

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DE GASES EN UN AMBIENTE DE FORJA Y SOLDADURA

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el alumno:

**MARCO ALONSO DELGADO YARANGA**

**ASESOR: Enrique José Barrantes Peña**

Lima, Julio 2016



© 2016, Marco Alonso Delgado Yaranga

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## RESUMEN

En la actualidad, el oficio de cerrajería en el Perú tiene cada vez mayor incentivo a nivel nacional. Sin embargo, su práctica todavía se desarrolla a niveles artesanales. Por ello, es importante determinar cómo son las condiciones de trabajo bajo las cuales operan los cerrajeros.

Los procesos que se emplean en cerrajería son la soldadura y el calentamiento de piezas metálicas. Este último proceso se lleva a cabo generalmente en fraguas de carbón. Luego del calentamiento, la pieza está en condiciones para ser forjado de manera manual. Los procesos de soldadura y forja generan desechos, tales como gases de combustión, humos, material particulado, etc. que son dañinos tanto para el trabajador como al medioambiente.

En el Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP se llevan a cabo los cursos de Taller Mecánico 1 y Taller de Procesos de Manufactura, en los cuales se dictan las sesiones de soldadura y forja. Es por ello, que fue necesaria una evaluación de las condiciones de trabajo del personal técnico y de los alumnos durante estas sesiones.

Para el siguiente trabajo de tesis, se realizaron lecturas de concentración de gases en los ambientes de soldadura y forja del Laboratorio, mediante un analizador de gases TESTO 350-XL brindado por el Departamento de Energía de la PUCP. Se detectaron valores de concentración de monóxido de carbono (CO) mayores a 520 ppm en el ambiente de forja y de 195 ppm de la familia de monóxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en el ambiente de soldadura.

Ante los resultados obtenidos, se concluyó que el ambiente de forja y soldadura del Laboratorio cuenta con una necesidad de extracción y tratamiento de los gases emitidos en ambos procesos.

Se realizó el diseño de dos sistemas de extracción independientes para cada ambiente de trabajo. Para la fragua, se diseñó un sistema con un caudal de aspiración total de 0,32 m<sup>3</sup>/s y presión de 58,92 mmH<sub>2</sub>O, dos depuradores húmedos tipo torre empacada de 0,83 m de diámetro y 1,9 metros de altura, con una capacidad de absorción de 79,6% y 139,8 Pa cada una. Para el ambiente de soldadura, el sistema cuenta con un caudal de aspiración total de 1,46 m<sup>3</sup>/s y presión de 75,96 mmH<sub>2</sub>O y un depurador húmedo tipo Venturi de 156,25 Pa.

El presupuesto correspondiente al diseño, fabricación e instalación de los dos sistemas fue de \$ 44 821.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DE GASES EN UN AMBIENTE DE FORJA Y SOLDADURA

ÁREA : Energía # 383

PROPUESTO POR : Ing. Enrique J. Barrantes P.

ASESOR : Ing. Enrique J. Barrantes P.

TESISTA : Marco Alonso Delgado Yaranga

CÓDIGO : 20094008

FECHA : 7 de Octubre del 2015

**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

En el Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP se realizan las prácticas de Taller Mecánico y Taller de Procesos de Manufactura correspondientes a los alumnos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Industrial respectivamente. Como parte de estas prácticas se encuentran las clases de forjado en la fragua a carbón, y las clases de soldadura.

Actualmente, el Laboratorio tiene la necesidad de un sistema que permita la extracción, colección y tratamiento de los gases, humos y material particulado que se genera durante las sesiones de clase.

Por lo cual se propone el presente trabajo cuyo objetivo es el Diseño de un Sistema de Extracción y tratamiento de gases en el ambiente donde se realizan las sesiones de forja y soldadura.





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DE  
GASES EN UN AMBIENTE DE FORJA Y SOLDADURA**

Introducción

1. Características del Proyecto
2. Diseño del Sistema de extracción y Tratamiento de gases
3. Presupuesto del Proyecto

Planos

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

*Maximo: 100 páginas*

  
Ing. Enrique J. Barrantes P.  
Asesor

XV





Dedicado especialmente a Dios porque, durante el desarrollo de este trabajo de tesis, he podido experimentar su dirección, su sabiduría y su fortaleza en los momentos más importantes.

“Torre fuerte es el nombre de Jehová; a él correrá el justo, y será levantado.” Proverbios 18:10

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme sustentado en todo momento y por permitirme culminar una de las etapas más importantes en mi vida profesional, porque sin Él, esto no hubiera sido posible.

También, agradezco a mis padres, Néstor Delgado y Rosa Yaranga, por darme la oportunidad de estudiar mi profesión, por todo su amor, cariño, apoyo y comprensión. A mis hermanos Néstor y Leslie y a mi tía Emilia, quienes siempre desearon el éxito y cumplimiento de este trabajo.

Agradezco a mis dos grandes amigas, Mirian y Jenny, quienes oraron por mí y siempre me dieron palabras de aliento para seguir adelante y nunca dejar de confiar en Dios.

Agradezco a mi asesor, el Ing. Enrique Barrantes y a los profesores Ronald Mas y Gaetano Muscari; quienes me apoyaron en el desarrollo de este trabajo. Además, agradezco a todo el personal del Laboratorio de Manufactura por brindarme acceso a sus instalaciones. A los profesores y amigos del grupo INACOM quienes me permitieron el uso de sus computadoras y me ayudaron a culminar el presente trabajo.

Finalmente, agradezco también a todos mis hermanos en la fe que me dieron de su apoyo y de sus oraciones.

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
INDICE DE CONTENIDO.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
INTRODUCCION .....	1
CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO .....	3
1.1 Descripción del Laboratorio .....	3
1.2 Procesos en el Laboratorio de Manufactura.....	5
1.2.1 Forja .....	5
1.2.2 Soldadura por arco eléctrico .....	13
1.3 Normas de salud y ambientales.....	16
1.3.1 Agencia de Protección Ambiental (EPA).....	16
1.3.2 Sociedad Americana Gubernamental de la Industria Higiénica (ACGIH) .....	18
1.3.3 Organización Mundial de la Salud (OMS) .....	19
1.4 Descripción de la medición de gases .....	20
1.4.1 Fragua .....	23
1.4.2 Soldadura .....	24
1.5 Resultados.....	24
1.5.1 Fragua .....	24
1.5.2 Soldadura .....	26
1.6 Requerimientos para el diseño .....	27
REFERENCIAS CAPITULO 1.....	29
DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE GASES .....	31

2.1 Generalidades .....	31
2.2 Sistemas de ventilación .....	32
2.2.1 Sistemas de impulsión .....	32
2.2.2 Sistemas de extracción .....	33
2.3 Velocidades de captura .....	35
2.4 Velocidades de transporte en los ductos.....	36
2.5 Flujo de gases contaminantes .....	38
2.5.1 Gases de combustión del carbón antracita .....	39
2.5.2 Humos de soldadura .....	45
2.6 Campanas .....	53
2.6.1 Tipos de campana .....	53
2.6.2 Campana para la fragua .....	55
2.6.3 Campana para las cabinas de soldadura .....	60
2.7 Caudal de aspiración total y diseño de rendijas y pleno .....	62
2.7.1 Fragua .....	62
2.7.2 Cabinas de soldadura .....	64
2.8 Propiedades de los flujos de aire .....	65
2.8.1 Propiedades del aire ambiente .....	65
2.8.2 Propiedades de la mezcla de gases de fragua.....	67
2.8.3 Propiedades de la mezcla de gases de soldadura .....	68
2.9 Diseño de ductos y accesorios .....	68
2.9.1 Sección transversal del ducto .....	68
2.9.2 Espesor mínimo de tuberías y accesorios.....	71
2.9.3 Material para ductos y accesorios.....	72
2.9.4 Accesorios .....	72
2.10 Distribución del flujo de aire .....	73
2.11 Método de cálculo de pérdidas .....	74

2.11.1 Pérdidas en tramos .....	74
2.11.2 Pérdidas en codos y transiciones .....	75
2.11.3 Pérdidas en la entrada de la campana .....	76
2.11.4 Pérdidas en expansiones .....	76
2.12 Tratamiento de gases .....	78
2.12.1 Sistema de extracción para fragua .....	78
2.12.2 Sistema de extracción para cabinas de soldadura .....	88
2.13 Cálculo de pérdidas .....	89
2.14 Selección de ventiladores .....	90
REFERENCIAS CAPITULO 2.....	91
PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....	94
3.1 Costos de diseño .....	94
3.2 Costos de materiales .....	95
3.3 Costos de fabricación y montaje .....	96
3.4 Costo Total .....	96
PLANOS .....	97
CONCLUSIONES .....	98
BIBLIOGRAFÍA .....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{cabina}$	:	Área de la entrada de la campana tipo cabina [m <sup>2</sup> ]
$C_{(si)}$	:	Concentración del gas de soldadura i [mg/m <sup>3</sup> ]
$C_{(X)}$	:	Concentración en volumen del componente X [mg/m <sup>3</sup> ]
$C_{i(mg/m^3)}$	:	Concentración del componente i en mg/m <sup>3</sup>
$C_{i(ppm)}$	:	Concentración del componente i en ppm
$D_{tub}$	:	Diámetro interno de tubería [m]
$f$	:	Coefficiente de rozamiento de tubería [-]
$fm_i$	:	Fracción másica del componente i [-]
$fm_{pi}$	:	Fracción másica del producto i [-]
$fm_{gsi}$	:	Fracción másica del gas de soldadura i [-]
$F_p$	:	Factor de empaque [-]
$F.E_{HS}$	:	Factor de emisión total de humos de soldadura [kg de humos / kg de electrodo consumido]
$F.E_X$	:	Factor de emisión del contaminante X [gramos de X / kg de carbón consumido]
$F.G.$	:	Factor de ganancia [-]
$g$	:	Aceleración de la gravedad [m/s <sup>2</sup> ó ft/s <sup>2</sup> ]
$G_x$	:	Flujo másico de agua por unidad de área [lb/ft <sup>2</sup> -s]
$G_y$	:	Flujo másico de gas contaminante por unidad de área [lb/ft <sup>2</sup> -s]
$h_{acc}$	:	Pérdidas en accesorio [Pa]
$h_{campana}$	:	Pérdida de presión en la entrada de la campana [Pa]

