

Diseño de un Sistema de Extracción Localizada de Humos Metálicos y Gases Provenientes del Proceso de Soldadura

Henry Carrillo A. ⁽¹⁾, Manuel Helguero G. ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ⁽¹⁾

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) ⁽¹⁾

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador ⁽¹⁾

henrycarrilloalvarez@yahoo.com⁽¹⁾

Ing. Mecánico ⁽¹⁾, Ing. Mecánico ⁽²⁾, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ⁽²⁾, mhelguero@rack-plus.com ⁽²⁾

Resumen

Este Sistema de Extracción Localizada captura partículas de hasta 3µm de tamaño de humos metálicos y gases, que ocasionan enfermedades profesionales y contaminación ambiental. Este diseño trata de ajustarse a condiciones locales para solucionar una necesidad, actual y futura, de un Taller de Soldadura. Se plantean los principales objetivos, y se determinan los Problemas que se desean eliminar haciendo énfasis en los Límites Permisibles (TLV's) de los agentes químicos nocivos que puede soportar el ser humano. También se expresan extractos de la Norma Ambiental vigente en nuestro país para considerar el control de la contaminación atmosférica. Además se detalla los fundamentos técnicos para el control de partículas, los Subsistemas y equipos necesarios para el Proceso. Se diseña y selecciona los componentes necesarios (Campanas de Aspiración, Conductos, Ciclón, Filtro de Mangas, Precipitador electrostático, Ventiladores, Lavador Venturi y Chimenea) verificando técnicamente su eficiencia y aceptabilidad. Finalmente se realiza un estudio económico para constatar la rentabilidad del diseño, siguiendo los lineamientos del Manual de la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Para proporcionar las conclusiones y recomendaciones necesarias, dejando la apertura para su mejora continua.

Palabra claves: Sistema de Extracción Localizada, humos metálicos, gases, procesos de soldadura, enfermedades profesionales, contaminación ambiental, Límites Permisibles (TLV's), control, análisis, diseño, selección, equipos, componentes, sistemas, Agencia de Protección Ambiental (EPA)(Environmental Protection Agency), rentabilidad.

Abstract

This local exhaust system captures particles down to size 3µm metal fumes and gases, which cause diseases and environmental pollution. This design tries to adjust to local conditions to solve a need, present and future, of a welding shop. Posed the main objectives, and identifies the problems you want to remove emphasizing allowable limits (TLV's) (Thresold Limite Value), of harmful chemicals that can support humans. Extracts are also expressed in the environmental standards in our country to consider the control of air pollution. It also details the technical basis for particulate control, subsystems and equipment needed for the process. We design and select the necessary components (Suction Hoods, Ducts, Cyclone, Bag Filter, Electrostatic Precipitator, Fans, Venturi and Chimney) verifying its efficiency and technical acceptability. Finally, an economic study to ascertain the profitability of the design, following the guidelines of the Manual of the Environmental Protection Agency (EPA). To provide the necessary conclusions and recommendations, leaving the opening for continuous improvement.

Key words: Local Exhaust System, metal fumes, gases, welding processes, diseases, environmental pollution, Thresold Limit Value (TLV's), control, analysis, design, selection, equipment, components, systems, Environmental Protection Agency (EPA), profitability.

1. Introducción

En la actualidad, las empresas están obligadas a cumplir con las legislaciones y normativas vigentes con respecto a la Seguridad, Higiene, Salud

Ocupacional y Medio Ambiente, en todo su proceso productivo. Según dichas reglas, y los entes controladores de normas a nivel industrial como la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) a nivel mundial y la Norma de

Calidad del Aire Ambiente (Libro VI Anexo 4) a nivel nacional, se debe tener un límite máximo permisible (TLV) de contaminantes en el aire para su cumplimiento.

El objetivo de esta tesis es presentar el diseño ingenieril de un sistema de extracción localizada para humos y gases provenientes del proceso de Soldadura que brindará una solución real, disminuyendo la contaminación ambiental y evitando que se originen enfermedades profesionales a las personas que se involucran en este tipo de labores.

El Sistema General tendrá la particularidad de retener en el proceso partículas de hasta $0.3 \mu m$ provenientes de los humos y gases de Procesos de Soldadura, útil para evitar las enfermedades profesionales al personal que realiza éstas tareas.

El Sistema constará con un Ventilador Principal de 90 KW a 2200 rpm con un caudal $Q_{ramal_2} = 50544 \text{ m}^3/\text{h}$ para extraer partículas en el Ramal 2 y de un Ventilador Auxiliar de 18.5 KW a 3150 rpm con un caudal de $Q_{ramal_1} = 5760 \text{ m}^3/\text{h}$ para extraer partículas en el Ramal 1.

Quedan fuera del alcance de la presente tesis el diseño de la instalación eléctrica y del sistema de control de los equipos y subsistemas, sin embargo se deja libre la opción de mejorar el diseño mediante otros diseños adaptativos que puedan contribuir a su mejoramiento tecnológico y funcional.

