ingenieros Azucareros*, Cia. Editorial Continental. S. A. de C. V., México. Primera Edición en Español.
- [2] Eugene A. Avallone, *Manual del Ingeniero Mecánico*, Mc Graw-Hill / Interamericana de México, S.A. de C.V, Tercera Edición en Español, México 1995, Tomo 1.
- [3] Claudio M. Vaz, Sergio M. Stamile Soares, José Oswaldo da Silva, *Sistema para tratamiento de agua de ceniza para lavado de gases de calderas*, ENGENHO NOVO Tecnología Ltda. – TecEN Comercial Ltda. Disponible en: [www.engenovo.com.br](http://www.engenovo.com.br)