$h_{tub}$	:	Pérdidas en tramo de tubería [Pa]
$H$	:	Altura de torre empacada [m]
$K_D$	:	Coeficiente de pérdidas en accesorio [-]
$K_G a$	:	Coeficiente de transferencia de masa [mol/(s·m <sup>3</sup> ·kPa)]
$L_{tub}$	:	Longitud de tubería [m]
$m_{EC}$	:	Peso del electrodo E consumido [kg]
$\dot{m}_{aire\ húmedo}$	:	Flujo másico del aire húmedo [kg/s]
$\dot{m}_{aire\ seco}$	:	Flujo másico de aire seco en el ambiente [kg/s]
$\dot{m}_c$	:	Flujo másico de carbón antracita [kg/h]
$\dot{m}_{ci}$	:	Flujo másico del componente i del carbón [kg/h]
$\dot{m}_{CE}$	:	Tasa de consumo del electrodo E [kg/h]
$\dot{m}_{depE}$	:	Tasa de deposición del electrodo E [kg/h]
$\dot{m}_{gf}$	:	Flujo másico de los gases de combustión de la fragua [kg/h]
$\dot{m}_{GS}$	:	Tasa de generación de gases de soldadura [kg/h]
$\dot{m}_{HS}$	:	Tasa de generación de humos de soldadura [kg/h]
$\dot{m}_{HGS}$	:	Tasa de generación de humos y gases de soldadura [kg/h]
$\dot{m}_i$	:	Flujo másico del componente i [kg/h]
$\dot{m}_{pi}$	:	Flujo másico del producto i [kg/h]
$\dot{m}_{si}$	:	Flujo másico del gas de soldadura i [kg/h]
$\dot{m}_{vapor}$	:	Flujo másico de vapor de agua en el ambiente [kg/s]
$\dot{m}_X$	:	Tasa de emisión del contaminante X [g/h]
$M_i$	:	Masa molar del componente i [kg/kmol]
$M_{pi}$	:	Masa molar del producto i [kg/kmol]

$\dot{n}_i$	:	Coeficiente estequiométrico del componente i [kmol/h]
$\dot{n}_{pi}$	:	Coeficiente estequiométrico del producto i [kmol/h]
$P_{atm}$	:	Presión atmosférica [kPa]
$P_i$	:	Presión absoluta del componente i [kPa]
$P_{vapor\ sat}$	:	Presión parcial de vapor de agua de saturación a temperatura ambiente [kPa]
$P.A.$	:	Porcentaje de absorción de una torre empacada [%]
$PD_{re}$	:	Presión dinámica resultante [mmH <sub>2</sub> O]
$PD_{tub}$	:	Presión dinámica en tubería [Pa]
$PE_{gob}$	:	Presión estática gobernante [Pa]
$R_{aire}$	:	Constante de gases del aire seco [kJ/kg-K]
$R_{gf}$	:	Constante de los gases de combustión de la fragua [kJ/kg-K]
$R_{pi}$	:	Constante del producto i [kJ/kg-K]
$R_U$	:	Constante universal de los gases [kJ/kmol-K]
$R_{vapor}$	:	Constante de gases del vapor de agua [kJ/kg-K]
$Re$	:	Número de Reynolds [-]
$t_{CS}$	:	Tiempo de duración del cordón de soldadura [s]
$T_{amb}$	:	Temperatura del aire ambiente [°C]
$T_{gf}$	:	Temperatura de los gases de combustión de la fragua [K]
$T_i$	:	Temperatura del componente i [K]
$u_x$	:	Viscosidad absoluta del agua [1 Cp]
$v_{amb}$	:	Volumen específico del aire húmedo [m <sup>3</sup> /kg aire seco]
$v_{gf}$	:	Volumen específico de los gases de combustión de la fragua [m <sup>3</sup> /kg]

$V_{ducto}$	:	Velocidad en el ducto [m/s]
$V_f$	:	Velocidad de cara [m/s]
$V_{max_{pl}}$	:	Velocidad máxima en el pleno de la campana [m/s]
$V_{re}$	:	Velocidad en la rendija [m/s]
$\dot{V}_{amb}$	:	Caudal de aspiración de aire ambiente [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{corr}$	:	Caudal de aspiración total corregido [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{ext}$	:	Caudal de extracción [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{gases}$	:	Flujo volumétrico de gases contaminantes del proceso [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{gf}$	:	Flujo volumétrico de los gases de combustión [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_T$	:	Flujo volumétrico total [m <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{Tasp}$	:	Caudal total de aspiración del sistema [m <sup>3</sup> /s]
$x$	:	Humedad absoluta [kg vapor de agua / kg aire seco]
$\varepsilon$	:	Rugosidad absoluta del material de la tubería [m]
$\eta_{depE}$	:	Eficiencia de deposición del electrodo E [-]
$\mu$	:	Viscosidad dinámica del fluido [Pa-s]
$\rho_{amb}$	:	Densidad del aire ambiente o húmedo [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{gf}$	:	Densidad de los gases de combustión de la fragua [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_x$	:	Densidad del agua [lb/ft <sup>3</sup> ]
$\rho_y$	:	Densidad del gas contaminante [lb/ft <sup>3</sup> ]
$\phi$	:	Humedad relativa [%]

## INTRODUCCION

En los últimos años, ha habido un crecimiento en el sector metal-mecánico a nivel nacional; específicamente en las profesiones de carpintería metálica y herrería tradicional, las cuales emplean la fragua, el martillo y el yunque para los trabajos en acero. A pesar que la tecnología ha facilitado el desarrollo del tratamiento del acero, es notable la gran variedad de productos que se pueden fabricar únicamente a base de la herrería tradicional y que la tecnología actual no puede igualar.

Por lo cual, es importante señalar las condiciones de trabajo de los herreros en el Perú. Los hornos más comunes que ellos emplean son fraguas al carbón artesanales, de las cuales la mayoría no cuentan con un sistema de extracción de los gases emitidos por la combustión de carbón. Esto afecta su salud debido a la constante exposición a estas emisiones y a la contaminación del aire debido al efecto invernadero de estos gases.

En la actualidad, el carbón como fuente de energía no se consume a gran volumen en el Perú, por lo que su producción siempre se ha dado a nivel artesanal. Según una investigación<sup>1</sup>, en el año 2012 se detectaron reservas de  $10,9 \times 10^8$  toneladas métricas de carbón. Es por ello que se ha propuesto el carbón como una alternativa más económica para generar energía a nivel industrial y artesanal. Se espera que, con el apoyo del Estado, esta materia prima sea de mayor utilización en el Perú, cuando las reservas de gas natural e hidrocarburos sean cada vez más escasas.

---

<sup>1</sup> Antonio Luyo Quiroz. "Visión futura del carbón peruano". Artículo publicado en la Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas de la UNMSM. Volumen 15 N° 29 correspondiente al periodo Enero – Junio 2012.

Además, es notable que la soldadura es un proceso indispensable en diversos sectores, no solamente en la carpintería metálica. Por ello, es necesario que en nuestro país existan mejoras prácticas de soldadura, sobretodo en salud ocupacional, dada la creciente demanda de soldadores. La inhalación de los humos de soldadura como consecuencia de este proceso puede conducir a diversas enfermedades, como intoxicaciones, asfixia debido a falta de oxígeno, irritación en el sistema respiratorio, además de efectos de carácter cancerígeno.

Considerando lo expuesto anteriormente, el presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal el diseño de un sistema de extracción y tratamiento de los gases provenientes de una fragua al carbón y del proceso de soldadura SMAW del Laboratorio de Manufactura de la Sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP. Este diseño será justificado realizando estudios de las emisiones producidas en el Laboratorio mediante pruebas de medición de estos gases.

Además del objetivo principal, se tendrán como objetivos específicos los siguientes:

- Obtener la concentración de emisiones de la fragua y de los procesos de soldadura del taller mediante un procedimiento de medición de gases.
- Estimar la tasa de emisión de la fragua y del proceso de soldadura.
- Determinar el flujo de aire necesario para el sistema de extracción propuesto.
- Definir las características del sistema de extracción.

## CAPITULO 1

### CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

#### 1.1 Descripción del Laboratorio

La Sección de Ingeniería Mecánica fue creada el 10 de Diciembre de 1969 en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por un grupo de 5 ingenieros holandeses encargados de capacitar a profesores peruanos. La Sección se dividió en cinco áreas: Diseño, Manufactura, Energía, Materiales y Electricidad, todas con sus respectivos laboratorios y docentes.

El Laboratorio de Manufactura presta servicios educativos en los cursos de Taller de Procesos de Manufactura, para los alumnos de Ingeniería Industrial, y Taller Mecánico 1 y Taller Mecánico 2 para los alumnos de Ingeniería Mecánica. El Laboratorio también ofrece servicios al sector industrial mediante la fabricación de componentes y equipos de alta calidad y precisión, además de brindar asesoría en diseño y fabricación en proyectos de investigación y creación de prototipos [Ref. 1.1].

El Laboratorio de Manufactura cuenta con equipamiento dedicado a la transformación del acero en diversos productos, mediante herramientas, máquinas e instrumentos operados por el personal técnico [Ref. 1.1].

La figura 1.1 muestra la ubicación de la Sección de Ingeniería Mecánica dentro del Campus de la PUCP.