2. Objetivos del Sistema

Dentro de los riesgos que pueden producir accidentes y a los que están expuestas las personas que trabajan en ambientes en donde se involucra trabajos de Soldadura tenemos: físicos mecánicos (cortes, caídas, quemaduras, proyecciones), físicos no mecánicos (radiación no ionizante), químicos (humos metálicos y gases). El presente trabajo sólo se limita al control de éstos últimos de acuerdo a las normativas nacionales, internacionales y mediante la aplicación de soluciones ingenieriles técnicamente adecuadas.

Si bien es cierto que la seguridad tiene importancia relevante, el cuidado al medio ambiente también lo es, debido a que es necesario para la normal interacción con todos los seres vivos en un hábitad determinado.

Por lo tanto, los principales Objetivos que abarca el presente trabajo para beneficio del Sistema, promulgando la acción preventiva son:

- ✓ Combatir los riesgos y control de la contaminación en su origen, mediante la Extracción Localizada e Ingeniería.
- ✓ Adaptar y mejorar los puestos de trabajo de

las personas.

- ✓ Desarrollo de la Protección Colectiva.
- ✓ Cumplir con la Normativa y Legislación vigente.

3. Determinación de Problemas a eliminar.

En la Industria mundial existen multitud de procesos laborales que causan contaminación, en los que se involucra como principales agentes a: Polvos, Humos, Gases y Vapores.

Los humos y gases provenientes de los procesos de soldadura son químicamente muy complejos, su composición y cantidad dependen del material de aporte, del metal base, proceso de soldadura, nivel de corriente y otros factores del proceso. Éstos constituyen una amenaza para la seguridad y salud de los trabajadores, sino se cuenta con la adecuada protección.

Los Humos son partículas sólidas originadas por los materiales consumibles de soldadura, por el metal base, y los recubrimientos presentes. Los Gases son producidos durante el proceso de soldadura o por el proceso de radiación que se crea a los alrededores. Pueden crearse en grandes cantidades cuando se aplica el corte por plasma o altos amperajes de metales muy reflectivos como el aluminio y el acero inoxidable.

Un solo soldador produce entre 20 g y 40 g de polvos metálico por hora, (proveniente de los humos metálicos y gases de soldadura), es decir que por año produciría aproximadamente entre:

$$20 \frac{\text{g}}{\text{h}} \times \frac{8 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \times \frac{12 \text{ mes}}{1 \text{ año}} = 38.4 \frac{\text{Kg}}{\text{año}} ; \text{ y}$$

$$40 \frac{\text{g}}{\text{h}} \times \frac{8 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{20 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \times \frac{12 \text{ mes}}{1 \text{ año}} = 76.8 \frac{\text{Kg}}{\text{año}}$$

La *Figura 1* muestra el resultado de polvos metálicos obtenidos después de dos semanas de soldar.

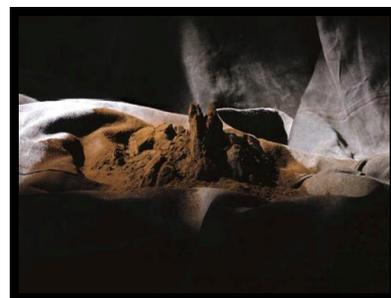


Figura 1. Polvo Metálico de Soldadura. [1]

En el sector industrial de la metalmecánica, es alta la exposición de soldadores y operadores a los humos y gases de soldadura, como se muestra en la *Figura 2*, en consecuencia es necesario reducirla, porque los

están expuestos a partículas nocivas como: Cromo, Manganeso, Níquel, Óxidos de Hierro, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno, Ozono, Fluoruros, entre otros; cuyos efectos nocivos van desde irritaciones tracto respiratorias y de ojos, reacciones alérgicas, fiebre de los humos metálicos, dolores de cabeza, mareos y otras complicaciones que pueden ocurrir inmediatamente hasta enfermedades crónicas a lo largo del tiempo como: bronquitis, asma, siderosis y algún tipo de cáncer. [2]



Figura 2. Formación de Humos Metálicos y Gases por procesos de Soldadura al Arco.

El tamaño de la partícula del humo de soldadura es una variable importante a considerar, porque éste determina el grado de penetración o retención en el sistema respiratorio humano. Si bien es cierto que el tamaño varía según el proceso, estudios han determinado que en promedio una partícula de $0.3 \mu\text{m}$ es suficiente para penetrar en el Sistema Respiratorio. [2]

El Manganeso provoca daños en el sistema Nervioso Central y enfermedades Neuropsiquiátricas, así mismo el cromo Hexavalente (Cr VI), es un reconocido agente peligroso y causa cáncer, úlceras en el tabique nasal, dermatitis y problemas de Fertilidad. Cabe indicar que estos son los contaminantes que la ventilación general no consigue captar. [1]

El polvo metálico inhalado visible de tamaño mayor a $10 \mu\text{m}$ es retenido en la nariz y la garganta, el de tamaño entre 1 y $10 \mu\text{m}$ alcanza los bronquios y las partículas menores a $1 \mu\text{m}$ (Cromo, Manganeso y Níquel) alcanzan los pulmones, esto significa que el 99% de partículas finas llegan al pulmón. La *Figura 3*, indica una escala comparativa del tamaño de partícula en el aire.