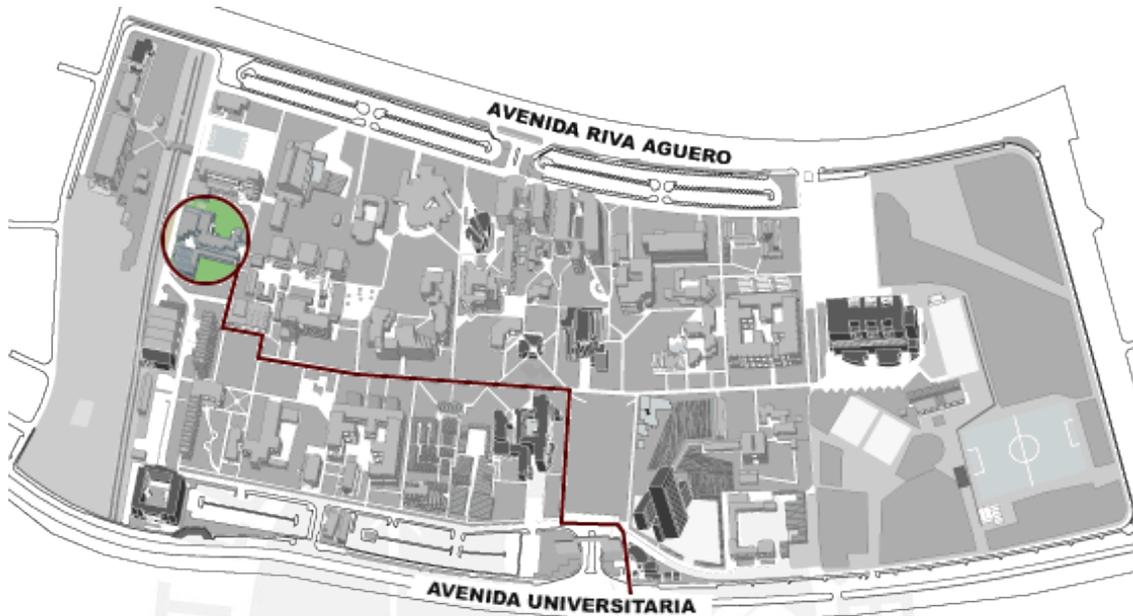


Figura 1.1 Ubicación de la Sección de Ingeniería Mecánica [Ref. 1.2]

El Laboratorio se puede dividir en dos zonas principales, de las cuales se subdividen en diferentes ambientes de trabajo. La tabla 1.1 muestra las zonas de trabajo del Laboratorio de Manufactura, de los cuales, este trabajo de tesis se enfocará en la Zona de Soldadura y Forja.

Tabla 1.1. Zonas del Laboratorio de Manufactura PUCP.

Laboratorio de Manufactura PUCP						
Zona 1			Zona 2			
Mecanizado	Almacén principal	Oficinas	Trabajo en chapa	Fundición	Trabajo de banco	Soldadura y Forja

Si bien los procesos de soldadura y de forja están separados, se puede considerar que éstas se encuentran en la misma zona de trabajo (ver plano LM1-A3). La distribución de la zona 2 del Laboratorio se encuentra en el plano adjunto LM2-A3, así como la ubicación de cada elemento dentro de la Zona de Soldadura y Forja.

## 1.2 Procesos en el Laboratorio de Manufactura

### 1.2.1 Forja

Es un proceso en el cual la pieza de trabajo es sometida a cargas de compresión, ya sea mediante una presión gradual o de impacto. Es conocido como el proceso de deformación más antiguo, que data de los 5000 A.C. [Ref. 1.3]. En la época de la Revolución Industrial y a inicios del siglo XX se usaban comúnmente fraguas al carbón para realizar diversos trabajos con acero.

Hoy en día, países como los EEUU, China y algunos países europeos reconocen los trabajos de la forja tradicional y, cada vez, fomentan más esta práctica. En el Perú, el empleo de la fragua al carbón se está incentivando gracias a diversas jornadas y seminarios de carpintería metálica y herrería a nivel nacional [Ref. 1.4].

En este trabajo se estudiarán las fraguas al carbón estáticas, las cuales se instalan en los interiores de un taller. Una fragua al carbón estática puede estar dividida en:

- 1) Mesa de la fragua, en donde se puede colocar piezas de carbón que todavía no serán utilizadas para la combustión.
- 2) Corazón de la fragua, en la cual se deposita el carbón empleado para la combustión.
- 3) Soplador, el cual produce aire forzado directamente por debajo del corazón de la fragua para aumentar la temperatura de flama.
- 4) Estructura, que sirve para apoyar el soplador y a la mesa de la fragua.
- 5) Campana, para la captación de los gases de combustión producidos. Estas pueden tener una configuración lateral (*side-draft*) o puede estar por encima de la mesa de la fragua (*canopy*).
- 6) Ductos de escape, por el cual los gases de combustión son transportados hacia el exterior.

En la figura 1.2 se muestra una fragua al carbón tradicional con campana.

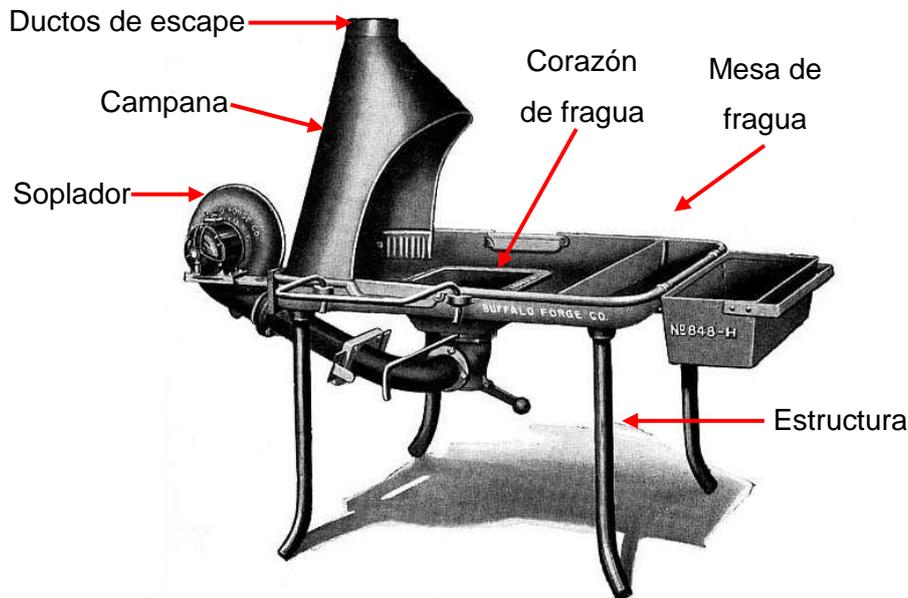


Figura 1.2. Fragua al carbón tradicional con soplador eléctrico [Ref. 1.5]

El proceso tradicional consiste en calentar la pieza de trabajo hasta obtener un color rojo vivo o amarillo. Después, se procede a golpear con una comba hasta obtener la forma deseada. Las altas temperaturas permiten la deformación de la pieza de trabajo con mayor facilidad.

La fragua del Laboratorio funciona con un soplador de aire que es inyectado directamente por debajo del corazón de la fragua. Esta inyección ayuda a aumentar la temperatura de trabajo y a direccionar los gases de combustión para su captación.

Las temperaturas de forjado comunes en aceros al carbono son menores a 1250 °C (para aceros AISI SAE 1045, menores a 1150 °C) [Ref. 1.6]. Según El Manual del Ingeniero Mecánico Marks [Ref. 1.7] la temperatura de flama a la cual pueden llegar los gases de combustión del carbón; asumiendo un 120% de aire teórico, es de aproximadamente 1827 °C. Se empleará este valor de temperatura en el capítulo 2 para determinar las características de estos gases de combustión.

La fragua al carbón del Laboratorio de Manufactura se muestra a continuación en la figura 1.3.



Figura 1.3. Fragua del Laboratorio de Manufactura

Se puede observar que la fragua posee una campana tipo *canopy* como parte de todo el sistema. Este, a su vez, termina en un ducto circular, que se dirige directamente hacia el exterior del Laboratorio. En el plano adjunto LM3-A2 se muestra la disposición de la Zona de Forja y en la tabla 1.2 se muestran las dimensiones principales de la fragua.

Tabla 1.2. Dimensiones de la fragua del Laboratorio de Manufactura

Fragua	Dimensiones (cm)
Largo	80
Ancho	80
Altura hacia la mesa de fragua	93

A su vez, la fragua cuenta con un depósito de carbón, más conocido como el corazón de la fragua, la cual se muestra en la figura 1.4. Se aprecia que tiene forma trapezoidal y una boquilla por el cual el soplador inyecta aire a la zona de combustión. Las dimensiones del corazón de la fragua se muestran en la tabla 1.3.



Figura 1.4. Corazón de la fragua

Tabla 1.3. Dimensiones del corazón de la fragua

Corazón de la fragua		Dimensiones (cm)
Base mayor	Largo	32
	Ancho	28
Base menor	Largo	20
	Ancho	15
Profundidad		10
Diámetro para inyección de aire		4

No se pudo obtener más información técnica como la tasa de consumo de carbón y datos del soplador, debido a la antigüedad del equipo. Por ello, se solicitó dicha información a fabricantes de fraguas al carbón, como la empresa Greystone Forge, ubicada en los EEUU. Asimismo, también se consultó en un blog de internet muy conocido en Norteamérica, llamado Anvilfire, que proporciona amplia información acerca del trabajo en fragua tradicional y es un referente para varios carpinteros metálicos en los EEUU. En la tabla 1.4 se muestran las tasas de consumo de carbón en fraguas tradicionales propuestas por ambas fuentes.

Tabla 1.4. Tasa de consumo de carbón [Ref. 1.8] [Ref. 1.9]

Datos técnicos	Símbolo	Unidades	Fuentes <sup>2</sup>	
			Greystone Forge (a)	Anvilfire (b)
Tasa de consumo de carbón en fraguas tradicionales	$\dot{m}_c$	kg/h	0,625 - 1,25	2

- (a) Según el fabricante, las fraguas son eficientes y asumió trabajo ligero.  
 (b) Según su experiencia personal, usando un soplador eléctrico en la fragua.

Para este trabajo, se asumirá el máximo valor del rango propuesto por Greystone Forge, por presentar unas condiciones de trabajo más cercanas a las del Laboratorio, ya que solamente se emplea la fragua durante las sesiones de los cursos dictados. Por lo tanto:

$$\dot{m}_c = 1,25 \text{ kg carbón quemado/h}$$

Para el soplador de la fragua, se tomarán los datos de la empresa Kayne & Son Blacksmith Depot, que son proveedores de sopladores para fraguas, recomendados por Anvilfire. En la tabla 1.5 se muestran los datos del soplador seleccionado para este trabajo.