Los datos específicos de las emisiones de los contaminantes, producidos por varios procesos de soldadura son provistos por los Fabricantes en las MSDS (Material Safety Data Sheets) (Hojas de Datos de seguridad).

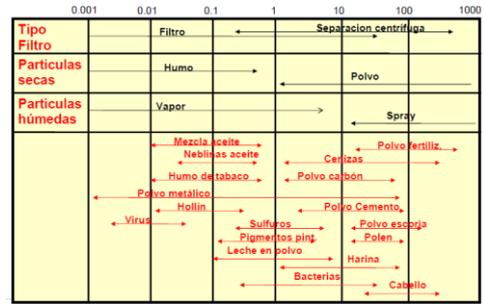


Figura 3. Tamaño de Partículas en el aire en micras.

4. Diseño de los Componentes del Proceso.

Los humos y gases potencialmente peligrosos que tenemos que controlar de acuerdo a los límites permisibles de dichos componentes, se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Límites Permisibles de humos y Gases de Soldadura.

COMPUESTOS	TWA (8h)	OLOR UMBRAL	TÍPICAS CONCENTRACIONES EXPULSADAS	LEGISLACION AMBIENTAL ECUADOR	
	mg/m3	mg/m3	mg/m3	mg/m3	
GASES	CO	55	0	3	
	HF	2	2.7		
	NO2	9	0	0.2 - 1	400 - 500
	NO	30	51	0.01	400 - 500
	O3	2	0.2	0.04	
HUMOS		HUMOS DE SOLDADURA (mg/m3)		PARTICULAS ARCO ELECTRICO	
	Cr(IV)	0.05	5	230 - 350	
	Cd	0.05			
	Zn				
	Cu	0.2			
	Ni	0.1			
	Pb				
	Co				
Mn	0.2				
MATERIAL PARTICULADO		µg/m3	POLVO RESPIRABLE (mg/m3)	µg/m3 (24h)	
	PM 2.5	40	5	65	
	PM 10	75		150	

• La *Tabla 2* muestra las cantidades generadas de Humos metálicos de soldadura provenientes de los electrodos de procesos que se utilizan en el Taller de Soldadura (SMAW, GMAW, FCAW), dichas cantidades son recopiladas y estimadas de la norma AWS F3.2M/F3.2:2001 Ventilation Guide for Weld Fume, considerando que los soldadores producen dichos humos en 6 horas de la jornada laboral, de tal manera que para el proceso SMAW con electrodo E6011 de 3.2 mm de diámetro, por ejemplo, a una tasa de generación de humo de 0.45 g/min al año se tendría:

$$0.45 \frac{\text{g}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{6 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{24 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \times \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} = 46.66 \text{ Kg/año}$$

La temperatura para evitar el estrés térmico será de 28°C. Según mediciones realizadas la temperatura máxima de los gases y humos en la campana extractora es de 125°C (la temperatura promedio es de 36.5 °C). A esta temperatura se puede transportar los gases y humos a través de los ductos hacia el sistema de filtración sin problemas.

Tabla 2. Límites Permisibles de humos y Gases de Soldadura.

DATOS DE GENERACIÓN DE HUMOS					
PROCESO Y CLASE DE MATERIAL DE APORTE	TASA DE GENERACIÓN DE HUMO (g/min)	PESO CONVERTIDO A HUMO (%)	GENERACIÓN DE HUMO MENSUAL (Kg/mes)	GENERACIÓN DE HUMO ANUAL (Kg/año)	HUMO GENERADO POR CANTIDAD DE ELECTRODO CONSUMIDO (Kg/100Kg electrodo)
SMAW (E6018)	0.4	1.55	3.46	41.47	1.57
SMAW (E6011)	0.45	1.1	3.89	46.66	3.84
SMAW (E7024)	0.65	1	5.62	67.39	2.05
SMAW (E3XX-16)	0.1	0.35	0.86	10.37	0.54
FCAW(E3XXT1-1)	0.45	0.55	3.89	46.66	0.87
FCAW(E70-T5)	0.75	1.9	6.48	77.76	1.2
FCAW(E71T-1)	0.45	0.55	3.89	46.66	1.2
ALAMBRE SÓLIDO (E70S-6)	0.45	0.5	3.89	46.66	0.79
TOTAL	3.7	7.5	31.97	383.62	12.06

Es muy difícil establecer una densidad para los polvos metálicos que se generan por la variedad de materiales y compuestos que se generan, por lo que tomaremos en consideración el resultado de análisis granulométrico de una acería local, en cuya muestra de polvo metálico analizada se tuvo una densidad de 530 Kg/m³, concentraciones PM₁₀ = 46 µg/m³ y PM_{2.5} = 56 µg/m³; ya que en cierto modo en el proceso de corte y soldadura se llega a las temperaturas de fusión del acero de 1530 °C.