Tabla 1.5. Datos del soplador [Ref. 1.10]

Caudal [cfm]	Presión estática [mmH <sub>2</sub> O]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Potencia [hp]	Potencia eléctrica [watt]	Red
65	33	110	0,5	1/12	55	Monofásico

<sup>2</sup> Ambas fuentes fueron consultadas por vía correo electrónico.

El Laboratorio de Manufactura emplea carbón antracita para las prácticas de forja en los cursos. El proveedor es la Carbonífera Chicama S.C.R.L. Esta es una empresa ubicada en Trujillo y comercializa carbón de la zona del Alto Chicama, ubicada en el norte del Perú (La Libertad). Este tipo de carbón es el que más abunda en el país, con un 92,2% del total de reservas registradas en el año 2012 [Ref. 1.11].

Para el estudio de la combustión del carbón dentro de la fragua y de la relación del combustible con el aire mezclado y los productos de combustión, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) realizó un análisis elemento para obtener la composición química del carbón. En la tabla 1.6 se muestran algunas características de este tipo de carbón obtenidas por la USGS, junto con la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Tabla 1.6. Composición química y poder calorífico del carbón antracita<sup>3</sup> [Ref. 1.12].

Carbono (%)	Hidrógeno (%)	Oxígeno (%)	Azufre (%)	Nitrógeno (%)	Humedad (%)	Ceniza (%)	Poder calorífico superior (MJ/kg)
87,95	1,15	2,05	0,36	0,55	4,72	3,22	32

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido una serie de factores de emisión que representan la cantidad en peso de contaminantes generados, los cuales dependen del proceso. En este trabajo de tesis, se considerarán estos valores y las condiciones de la toma de datos experimental (equipos, lecturas, instrumentos, etc.) aplicados por la EPA, por medio de los cuales pudieron obtener los factores de emisión.

Según la recopilación de factores de emisión de contaminantes de aire de EPA, las emisiones más comunes productos de la combustión de carbón antracita son de

---

<sup>3</sup> Datos obtenidos de una muestra de carbón del mercado público en Trujillo, zona del Alto Chicama (ver Referencia 1.12).

material particulado (PM), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y monóxidos de carbono (CO) [Ref. 1.13]. Las concentraciones de cada componente dependen de dos factores: la aplicación a la cual se da al carbón antracita; y de su composición química [Ref. 1.14]. Sin embargo, la EPA solo establece factores de emisión para equipos con alimentación de carbón a mano (*hand-fired units*) y de estufas residenciales a carbón, en general [Ref. 1.15]. Es decir, no existe un estudio sobre los gases de combustión en fraguas a carbón mineral. Debido a esto, fue necesaria la cuantificación de estos gases para su comparación, estudio y aplicación para el diseño propuesto en este trabajo. A continuación, se muestran los factores de emisión del carbón antracita para estufas residenciales en la tabla 1.7. No existen registros de CO en este tipo de aplicación.

Tabla 1.7. Factores de emisión en estufas residenciales a carbón antracita [Ref. 1.16].

Factores de emisión (lb/ton) (a)	
SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
39S (b)	3

(a) Se lee: libra de contaminante / tonelada de carbón consumido.

(b) S = porcentaje de azufre en peso. Por ejemplo, si el contenido de azufre es 3,4%, entonces S = 3,4.

Tomando en cuenta las características ya descritas en la tabla 1.6, se puede calcular el factor de emisión de un componente producto de la combustión de carbón antracita por medio de la ecuación 1.1.

$$\dot{m}_X = F.E_X \times \dot{m}_c \quad (1.1)$$

Donde:

$\dot{m}_X$  : Tasa de emisión del contaminante X [g/h]

$F.E_X$  : Factor de emisión del contaminante X  
[gramos de X / kg de carbón consumido]

Por lo tanto, a partir de la ecuación dada en la tabla 1.7, se obtiene el factor de emisión del SO<sub>2</sub> y de los NO<sub>x</sub> según la EPA.

$$F.E_{SO_2} = 14,04 \frac{lb SO_2}{ton carbón quemado} = 6,37 \frac{g SO_2}{kg carbón quemado}$$

$$F.E_{NO_x} = 3 \frac{lb NO_x}{ton carbón quemado} = 1,36 \frac{g SO_2}{kg carbón quemado}$$

Aplicando la ecuación 1.1 se obtiene la tasa de emisión de los óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) y de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

$$\dot{m}_{SO_2} = 7,96 g SO_x/h$$

$$\dot{m}_{NO_x} = 1,7 g NO_x/h$$

Tomando el caudal del soplador como el flujo volumétrico total de aire que circula en el escape de la fragua, se pueden obtener los valores de concentración de cada componente.

$$\dot{V}_{AF} = 65 cfm = 110,44 m^3/h$$

La concentración de un elemento gaseoso en volumen se obtiene con la ecuación 1.2.

$$C_{(X)} = \frac{\dot{m}_X}{\dot{V}_T} \quad (1.2)$$

Donde:

$\dot{m}_X$  : Flujo másico del componente X [miligramos de X / hora]

$\dot{V}_T$  : Flujo volumétrico total [m<sup>3</sup>/h]

$C_{(X)}$  : Concentración en volumen del componente X [mg/m<sup>3</sup>]

Se obtuvieron los siguientes valores de concentración, los cuales se tomarán en cuenta más adelante:

$$C_{(SO_2)} = 72,1 \frac{mg}{m^3}$$

$$C_{(NO_x)} = 15,4 \frac{mg}{m^3}$$

Asimismo, el tamaño de material particulado (PM) estará basado en los estudios realizados por la EPA en calderas de fondo seco con carbón antracita pulverizado como combustible [Ref. 1.17] Se ha determinado que los tamaños de PM varían entre 0,625 – 15  $\mu$ m.

### 1.2.2 Soldadura por arco eléctrico

Consiste en la unión de dos elementos metálicos mediante la fusión de cada una de las partes en el punto de contacto. Durante la fusión se mezclan ambas partes que forman una conexión. Esta es más conocida como cordón de soldadura. Los métodos más frecuentes para generar el calor necesario para la fusión son mediante arco eléctrico y llama oxiacetilénica.

En el Laboratorio de Manufactura se emplean los procesos de arco eléctrico con revestimiento metálico (SMAW) y arco eléctrico con gas metálico (GMAW), de los cuales solo será objeto de estudio la soldadura tipo SMAW por ser el único empleado en las cabinas de soldadura; y por ser el que más gases contaminantes produce.

La Zona de Soldadura está conformada por 5 cabinas que cuentan con un sistema de extracción localizado de emisiones cada una; pero sin una etapa de tratamiento o filtrado en la etapa final. Como parte del diseño del sistema de extracción de gases de soldadura, se evaluará el desempeño del sistema actual. En la figura 1.5 se muestra una práctica de soldadura tipo SMAW en una de las cabinas de soldadura en el Laboratorio. En el plano adjunto LM4-A2 se muestra la disposición de la Zona de Soldadura.



Figura 1.5. Alumnos de Ingeniería practicando el proceso SMAW en el Laboratorio. [Ref. 1.18].

Los contaminantes más comunes en los procesos de soldadura por arco eléctrico son partículas menores a  $10\ \mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico ( $\text{PM}_{10}$ ) y, por lo general, son denominadas humos (*fumes*). Según la EPA, este proceso es el único que produce este tipo de partículas en grandes cantidades. La composición química de los humos de soldadura varía con el tipo de electrodo, la pieza de trabajo y el tipo de proceso. La Ley del Aire Limpio (*Clean Air Act*) ha detectado en 1990 varios metales en la composición de las emisiones, las cuales incluyen manganeso (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), cobalto (Co) y plomo (Pb). [Ref. 1.19].

En cuanto a las emisiones en estado gaseoso, la EPA ha encontrado gases de efecto invernadero tales como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ); sin embargo, no existe un registro exacto de este tipo de emisiones. Es por ello que, mediante una toma de datos experimental, se obtendrá una lectura de estos valores. [Ref. 1.20].

Así como el carbón antracita, la EPA ha establecido factores de emisión para los humos de soldadura por arco eléctrico para diferentes tipos de electrodo. Para este proceso, la EPA ha recopilado información acerca de estos humos mediante diferentes métodos de muestreo, las cuales se tomarán en cuenta más adelante [Ref. 1.21]. Los factores de emisión de la EPA se muestran en la tabla 1.8.

Como parte de este trabajo de tesis, se obtendrán las concentraciones de los gases emitidos por cada tipo de electrodo usado en las sesiones de los cursos dentro del Laboratorio. Para el proceso SMAW, los técnicos emplean los electrodos sólidos de tipo celulósicos y rútilicos, fabricados por la empresa SOLDEXA S.A.

- 1) Electrodo de tipo celulósico [Ref. 1.22]:
  - a. Nomenclatura de SOLDEXA: CELLOCORD P  
Clasificación: E6010
  - b. Nomenclatura de SOLDEXA: CELLOCORD AP  
Clasificación: E6011
- 2) Electrodo de tipo rútilico [Ref. 1.23]:
  - a. Nomenclatura de SOLDEXA: OVERCORD S  
Clasificación: E6013

Tabla 1.8. Factores de emisión de humos de soldadura por electrodo.

Tipo de electrodo	Clasificación	Factor de emisión total de humos (g/kg) (a)
Celulósico	E6010	25,6
	E6011	38,4
Rútilico	E6013	19,7

(a) Se lee: Gramos de humos de soldadura por kilogramo de electrodo consumido

Se tomarán los valores más críticos para cada tipo de electrodo. En este caso, serían los de clasificación E6011 y E6013.

También se tomarán en cuenta los metales en formas de partículas (HAP)<sup>4</sup>, que son considerados peligrosos según la EPA. El tamaño de estos metales también se

<sup>4</sup> Del inglés: Hazardous Air Pollutant.

encuentra dentro del rango de los  $PM_{10}$ . La tabla 1.9 muestra los factores de emisión de cada metal por tipo de electrodo.

Tabla 1.9. Factores de emisión de contaminantes peligrosos del aire (CPA)

Tipo de electrodo	Factor de emisión ( $10^{-1}$ g/kg) (a)			
	Cr	Co	Mn	Ni
E6011	0,05	0,01	9,98	0,05
E6013	0,04	< 0,01	9,94	0,02

(a) Se lee: gramos de contaminante emitido por kilogramo de electrodo consumido.

### 1.3 Normas de salud y ambientales

De acuerdo con la naturaleza de las emisiones de ambos procesos, se deben considerar las condiciones del aire dentro y fuera del taller de manufactura, tanto por los efectos negativos en la salud, como por su impacto medioambiental. Para ello, existen regulaciones que definen los límites máximos permisibles de concentración de cada componente, la cual se deben aplicar bajo ciertas condiciones. Para este trabajo, se emplearán tres estándares:

- Estándares de la Calidad del Aire Ambiente, establecido por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) para la calidad del aire exterior.
- Valores Límite Permisibles, elaborados por la Sociedad Americana Gubernamental de la Industria Higiénica (ACGIH) para el control del aire en interiores.
- Guías de Calidad del Aire en Interiores de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

#### 1.3.1 Agencia de Protección Ambiental (EPA)

Los estándares de la Calidad del Aire Ambiente de la EPA están dirigidos a la protección de la población frente a los efectos sobre la salud o a las consecuencias de la exposición a contaminantes ambientales. Por ello, solamente considera aquellos compuestos que pueden estar presentes en el aire exterior, de manera habitual.

La EPA clasifica sus estándares en dos categorías: Estándares primarios, que protegen la salud pública, esto incluye a la población más sensible; como asmáticos, niños y adultos mayores. Los estándares secundarios establecen límites para proteger el bienestar público, lo que incluye proteger del deterioro de la visibilidad y el daño a animales, cosechas, vegetación y edificios. La EPA ha establecido estos estándares para seis contaminantes principales. Estos se indican en la tabla 1.10.

Tabla 1.10. Estándares de Calidad del Aire Ambiente de la EPA (Adaptado) [Ref. 1.24]

Contaminante		Categoría	Tiempo promedio (a)	Nivel de concentración (b)	Forma
Monóxido de Carbono (CO)		Primaria	8 horas	9 ppm	Valor que no puede ser superado más de una vez al año.
			1 hora	35 ppm	
Plomo (Pb)		Primaria y Secundaria	Promedio móvil de 3 meses	0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valor que no puede ser superado.
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )		Primaria	1 hora	100 ppb	Percentil 98 de concentraciones máximas en una hora diaria, promediado en más de 3 años.
		Primaria y Secundaria	Anual	53 ppb	
Ozono (O <sub>3</sub> )		Primaria y Secundaria	8 horas	0,075 ppm	Cuarto máximo valor anual de concentración en 8 horas como máximo diaria, promediado en más de 3 años.
Material Particulado	PM <sub>2,5</sub>	Primaria	Anual	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada en más de 3 años.
		Secundaria	Anual	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Media anual, promediada en más de 3 años.
	PM <sub>10</sub>	Primaria y Secundaria	24 horas	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Percentil 98, promediado en más de 3 años.
		Primaria y Secundaria	24 horas	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valor que no puede ser superado más de una vez al año, promediado en más de 3 años.

Tabla 1.10. Estándares de Calidad del Aire Ambiente de la EPA (Continuación)

Contaminante	Categoría	Tiempo promedio (a)	Nivel de concentración (b)	Forma
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Primaria	1 hora	75 ppb	Percentil 99 en 1 hora como máximo diaria, promediado en más de 3 años.
	Secundaria	3 horas	0,5 ppm	Valor que no puede ser superado más de una vez al año.

(a) Tiempo de exposición de una persona.

(b) Nivel de concentración máximo que debe existir en el ambiente.

### 1.3.2 Sociedad Americana Gubernamental de la Industria Higiénica (ACGIH)

La ACGIH es una organización que promueve la salud ocupacional y el medioambiente y publica anualmente los Valores Límite Permisibles, que, de ahora en adelante, se denotarán con las siglas TLV (*Threshold Limit Values*). La ACGIH define los TLV's como las concentraciones de agentes químicos que representan condiciones bajo las cuales se cree que, la mayoría de los trabajadores, pueden estar expuestos día a día en un horario de trabajo y sin sufrir efectos adversos en su salud [Ref. 1.25]. Así como la EPA, la ACGIH divide sus TLV's en categorías [Ref. 1.26]:

- Valor Límite Permissible – Promedio Ponderado en el Tiempo (TLV-TWA)<sup>5</sup>

Es la concentración promedio de un agente químico durante un periodo de trabajo de 8 horas al día y 40 horas a la semana.

- Valor Límite Permissible – Límite de Exposición a Corto Plazo (TLV-STEL)<sup>6</sup>

Es un valor de concentración ponderado en el tiempo (TWA) para una duración de 15 minutos, la cual no puede ser superada en ningún momento durante el trabajo, aun si

<sup>5</sup> Del Inglés: *Threshold Limit Value – Time-weighted Average*

<sup>6</sup> Del Inglés: *Threshold Limit Value – Short-term Exposure Limit*

su valor TLV-TWA de 8 horas al día está dentro del rango. Un trabajador puede estar expuesto en una condición por debajo de este valor límite por un periodo pequeño de tiempo sin sufrir de irritación, daño de tejidos crónico o irreversible o efectos tóxicos.

En la tabla 1.11 se muestran los estándares de la ACGIH de los componentes ya mencionados, actualizados al año 2012.

Tabla 1.11. TLV's propuestos por la ACGIH en el proceso de forjado y soldadura [Ref. 1.27]

Procesos en Laboratorio de Manufactura	ACGIH 2012					
	Agentes Químicos	Símbolo Químico	TLV's			
			TWA		STEL	
			ppm	µg/m <sup>3</sup>	ppm	µg/m <sup>3</sup>
Forja en fragua de carbón mineral	Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	-	-	0,25	-
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	5000	-	30000	-
	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0,2	-	-	-
	Monóxido de carbono	CO	25	-	-	-
	Monóxido de nitrógeno	NO	25	-	-	-
Soldadura por arco eléctrico	Cobalto	Co	-	20	-	-
	Cromo (VI)	Cr	-	50	-	-
	Cromo (metal)	Cr	-	500	-	-
	Cromo (VI - Insoluble)	Cr	-	10	-	-
	Manganeso	Mn	-	200	-	-
	Níquel (Elemental)	Ni	-	1500 (I)*	-	-
	Níquel (Soluble)	Ni	-	100 (I)*	-	-
	Níquel (Insoluble)	Ni	-	200 (I)*	-	-
	Níquel (Tetracarbonilo)	Ni(CO) <sub>4</sub>	0,05	-	-	-
Plomo	Pb	-	50	-	-	

(\*) Material Particulado Inhalable, compuestos que son dañinos cuando están depositados en cualquier parte de la vía respiratoria.

### 1.3.3 Organización Mundial de la Salud (OMS)

La OMS es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas. Esta organización publica las Guías de calidad del aire en interiores para la protección de la salud a nivel mundial de los contaminantes más

comunes en interiores. Una de las sustancias de mayor estudio es el monóxido de carbono (CO), del cual la OMS ha establecido unos límites máximos permisibles para este agente químico. Estos valores dependen del tiempo de exposición de la persona al contaminante y, por tanto, presentan condiciones de trabajo más exactas a las del Laboratorio de Manufactura. La tabla 1.12 muestra los valores de estos límites.

Tabla 1.12. Límites Máximos Permisibles de monóxido de carbono en interiores, según la OMS [Ref. 1.28]

Tiempo de exposición	Valor guía (mg/m <sup>3</sup> )	Valor guía (ppm)
15 minutos	100	87
30 minutos	60	52
1 hora	30	26
8 horas	10	9

#### 1.4 Descripción de la medición de gases

Para el presente trabajo se evaluarán las condiciones del aire exterior producto de los procesos de manufactura que son parte de este trabajo. Para ello, se pudo contar con instrumentación brindada por el Laboratorio de Energía de la Sección de Ingeniería Mecánica. El equipo que se manejó para la medición de los gases fue el analizador de gases de combustión TESTO 350-XL (ver figura 1.6). Este equipo cuenta con sensores de componentes comunes en la combustión, tales como oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), etc.

El analizador TESTO 350-XL está conformado por una unidad de control, un analizador de productos de la combustión, y una sonda de muestreo. La unidad de control del analizador cuenta con un visualizador en donde se muestran los valores obtenidos de cada parámetro. Estos valores están distribuidos en 3 ventanas, a través de las cuales el usuario puede ir navegando durante la toma de datos.

La tabla 1.13 muestra los parámetros en cada ventana del visualizador y en la figura 1.7 muestra un ejemplo de cómo se presentan los valores en el visualizador.



Figura 1.6. Analizador de gases de combustión TESTO 350-XL [Ref. 1.29].