Las *campanas de extracción* estarán en tres puntos del Taller de Soldadura: El lugar donde se encuentra ubicada la máquina de Corte por Plasma SHADOW DX ESAB, y en los sectores en donde se realizan trabajos varios de soldadura.

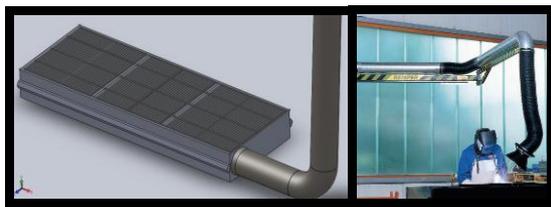


Figura 4. Campanas de Extracción

La *Figura 4*, muestra las campanas de extracción que se utilizarán en el Sistema de Extracción, según los diseños realizados con caudales de 12.44 m³/s (44784 m³/h) y 0.20 m³/s (720 m³/h) para la mesa de Corte de metales y para los procesos de soldadura, respectivamente.

Mientras más se asegure la sustentación de los sólidos, menores probabilidades habrá para la precipitación de los mismos y por ende la posibilidad

de taponamientos. Para determinar una adecuada velocidad de sustentación del sistema, esta será de 23 m/s. Se procede a diseñar los *ductos* con el método de velocidad constante, balanceando presiones y recalculando los flujos, se muestran los resultados en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Diámetro de Ductos.

TRAMOS	CAUDAL Q(m ³ /h)	CAUDAL Q(m ³ /s)	ÁREA A(m ²)	DIÁMETRO d _{ducto} (mm)	LONGITUD (mm)	TOTAL (mm)	PROCESO		
1 A	720	0.2	0.0087	105	15500	75420	SOLDADURA (Ramal 1)		
2 B	1440	0.4	0.0174	149					
3 C	2160	0.6	0.0261	182					
4 D	2880	0.8	0.0348	210					
5 E	3600	1	0.0435	235	15000			24000	CORTE (Ramal 2)
6 F	4320	1.2	0.0522	258					
7 G	5040	1.4	0.0609	278	27320				
8 H	5760	1.6	0.0696	298					
9 I - J - K	44784	12.44	0.5409	830	7000				
10 P-Q-R-S	50544	14.04	0.6104	882	17000				

Se procede también a calcular las pérdidas de energía por Ramal y cuyos resultados se muestran en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Pérdidas de energía por Ramal.

PROCESO	ELEMENTO	CANTIDAD	PRESIÓN DINÁMICA VP	PÉRDIDAS he	PÉRDIDAS he mm c.d. H ₂ O	TOTAL h _r mm c.d. H ₂ O
SOLDADURA	CAMPANA	8	32.52 mm c.d. H ₂ O	0.08 VP	20.8	500.1
	CODO 90° R=1.5D	2		0.39 VP	25.4	
	CODO 45°	2		2.5 VP	162.6	
	CONEXION Y 60°	8		0.44 VP	114.4	
	LONG. RAMAL 1 (m)	Ver Tabla 7		Ver Tabla 7	176.9	
CORTE PLASMA	CAMPANA	1	32.52 mm c.d. H ₂ O	0.08 VP	2.6	156
	CODO 90° R=1.25D	7		0.55 VP	125.2	
	CONEXION Y 60°	1		0.44 VP	14.3	
	SALIDA CHIMENEA	1		0.10 VP	3.3	
	LONG. RAMAL 2 (m)	Ver Tabla 7		Ver Tabla 7	10.6	

Sumando estas pérdidas a la presión dinámica o cabezal dinámico, se obtiene el valor de la presión estática o cabezal estático que se genera a lo largo de los dos ramales, con la ecuación (1).

$$SP = VP + h_r \quad (1)$$

$$SP = VP + h_{r_{ramal1}} = 32.52 + 500.1 = 532.62 \text{ mm c.d. H}_2\text{O}$$

$$SP = VP + h_{r_{ramal2}} = 32.52 + 156 = 188.52 \text{ mm c.d. H}_2\text{O}$$

Para tuberías metálicas rectas con presiones internas, la siguiente ecuación (2) sirve para calcular el espesor mínimo requerido y es aplicable para razones de diámetros/espesores superiores a seis. [3]

$$t_m = \frac{PD_0}{2(SE + PY)} + C \quad (2)$$

Para determinar la presión de diseño se considera la presión interna a la cual está sometida la tubería más 10% como factor de seguridad. Por lo tanto la presión de diseño se calculara con la ecuación (3).

$$P = SP + 0.1SP = 1.1SP \quad (3)$$

De manera que, para el Ramal 1 tenemos: $P = 5.74$ KPa y Para el Ramal 2 tenemos: $P = 2.03$ KPa. Los ductos serán construidos de acero de Buena resistencia mecánica, Buena soldabilidad y de fácil adquisición como el ASTM A36. De tal manera que $S = 36$ Ksi ≈ 248 MPa; $E=0.85$ (Tubería soldada por Resistencia eléctrica); $Y=0.4$ (Tabla 304.1.1 de la Norma ASME B 31.3 – 2002 Process Piping).

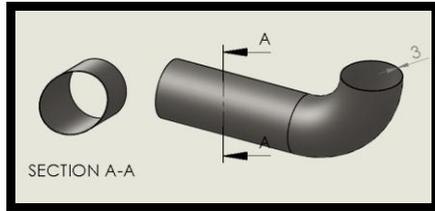


Figura 5. Espesor de Ductos

En consecuencia los ductos deberán ser de un espesor mayor a 1.27 mm. Escogemos entonces un espesor de 3 mm (Ver *Figura 5*).

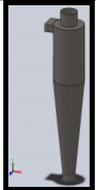
Los *ciclones* se diseñan con semejanza geométrica de modo que la relación de sus dimensiones permanecen constantes para diferentes diámetros. El valor de dichas relaciones indica si el ciclón es de tipo convencional, de elevada eficacia o de alto rendimiento. La eficacia de los ciclones depende fuertemente del tamaño de partícula, incrementándose a medida que aumenta el tamaño de partícula.

Se puede determinar la eficacia, según el modelo de Rossin, Rammler e Intelmann, asumiendo flujo laminar para las partículas que son capturadas, y sustituyendo en la velocidad de sedimentación de Stokes el efecto de la aceleración gravitacional por la centrífuga, para su cálculo usaremos la ecuación (4).

$$\eta = \frac{\pi \times N_e \times \rho_{HM} \times d_p^2 \times V_g}{9 \times \mu_g \times W_i} \quad (4)$$

Tabla 5. Resultados de Parámetros del Ciclón.

PARÁMETROS DEL CICLÓN			
H_2 (m)	2.5	N_e	5.5
H_1 (m)	1.5	ρ_p (Kg/m ³)	530
H (m)	0.5	d_p (m)	0.00001
W_i (m)	0.2	V_g (m/s)	24.7
D_e (m)	0.5	μ (Ns/m ²)	0.000018
D_d (m)	0.375	η (%)	69.81
S (m)	0.5	CICLÓN DE ALTA EFICACIA	
D_o (m)	1		



Los resultados de la aplicación de las ecuaciones se muestran en la *Tabla 5*, y cuya eficiencia del 69.81% nos indica que cumple con el rango de un ciclón de alta eficacia.

Para diseñar los sistemas de filtros nos hemos basado en referencias técnicas obtenidas para este tipo de proceso, según AWS F3.2M/F 3.2:2001 Ventilation Guide for Weld Fume. De tal manera que el sistema de *filtros de mangas* es uno de los más recomendables para colectar partículas de este tipo.

Entre los factores que se deben tener en cuenta en el diseño de este sistema y en su vida útil, destacamos: el modo de limpieza, la resistencia a las altas temperaturas y la admisión o velocidad de filtración. La limpieza por chorro de aire es muy efectiva y no deteriora las mangas ni el sistema por excesivos movimientos o vibraciones. En cuanto a las altas temperaturas se debe considerar que el material de las mangas es inflamable y muchas de ellas no resisten temperaturas que sobrepasen los 120°C o 140°C. [4]

La *Tabla 6*, muestra las Especificaciones técnicas del Filtro de Mangas diseñado.

Tabla 6. Especificaciones Técnicas del Filtro de Mangas.

PARÁMETROS	
Área de Filtrado	345.2 m ²
Longitud de Mangas	4 m
Número de cámaras	2
Número de mangas	138
Diámetro de las mangas	0.20 m
Caudal del gas	50544 m ³ /h
Temperatura del gas	< 125 °C
Temperatura máxima	140 °C
Tiempo entre pulsos	3 min
Tipo de Fibra	PTFE (Teflón)
Vida útil	14 meses
Sistema de Limpieza	Pulse Jet
Presión de Limpieza	80 Psi

La pérdida de presión en los *Lavadores Venturi* es muy superior a la de otro tipo de equipos de depuración. Se han desarrollado diferentes ecuaciones para la determinación de la pérdida de presión en estos equipos. Calvert propuso un método, basado en la suposición de que toda la energía que pierde la corriente de gas en la garganta del venturi se utiliza para acelerar las gotas del líquido hasta la velocidad del gas.

Para calcular la pérdida de presión usaremos las ecuaciones 5, 6 y 7.

$$\Delta P = 1.013 \times 10^{-3} \times V_g^2 \left(\frac{Q_l}{Q_g} \right) \quad (5)$$

$$Q_G = CEY_e A_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_g}} \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\frac{Q_G}{CEY_e A_d} \right)^2 \times \frac{\rho_g}{2} \quad (7)$$

Resolviendo las ecuaciones tendremos los siguientes resultados.

$$\Delta P = 1926.16 Pa = 19.64 \text{ cmc.d.H}_2\text{O}$$

$$Q_L = 7.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = 0.72 \text{ l/s}$$

$$Q_L = 7.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \times 1000 \text{ l} / \text{m}^3 = 0.72 \text{ l/s} = 12 \text{ GPM}$$

Se muestra el Lavador Venturi en la Figura 5.