Tabla 1.13. Parámetros mostrados en cada ventana del visualizador

Ventana 1			Ventana 2			Ventana 3		
Parámetro	Símbolo	Unidad	Parámetro	Símbolo	Unidad	Parámetro	Símbolo	Unidad
Temperatura de fluido	T <sub>f</sub>	°C	Concentración de dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	ppm	Caudal de la bomba del analizador	Pump	litros/min
Temperatura ambiente	T <sub>a</sub>	°C	Concentración de óxidos de nitrógeno	NO <sub>x</sub>	ppm	Voltaje de batería	Batt	V
Concentración de oxígeno	O <sub>2</sub>	%	Concentración de dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	ppm	Pérdidas	loss	%
Concentración de dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	%	Concentración de hidrocarburos	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	ppm	-	-	-
Concentración de monóxido de carbono	CO	ppm	Eficiencia	Eff	%	-	-	-
Concentración de monóxido de nitrógeno	NO	ppm	Exceso de aire	ExA	%	-	-	-

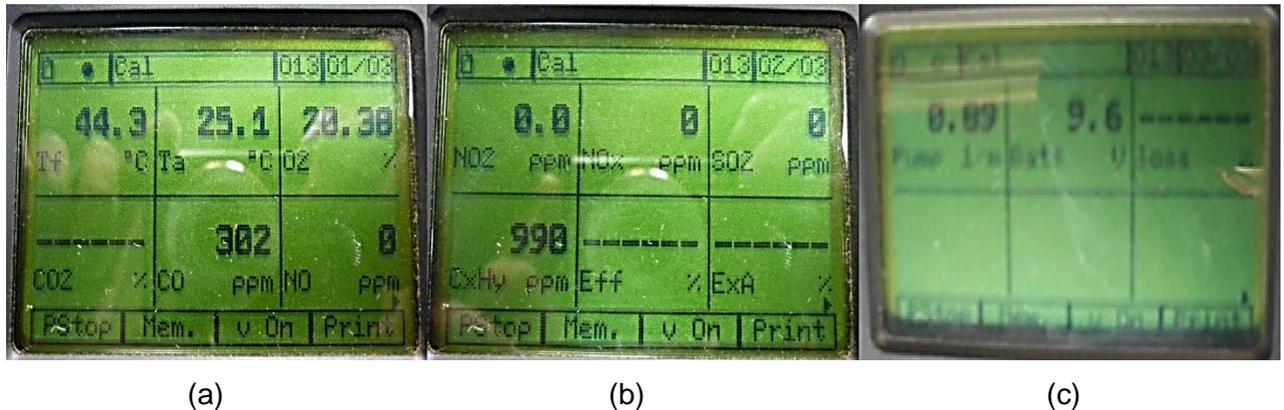


Figura 1.7 Ventanas del visualizador (a) Ventana 1 (b) Ventana 2 (c) Ventana 3

No se pudo obtener los valores de cada parámetro en el mismo instante de tiempo, debido a que solo se podía visualizar una ventana a la vez. Las ventanas 1 y 2 muestran las concentraciones de los componentes, los cuales son los parámetros de mayor interés para este trabajo de tesis. La ventana 3 solo muestra los datos técnicos del analizador; tales como el caudal de la bomba de succión de la muestra de gas, que realiza un recorrido desde la sonda hasta el analizador; y el voltaje de la batería del analizador.

Para la calibración del analizador, se cubrió la boquilla de la sonda de muestreo y se pone la opción "zeroing phase" para establecer el punto cero. En la figura 1.8 se muestra un ejemplo del proceso de calibración de un analizador TESTO 350-XL en el momento para establecer el punto cero.

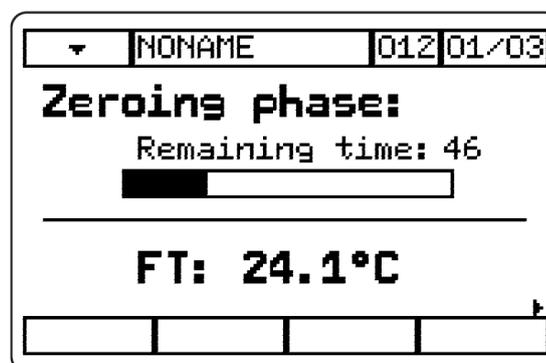


Figura 1.8. Visualizador del TESTO 350-XL durante calibración (Estableciendo el punto cero)

[Ref. 1.30].

### 1.4.1 Fragua

La sonda de muestreo del analizador de gases de combustión no puede ingresar al corazón de la fragua para captar las emisiones, debido a las altas temperaturas (Sección 1.2.1). Por esta razón, fue necesaria la introducción de la sonda en la zona de escape de la fragua. Para ello, se realizó un arreglo en la tubería de escape. Ello consistió en el montaje de un niple de acero de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro de manera transversal al ducto de escape. Este accesorio estuvo ubicado aproximadamente a unos 2,30 metros sobre nivel del piso. Se utilizó soldadura GMAW para la unión entre ambos elementos. El arreglo incluye un tapón macho de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro para evitar la fuga de gases. La figura 1.9 muestra la instalación del niple de acero en la zona de escape de la fragua.



Figura 1.9. Arreglo en el ducto de escape de la fragua.

Gracias a esto, se pudo colocar la sonda directamente en la zona de escape de la fragua y así obtener resultados con mayor precisión. Uno de los beneficios de tomar los datos en el escape es que la distribución de los gases es más estable.

Se simuló un trabajo de forja de aproximadamente 29 minutos de duración y se pudo detectar la concentración de las emisiones en tiempo real.

En el plano adjunto LM3-A2 se muestra el detalle del arreglo para realizar la toma de datos.

#### 1.4.2 Soldadura

Debido a las instalaciones del taller, no se pudo realizar un arreglo en el cual se pueda colocar la sonda de manera adecuada. Es por ello que se realizaron las pruebas lo más cerca posible a la zona de trabajo. Se tomaron datos para el proceso SMAW con electrodo celulósico y rutílico durante una sesión del curso Taller de Procesos de Manufactura.

### 1.5 Resultados

#### 1.5.1 Fragua

Para la fragua del Laboratorio, se obtuvo hasta 291 tomas de valores de monóxido de carbono (CO) y monóxido de nitrógeno (NO) de manera simultánea en la ventana 1 y 99 tomas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en simultáneo en la ventana 2 del visualizador. Se procede a comparar los resultados con la concentración de gases de fragua calculada en la sección 1.2.1. Para ello, se deben cambiar las unidades de concentración calculadas, de mg/m<sup>3</sup> a ppm. En la ecuación 2.16 se muestra con mayor detalle esta conversión y en la tabla 1.14 se muestra esta comparación. Se considerará que las concentraciones calculadas y las obtenidas por experimentación están a las mismas condiciones de presión y temperatura.

Tabla 1.14. Concentración de gases de fragua en la toma de datos y los obtenidos por cálculo

Elementos	Concentración Promedio (ppm)	Concentración calculada	
		mg/m <sup>3</sup>	ppm
CO	<b>273,36</b>	-	-
NO	<b>4,01</b>	-	-
NO <sub>2</sub>	<b>0</b>	-	-
NO <sub>x</sub>	<b>3,47</b>	<b>15,4</b>	<b>15,9</b>
SO <sub>2</sub>	<b>5,17</b>	<b>72,1</b>	<b>34,9</b>

Si bien se alcanzó valores máximos para las concentraciones obtenidas por cálculo, se elegirán los datos obtenidos durante el experimento debido a que presenta información más completa con respecto a cada elemento contaminante. Además, las condiciones bajo las cuales se han calculado estos valores son lejanas a las del Laboratorio de Manufactura (Sección 1.2.1).

La concentración de NO<sub>2</sub> resultó ser nula, esto se debe a que los valores de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son aproximadamente iguales a los valores de monóxido de nitrógeno (NO) durante casi toda la toma de datos. Para este trabajo de tesis, se tomarán los resultados obtenidos de NO debido a que tiene mayor número de lecturas. Además, no existen valores límite permisibles para toda la familia de compuestos de NO<sub>x</sub>, por lo cual no será posible una comparación. Además de ello, no se configuró el analizador para lecturas de concentración de CO<sub>2</sub> y los gases de combustión alcanzaron una temperatura máxima de 97,6 °C.

Se procede a comparar los resultados con los valores límites establecidos por la EPA y la ACGIH para el aire exterior y el aire interior. Se asumirá que los resultados obtenidos se mantienen constantes y que, si la toma hubiera durado 1 hora, se obtendrían los mismos valores. Se realiza esta suposición debido a que las normas internacionales toman como base 1 hora de exposición a los agentes químicos. La comparación se muestra en la tabla 1.15.

Tabla 1.15. Tabla comparativa entre resultados obtenidos y normas internacionales.

Agente químico	Símbolo	Toma de datos		EPA (aire exterior)		ACGIH (aire interior)	
		Concentración (ppm)	Tiempo promedio*	Concentración máxima (ppm)	Tiempo promedio	Concentración máxima (ppm)	Tiempo promedio
Monóxido de carbono	CO	<b>273,36</b>	1 hora	<b>35</b>	1 hora	<b>25</b>	8 horas
Monóxido de nitrógeno	NO	<b>4,01</b>	1 hora	-	-	<b>25</b>	8 horas
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	<b>5,17</b>	1 hora	<b>0,075</b>	1 hora	<b>0,25</b>	15 minutos

\*Se asumió que los valores obtenidos serían los mismos si la toma de datos hubiera durado 1 hora, para poder comparar con la norma.

Es evidente la alta concentración de monóxido de carbono que puede producir el proceso de forjado manual. Asimismo, se procede a comparar los resultados con las normas publicadas por la Organización Mundial de la Salud, en sus Guías de Calidad del Aire en Interiores ya mencionadas. La tabla 1.16 muestra la comparación de concentraciones para 30 minutos de exposición de monóxido de carbono.

Tabla 1.16. Concentración de CO en un tiempo de 30 minutos.

Concentración obtenida (ppm)	OMS (ppm)
<b>273,36</b>	<b>52,39</b>

Los resultados de la concentración de gases de la fragua se muestran en el Anexo 1.

### 1.5.2 Soldadura

Para el proceso de soldadura, solo se pudo obtener hasta 13 tomas de valores de monóxido de carbono (CO) y monóxido de nitrógeno (NO) de manera simultánea y 9 tomas de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La poca cantidad de tomas se debe a que el tiempo de soldeo es bajo y solo se pudo. Es por ello que solo se tomará el máximo valor obtenido para el diseño del sistema. Los valores de concentración máximos obtenidos se muestran en la tabla 1.17.

Tabla 1.17. Concentraciones máximas de gases de soldadura en ppm.

Elementos	Electrodos	
	Celulósico	Rutílico
CO	<b>25</b>	<b>75</b>
NO	<b>167</b>	<b>91</b>
NO <sub>2</sub>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>
NO <sub>x</sub>	<b>172</b>	<b>195</b>
SO <sub>2</sub>	<b>0</b>	<b>0</b>

Los resultados obtenidos para el proceso de soldadura deben compararse con los valores límites permisibles – exposición a corto plazo (TLV-STEL) propuesta por la

ACGIH. Sin embargo, no existen límites de concentración para esos gases en particular. En el capítulo 2 se da mayor detalle acerca de las características de los gases de soldadura.