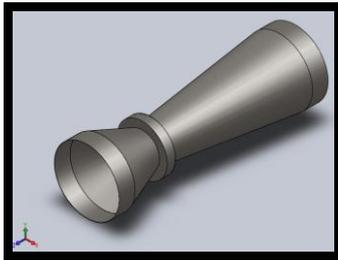


Figura 5. Lavador Venturi

Considerando que la altura de la nave industrial es de 12.500 mm y en base a la relación de alturas recomendada para la chimenea se calcula la altura efectiva de la chimenea para que los gases no desciendan rápidamente y retornen a la nave:

$$h_s = 12500 \times 1.5 = 18750 \text{ mm} = 18.75 \text{ m}$$

$$Q_{\text{sistema}} = Q_{\text{ramal1}} + Q_{\text{ramal2}}$$

$$Q_{\text{sistema}} = 5760 \text{ m}^3/\text{h} + 44784 \text{ m}^3/\text{h} = 50544 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidad del Viento } v_v : 6 - 7.3 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad del Viento } v_v \text{ Extrema: } 25 \text{ m/s}$$

Para calcular el diámetro (usando las ecuaciones 8 y 9) de la chimenea se debe considerar el flujo máximo que evacuan los ventiladores.

$$A = \frac{Q_{\text{sistema}}}{3600 v_v} \quad (8)$$

$$A = \frac{50544 \text{ m}^3 / \text{h}}{3600 \times 25 \text{ m/s}} = 0.562 \text{ m}^2$$

$$d_{\text{ducto}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (9)$$

$$d_{\text{ducto}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.562 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.85 \text{ m}$$

De acuerdo a las recomendaciones de las normas ASME, se considera un desgaste de 5mpy (milésimas de pulgada por año) y si se establece una vida útil de 15 años, escogemos entonces un espesor de plancha de 3 mm.

5. Selección de los Equipos adicionales.

Los *precipitadores electrostáticos* operan para alcanzar una elevada eficacia de recolección. Se han propuesto la ecuación semiempírica (10), basada en la ecuación de Deutsch. [4]

$$\eta = 1 - \exp \left[- \left(\omega \frac{A_{re}}{Q_{gas}} \right)^{k_z} \right] \quad (10)$$

Los valores típicos de SCA (Superficie Colectora Específica) están en el intervalo 40-160 m²/(Nm³/s) (200-800 ft²/1000scfm). La SCA se expresa en diferentes unidades. Con una velocidad de migración de 6.6 cm/s (ver Figura 6)

$$\eta = 1 - \exp \left[- \left(0.066 \text{ m/s} \times 78.8 \text{ s/m} \right)^{0.6} \right]$$

$$\eta = 1 - \exp [-2.689]$$

$$\eta = 1 - 0.067 = 0.93 = 93\%$$

Aplicación		Velocidad de migración (cm/s)			
		Eficacia de diseño (%)			
		95	99	99.5	99.9
Cenizas volantes de carbón bituminoso	no CI	12.6	10.1	9.3	8.2
	CI	3.1	2.5	2.4	2.1
Otras cenizas volantes de carbón	no CI	9.7	7.9	7.9	7.2
	CI	2.9	2.2	2.1	1.9
Papel Kraft. Caldera de recuperación	no CI	2.6	2.5	3.1	2.9
Cemento	no CI	1.5	1.5	1.8	1.8
	CI	0.6	0.6	0.5	0.5
Vidrio	no CI	1.6	1.6	1.5	1.5
	CI	0.5	0.5	0.5	0.5
Hierro/acero	no CI	6.8	6.2	6.6	6.3
	CI	2.2	1.8	1.8	1.7
Ceniza volante de incinerador	no CI	15.3	11.4	10.6	9.42
Hornos de reverberación de cobre	no CI	6.2	4.2	3.7	2.9

CI: corona invertida
De EPA OAQPS Control Cost Manual, 1996.

Figura 6. Eficacia y Velocidad de Migración [5]

De tal manera que resolviendo la ecuación 10, tendríamos una eficacia del 93%, suficiente para nuestro propósito.

Para determinar el tipo de *ventiladores* que cumplan las necesidades del sistema, se hace un análisis de sus características, luego se selecciona a partir de catálogos técnicos el tipo o modelo que mejor cumpla con los requerimientos. Las características del sistema son las que se detallan a continuación.

Caudal de Sistema:

$$Q_{\text{ramal1}} = 5760 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Procesos de Soldadura)}$$

$$Q_{\text{ramal2}} = 44784 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Procesos de Corte)}$$

$$Q_{\text{sistema}} = Q_{\text{ramal1}} + Q_{\text{ramal2}}$$

$$Q_{\text{sistema}} = 5760 \text{ m}^3/\text{h} + 44784 \text{ m}^3/\text{h} = 50544 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Temperatura máxima de Operación: } 120^\circ \text{ C}$$

Para el Ramal 1, $SP_{\text{ramal1}} = 532.62 \text{ mmc.d.H}_2\text{O}$ (5223 Pa) con caudal $Q_{\text{ramal1}} = 5760 \text{ m}^3/\text{h}$, seleccionamos el ventilador MZRU 560 3150RPM Casals Ventilación S.L. cuya curva característica y puntos de diseño y

servicio se muestran la *Figura 7* y *Tabla 7*, respectivamente.

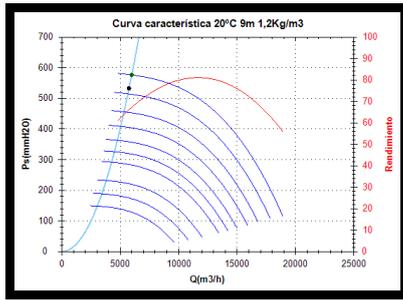


Figura 7. Curva Característica del Ventilador 1

Tabla 7. Parámetros de Funcionamiento Ventilador 1.

PUNTO DE DISEÑO	
Q (m³/h)	5760
Ps (mmH₂O)	532.62
PUNTO DE SERVICIO	
Turbina rpm	3150
Temp. máxima (°C)	300
Q (m³/h)	5990.78
Ps (mmH₂O)	576.16
Pd (mmH₂O)	8.77
Pt (mmH₂O)	584.93
Vel. imp. (m/s)	11.98
Rend. (%)	67.31
Pot. Absorbida(KW)	14.20
Pot. Recomend. (KW)	18.50

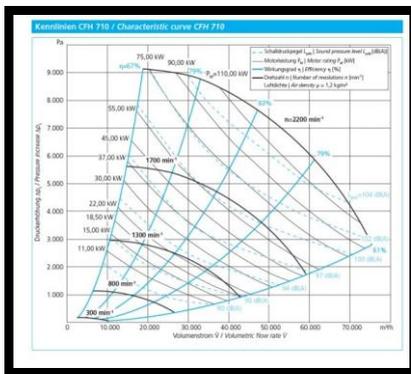


Figura 8. Curva Característica de Ventilador 2

Para el Ramal 2, $SP_{ramal2} = 6778.5Pa$ con caudal $Q_{ramal2} = 50544 \text{ m}^3/h$, seleccionamos el ventilador Kenlinien CFH 710 Elektor cuya curva característica se muestran la *Figura 8* (90 KW, 2200rpm, eficiencia = 81%).

6. Resultados Obtenidos.

Finalmente se muestra el Esquema General de Todo el Sistema de Extracción Localizada con los componentes Diseñados y seleccionados en la *Figura 9*.

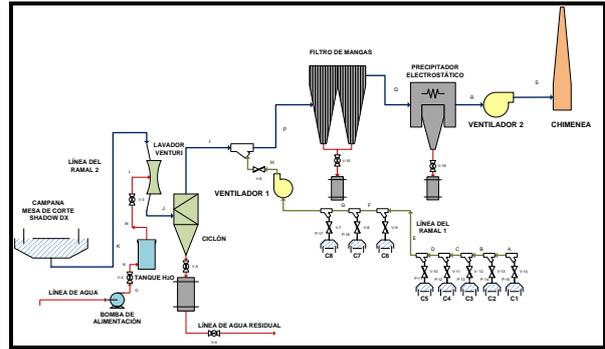


Figura 9. Esquema del Sistema De Extracción Localizada

7. Estudio Económico.

La inversión de capital total incluye todos los costos que se requieren para la compra de los equipos necesarios para el sistema, costos de mano de obra, materiales para la instalación de dichos equipos, costos para la preparación del sitio, y costos indirectos de instalación. Los costos directos de instalación incluyen los costos de la cimentación, estructuras, levantamiento y manejo del equipo, trabajo eléctrico, tuberías, aislantes y pintura. Los costos indirectos de instalación, incluyen costos tales como los de ingeniería; construcción y gastos de campo, honorarios de los contratistas; costos de las pruebas de funcionamiento y arranque e imprevistos, según los lineamientos de la EPA. La *Tabla 8*, muestra la inversión de Capital Total de todo el Proyecto

Tabla 8. Inversión del Capital Total (USD)

CAMPANAS, DUCTOS, CODOS, REDUCTORES, VENTILADORES, CHIMENEA	93,579.70
FILTRO DE MANGAS	61,588.40
PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	69,575.68
LAVADOR VENTURI	7,056.00
CICLÓN	4,600.00
INVERSIÓN DE CAPITAL TOTAL	236,399.78

Para realizar el Estudio de Rentabilidad, nos centraremos en el Código de Trabajo de nuestro país vigente desde el año 2005. El Art. 363 de la clasificación de las enfermedades profesionales consideraremos a la Siderosis como enfermedad que se produciría si no se cuenta con el Sistema de Extracción Diseñado y las demás enfermedades que se mencionan para revisión de la Comisión calificadora de Riesgos según el Art. 364. Considerando también el Parágrafo Segundo de las Indemnizaciones en caso de enfermedades Profesionales el Art. 376, el mismo que relaciona el Art. 369 del Parágrafo Primero el cual cita textualmente:

Art. 369.- Muerte por accidente de trabajo.- Si el accidente causa la muerte del trabajador y ésta se produce dentro de los ciento ochenta días siguientes al

accidente, el empleador está obligado a indemnizar a los derechohabientes del fallecido con una suma igual al sueldo o salario de cuatro años.