### 1.6 Requerimientos para el diseño

Ante los resultados obtenidos y las condiciones de trabajo de los técnicos de Laboratorio, se presenta la necesidad de un sistema de extracción y tratamiento de los gases de combustión de la fragua y de las emisiones de soldadura por arco eléctrico. El diseño del sistema debe asegurar la prevención de los trabajadores de la exposición a las emisiones y a sus efectos. También, este diseño deberá evitar la contaminación al medio ambiente y a la salud pública dentro del campus de la universidad.

Para el diseño de los sistemas de extracción y tratamiento de gases, se debe determinar las condiciones del Laboratorio de Manufactura; así como los requisitos que se deben considerar antes del diseño:

- Las instalaciones de soldadura y de forja se encuentran distribuidas en un área de 12,65 x 7,76 m<sup>2</sup>.
- El Laboratorio tiene una altura de 4,2 metros aproximadamente.
- El techo es de calamina y está hecho de asbesto. Solamente es factible la instalación de una tubería de escape que atraviese el techo, de ser así el diseño de la zona de escape.
- No es factible la instalación de equipos en los exteriores del Laboratorio de Manufactura, ya que está rodeado de áreas verdes y una vereda para el paso peatonal.
- Se asumirá que las temperaturas de los gases de combustión del carbón y de los gases de soldadura son de 100°C (ver anexos 1 y 2).
- Existe la posibilidad de que corrientes de aire que atraviesan las ventanas puedan direccionar los gases de combustión del carbón hacia otras zonas de trabajo.
- Las cabinas de soldadura se encuentran en una zona de poca ventilación. Por esta razón, es probable que se produzca un reingreso de los humos de soldadura hacia el recinto.

- De acuerdo a la disposición del Laboratorio de Manufactura y a la naturaleza de las emisiones producidas en cada proceso, los dos sistemas de extracción serán independientes uno del otro.
- Para ambos sistemas, las campanas colectoras serán estáticas debido a que los técnicos no necesitan realizar muchos movimientos que puedan afectar la extracción de los gases.
- Se tomará como prioridad aislar el foco contaminante del personal técnico; siempre y cuando, las condiciones lo permitan.
- El diseño del sistema de extracción de gases de soldadura constará de un ventilador para todas las cabinas. Esto implica que todos los ductos estarían conectados mediante ramales, hasta terminar en un ducto principal que conduciría los gases hasta el equipo de tratamiento de gases y el ventilador.
- Para el sistema de extracción de gases de soldadura, se aprovechará el espacio disponible por la cabina 4 para la disposición del equipo de tratamiento de gases y del ventilador.

## REFERENCIAS CAPITULO 1

- [1.1]. INNOVAPUCP. Infraestructura de laboratorios. Laboratorio de Manufactura.  
<http://innovapucp.pucp.edu.pe/infraestructura-de-laboratorios/laboratorio-de-manufactura/>
- [1.2]. PUCP. Dirección de Informática. Puntos de acceso.  
<http://redpucp.pucp.edu.pe/puntos.php?id=34#1>
- [1.3]. GROOVER, Mikell. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 4<sup>th</sup> Edition.* 2010. p.405
- [1.4]. ACEROS AREQUIPA. Carpintería Metálica.  
<http://www.acerosarequipa.com/carpinteria-metalica.html>
- [1.5]. BUFFALO FORGE COMPANY. *General Catalog.* 1929. p. 11
- [1.6]. AVALLONE, Eugene. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11<sup>th</sup> Edition.* 2007. p.13-14
- [1.7]. Ibíd. p. 4-30
- [1.8]. GREYSTONE FORGE. Proveedor de fraguas. Administrador: Mike Judd. USA. Disponible en: <http://www.greystoneforge.com>
- [1.9]. ANVILFIRE. *Recurso para herreros y carpinteros metálicos. Administrador: Jock Dempsey. USA.* <http://www.anvilfire.com/index.htm>
- [1.10]. KAYNE & SON BLACKSMITH DEPOT. *Proveedores de equipos y herramientas de herrería.* <http://www.blacksmithsdepot.com>
- [1.11]. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM). Balance Nacional de Energía 2012. p. 88.
- [1.12] U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *World Coal Quality Inventory: South America.* Capítulo 6: *World Coal Quality Inventory: Peru.* 2006. p. 177. Tabla 3.
- [1.13]. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors – “Anthracite Coal”.* (Vol. I). 1995. p. 1.2-2. Research Triangle Park, North Carolina, USA.

- [1.14]. Ibíd. p. 1.2-2.
- [1.15]. Ibíd. p. 1.2-1, 1.2-4
- [1.16]. Ibíd. p. 1.2-5. Tabla 1.2-1
- [1.17]. Ibíd. p. 1.2-8. Tabla 1.2-4
- [1.18]. ASOCIACIÓN DE ESTUDIANTES Y ASOCIADOS DE INGENIERÍA MECÁNICA (ASEIMEC).  
Video disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=2WcJYHYhQs>
- [1.19]. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors – “Electric Arc Welding” (Vol. I)*. 1995. p. 12.19-3. Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- [1.20]. Ibíd. p. 12.19-3
- [1.21]. Ibíd. p. 12.19-4 hasta 12.19-7
- [1.22]. SOLDEXA S.A. Manual de Soldadura & Catálogo de Productos. 7ma Edición. p. 151-152
- [1.23]. Ibíd. p. 155
- [1.24]. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/criteria.html>
- [1.25]. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH). *Threshold Limit Values (TLV's) and Biological Exposure Indices (BEI's)*. 2012. p. 3.
- [1.26]. Ibíd. p. 4
- [1.27]. Ibíd. p. 10 – 61. TLV's de todos los componentes.
- [1.28]. ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). *Environmental Health Criteria 213: Carbon Monoxide. 2<sup>nd</sup> Edition*.
- [1.29]. TESTO, Inc. Sistema Portátil de Análisis de Productos de la Combustión testo 350. p. 2
- [1.30]. TESTO, Inc. *Instruction Manual*. p. 2.4-3

## CAPITULO 2

### DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE GASES

#### 2.1 Generalidades

Un sistema de extracción debe ser diseñado correctamente, esto incluye los ductos conectados a la campana extractora, ventiladores y equipos de tratamiento de gases. El procedimiento de diseño no solo consiste en unir partes de una línea de tubería. Se debe asegurar un flujo de aire y un nivel de presión de aire para que todo el sistema pueda extraer los contaminantes de manera adecuada.

Para ello, siguiendo las recomendaciones de la ACGIH, de ASHRAE y de la AWS, se seguirá el siguiente procedimiento para el diseño de los sistemas:

- Identificación de las fuentes de contaminación y tamaño de partícula del contaminante (hecho).
- Establecer las velocidades de captura y transporte a lo largo del sistema.
- Seleccionar el tipo de campana extracción o tipo de extracción del contaminante en cada fuente, para poder definir la geometría, según las características de cada proceso en el Laboratorio.
- Establecer un caudal para cada fuente de contaminación.

- Realizar un esquema preliminar del sistema: Consideraciones en los alrededores del proceso (construcción, medio ambiente, espacio disponible), localización del escape del aire extraído, para evitar re-ingreso del mismo al espacio interior, ergonomía, etc.
- Una vez establecido el sistema, se procede a realizar los cálculos correspondientes, tales como el diámetro de las tuberías y caídas de presión en cada tramo de tubería del sistema.
- Seleccionar el ventilador y los equipos de tratamiento de aire correspondientes a cada proceso.

Todo sistema de extracción localizada está compuesto por: Campanas extractoras, ductos, ventiladores y equipos de tratamiento de aire.

## 2.2 Sistemas de ventilación

Los procesos industriales modernos emplean un gran número de compuestos químicos y sustancias que son considerados tóxicos. Entre ellos, se produce material particulado, elementos gaseosos, vapores, humos en la zona de trabajo que exceden los valores de concentración límite (TLV). Por ello, es necesario que se cumplan las normas de seguridad ocupacional y ambiental mediante un sistema de ventilación adecuado. Los sistemas de ventilación se dividen en dos grandes categorías:

### 2.2.1 Sistemas de impulsión

Tienen como objetivo suministrar aire templado para crear ambientes confortables en el interior (sistemas HVAC<sup>7</sup>) y para reemplazar el aire extraído de la zona de trabajo (sistemas de sustitución).

---

<sup>7</sup> También conocidos como sistemas de climatización. Las siglas vienen del inglés: Heating, Ventilation and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado).

### 2.2.2 Sistemas de extracción

Son empleados para remover los contaminantes generados por un proceso (gases, humos, vapores, etc.), con el fin de mantener un ambiente de trabajo saludable. A su vez, los sistemas de extracción pueden clasificarse en dos grupos:

#### Sistemas de extracción general

Este tipo de sistemas es empleado para controlar el nivel de calor y para la extracción de contaminantes generados en un ambiente. Esto se realiza con la inyección de grandes cantidades de aire hacia el recinto. Para el control de la contaminación, el sistema es denominado sistema de ventilación general por dilución, y es necesaria una cantidad suficiente de aire exterior para que sea mezclado con el contaminante. De este modo, la concentración de contaminante sería menor (ver Figura 2.1).

En la mayoría de casos, el aire contaminado es descargado directamente hacia la atmósfera. Es común también el uso de sistemas de impulsión para reemplazar el aire extraído. Normalmente, estos sistemas son empleado solo cuando no es factible la instalación de un sistema de extracción localizada; ya que se requieren grandes cantidades de aire para compensar el aire extraído, y ello conlleva a altos costos de operación.