De tal manera que si los trabajadores no cuentan con el Sistema de Extracción y Equipos de Protección Personal adecuados los costos de Indemnización por muerte (considerando un escenario crítico) serían los que se muestran en la *Tabla 9*.

Un soldador recibe un salario mensual de \$ 850.00, anualmente recibiría \$ 10,200.00.

Un operador de corte de metales recibe un salario mensual de \$ 550.00, anualmente recibiría \$ 6,600.00.

Tabla 9. Costo Total de Indemnizaciones

EMPLEADO	\$/AÑO	\$ EN 4 AÑOS	PERSONAS	SUBTOTAL (\$)	TOTAL (\$)
SOLDADOR	10,200.00	40,800.00	8	326,400.00	379,200.00
CORTADOR	6,600.00	26,400.00	2	52,800.00	

Si no se pagara las indemnizaciones, sería un beneficio para la empresa, relacionando los datos conseguidos para obtener el costo/beneficio, el valor es mayor a uno (>1), lo que significa que la ejecución del proyecto es rentable para la empresa.

$$\frac{\text{BENEFICIO}}{\text{COSTO}} = \frac{\text{INDEMNIZACIONES}}{\text{INVERSIÓN DE CAPITAL TOTAL}} = \frac{\$ 379,200.00}{\$ 236,399.78} = 1.60 > 1$$

Los Resultados indican la Rentabilidad, aún no considerando las sanciones económicas que se impondrían por el No cumplimiento de las Normas de Calidad de Aire Ambiente.

8. Conclusiones

Realizados los diseños, la selección y evaluación técnica y económica de los componentes, se puede concluir:

1. Se cumplieron los objetivos propuestos, los análisis técnicos e ingenieriles y resultados en cada uno de los equipos proporcionaron resultados de aceptabilidad, confiabilidad y eficiencia para el diseño.
2. Los beneficios que proveerá la Implantación del Sistema de Extracción se verán reflejados en un aumento de producción y en el cumplimiento de la Legislación Ambiental y Normativas de Seguridad.
3. El resultado del Costo/Beneficio en el Estudio Económico es de 1.6 (mayor a 1), esto nos indica que la ejecución del Proyecto es RENTABLE para la empresa.

4. El costo Total de la Inversión se lo podrá recuperar paulatinamente con la Producción, porque se evitaría ausentismo laboral y grandes multas por enfermedades profesionales, muerte o contaminación ambiental.

9. Agradecimientos

Se agradece la colaboración y constante asesoramiento del Ing. Manuel Helguero G. Por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo.

10. Referencias

- [1]. Carlos Tejedor, Nederman Ibérica S.A., Jornada Técnica de Trabajos de Soldadura: Riesgos y Responsabilidades, Prácticas Seguras, Oviedo España, Mayo 2009, www.nederman.com
- [2]. Ventilation Guide for Weld Fume. AWS F3.2M/F 3.2:2001, A Sampling Guide for Evaluating Contaminants in the Welding Environment 2001 AWS F1.3:2006 American Welding Society 550 N.W. leJeune road, Miami, Florida 33126.
- [3]. ASME Code for Pressure Piping and American National Standard B31.3-2002 Process piping.
- [4]. http://www.uv.es/gabaldoc/apuntes/Control_partículas.pdf, Universidad de Valencia, España, 2008
- [5]. AVALLONE, BAUMEISTER III, MARKS, "Manual del Ingeniero Mecánico", Ed. Mc. Graw-Hill, 3ra. Edición, 1998.
- [6]. Tabla de Límites de exposición (TLVs) para agentes químicos España, ACGIH, 2007.
- [7]. Ministerio del Ambiente - República del Ecuador. Texto Unificado Libro VI: De la Calidad Ambiental Anexo 4: NORMA DE CALIDAD DE AIRE AMBIENTE. Anexo 3: NORMA DE EMISIONES AL AIRE DESDE FUENTES FIJAS DE COMBUSTIÓN.
- [8]. The 2000 ASHRAE Handbook Systems and Equipment <http://www.ashrae.org>. Handbook Editor, ASHRAE, 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329 Robert A. Parsons.
- [9]. The 1999/1997 ASHRAE Handbook HVAC Applications/Fundamentals <http://www.ashrae.org>. Handbook Editor, ASHRAE, 1791 Tullie Circle, Atlanta, GA 30329 Robert A. Parsons.
- [10]. Perry Robert-Green Don, PERRY, Manual del Ingeniero Químico, Séptima Edición, Volumen II, 1997 Mc Graw Hill.
- [11]. Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA Sexta Edición EPA 452/B-02-002 June 2002, OAQPS, Oficina de Normas y Planeación de la Calidad del Aire , USEPA Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. Research Triangle Park, NC 27711