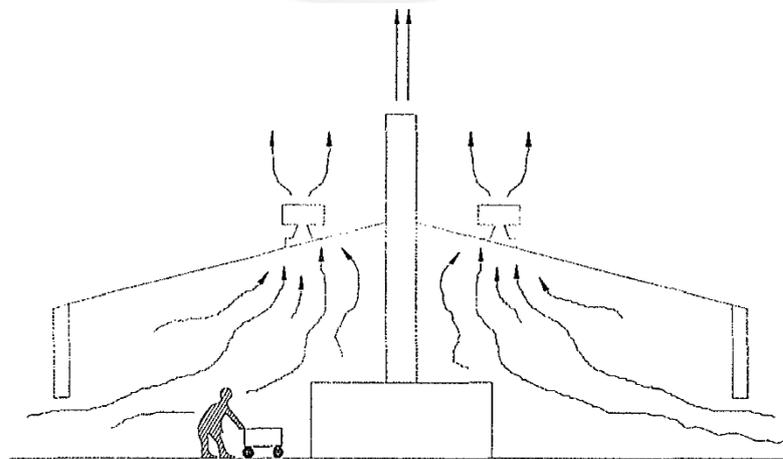


Figura 2.1. Ventilación general por dilución [Ref. 2.1]

## Sistemas de extracción localizada

Estos sistemas operan bajo el siguiente principio: capturar el contaminante en la misma fuente de generación, o en una zona muy cercana (ver Figura 2.2). Es el método más escogido para el control de contaminantes debido a su efectividad y menor cantidad de aire de extracción, lo que resulta en menores costos de operación en comparación con los sistemas de extracción general. Además, en la actualidad, se requiere la necesidad de equipos eficientes para sistemas de ventilación industrial.

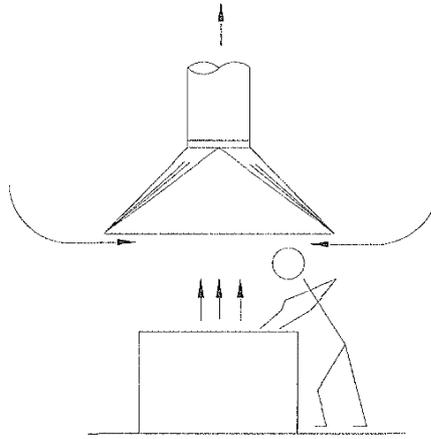


Figura 2.2. Extracción localizada [Ref. 2.2]

En la figura 2.3 se indica la nomenclatura para todo sistema de extracción localizada. Los parámetros mostrados en la figura se definirán con más detalle más adelante.

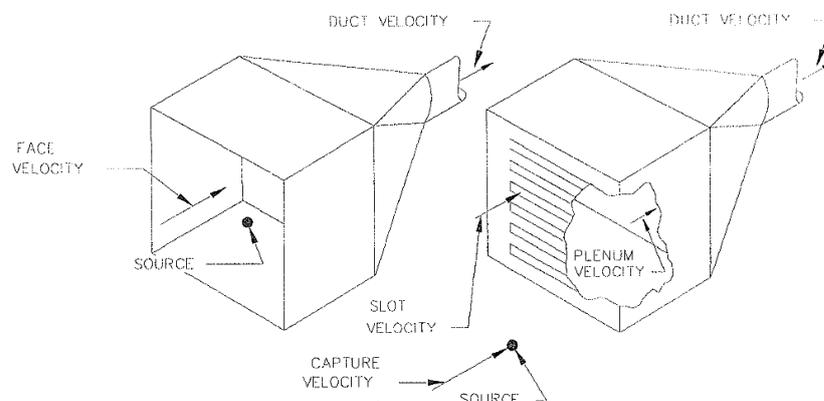


Figura 2.3. Nomenclatura de sistemas de extracción localizada [Ref. 2.3]

### 2.3 Velocidades de captura

La ACGIH define velocidad de captura como la velocidad del aire extraído en cualquier punto fuera de la campana de extracción, o, en la misma entrada de la campana. Esta velocidad debe ser la necesaria para superar corrientes de aire y capturar el contaminante hasta conducirlo dentro de la campana. Los rangos de velocidad de captura recomendados dependerán de las condiciones dentro del recinto y del tipo de contaminante emitido por cada proceso. La velocidad de aire es función del caudal de aire aspirado y de la forma de la campana. Es por ello que se debe diseñar previamente la campana extractora para definir una velocidad de captura para el sistema. En la tabla 2.1 se indican las velocidades de captura recomendados según las condiciones de generación de los contaminantes.

Tabla 2.1 Rango de velocidades de captura recomendados [Ref. 2.4]

Condición de la generación de contaminantes	Ejemplos típicos	Velocidad de captura (fpm)	Velocidad de captura (m/s)
Liberado prácticamente sin velocidad en aire tranquilo	Evaporación en tanques, solventes desengrasantes	50 – 100	0,254 – 0,508
Liberado a baja velocidad en aire moderadamente quieto	Sprays, soldadura, enchapados, velocidad de transporte bajas	100 – 200	0,508 – 1,016
Generación activa en zona de movimiento rápido de aire	Sprays en cabinas pequeñas, prensado, chancadoras.	200 – 500	1,016 – 2,54
Liberado a velocidad inicial muy alta en zona de movimiento rápido de aire	Lijados, granallados, arenados, limpieza metálica	500 – 2000	2,54 – 10,16

#### Selección de velocidades de captura recomendadas

La selección de los rangos de velocidad de captura dependerá de las condiciones presentes en el Laboratorio de Manufactura. Normalmente, se seleccionan los límites inferiores cuando:

- Cuando las corrientes de aire dentro del recinto son mínimas y favorecen la captura del contaminante

- La toxicidad del contaminante es baja
- El proceso es de baja producción
- El área de emisión es relativamente grande y favorece la captura de los gases con una campana extractora grande.

En el caso del Laboratorio de Manufactura, se tiene que en la Zona de Forja pueden haber corrientes de aire fuertes a través de las ventanas. En la Zona de Soldadura no existe la posibilidad de corrientes de aire muy fuertes; por eso se puede clasificar como una zona de aire tranquilo.

Considerando las altas temperaturas de las emisiones en ambos procesos, se considerará una liberación de contaminante a baja velocidad en aire moderadamente quieto (segunda condición). Además, los gases de combustión de la fragua son de baja toxicidad y los humos de soldadura son de más alta toxicidad, debido a su gran variedad de componentes cancerígenos concentrados en un solo punto.

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) establece que las velocidades de captura en la zona de soldeo no debe superar los 100 fpm (0,5 m/s) [Ref. 2.5]. Esto es para prevenir cualquier perturbación del arco eléctrico. Esta recomendación de velocidad máxima es dada por motivos de calidad de la soldadura, más que de control de contaminación para la protección de la salud de los técnicos.

Por lo tanto, siguiendo la tabla 2.1 y las recomendaciones de la AWS, se tiene que el rango de velocidad de captura seleccionado para el sistema de extracción de la fragua es de 100 a 500 fpm (0,508 a 2,54 m/s), siendo el valor promedio 300 fpm (1,524 m/s) y para el sistema de extracción de los gases de soldadura, solo se establecerá una velocidad de captura de 100 fpm (0,508 m/s).

## 2.4 Velocidades de transporte en los ductos

La velocidad en los ductos se inicia inmediatamente después de la campana de extracción y es determinada por el tipo de contaminante que está siendo transportado. Para este diseño se requiere una velocidad mínima de transporte para prevenir la

deposición y taponamiento de los ductos a causa del material particulado. Por otro lado, una velocidad excesivamente alta implica una mayor pérdida de energía y puede causar abrasión en los ductos. Existen otros factores que influyen en la selección de una velocidad de transporte:

- Abolladuras en los ductos, que incrementa la resistencia al fluido y disminuye el flujo y la velocidad del aire en la zona dañada
- Pequeñas fugas en los ductos aumentarían el flujo y velocidad del aire después la fuga (aguas abajo), pero se disminuirían estos valores antes de la fuga (aguas arriba) y en otras partes del sistema
- Corrosión del rotor del ventilador o deslizamiento de la correa del ventilador reducirían el flujo y la velocidad del aire.
- Las velocidades de transporte del sistema deben poder recoger o arrastrar el polvo que ha estado asentado debido a una mala operación del sistema.

En la tabla 2.2 se muestran las velocidades de transporte recomendados según el tipo de contaminante.

Tabla 2.2. Rango de velocidades de transporte [Ref. 2.6]

Contaminante	Ejemplos típicos	Velocidad de transporte (fpm)	Velocidad de transporte (m/s)
Vapores, gases, humos	Todos los vapores, gases y humos.	1000 – 2000	5,08 – 10,16
Humos (fumarolas)	Soldadura.	2000 – 2500	10,16 – 12,70
Polvo muy fino	Fibra de algodón, aserrín, polvo litográfico.	2500 – 3000	12,70 – 15,24
Polvos secos	Polvo plástico, polvo de baquelita, fibra de yute, polvo de algodón, viruta (liviano), polvo de jabón, virutas de telas de cuero.	3000 – 4000	15,24 – 20,32

Tabla 2.2. Rango de velocidades de transporte (continuación) [Ref. 2.6]

Contaminante	Ejemplos típicos	Velocidad de transporte (fpm)	Velocidad de transporte (m/s)
Polvo industrial promedio	Polvo de molienda, hilachas a base de pulido (seco), polvo de yute de lana (resto de zaranda), granos de café, calzado, polvo de granito, harina de sílice, manejo de materiales en general, corte de ladrillos, polvo de arcilla, fundición en general, polvo de caliza, asbestos en procesos textiles.	3500 – 4000	17,78 – 20,32
Polvos pesados	Aserrín (pesado y húmedo), residuos metálicos de torneado, fundición en tambor giratorio y agitadores, chorros de arena, polvo de bloques de madera, virutas metálicas, polvo de hierro fundido, polvos de plomo.	4000 – 4500	20,32 – 22,86
Polvos pesados húmedos	Polvos de plomo con pequeñas astillas, polvos de cemento húmedo, trozos de asbestos de máquinas cortadoras de tubería en transición, hilachas a base de pulido (viscoso), polvo de cal viva.	4500 a más	22,86 a más

Los productos de la combustión del carbón antracita y los gases de soldadura pueden clasificarse como vapores, gases, humos y fumarolas. Por lo tanto, siguiendo la tabla 2.2, las velocidades de transporte en los ductos para el sistema de extracción de los gases de fragua están en el rango de 1000 – 2000 fpm (5,08 – 10,16 m/s) y para el sistema de extracción de los gases de soldadura, en el rango de 2000 – 2500 fpm (10,16 – 12,7 m/s).

## 2.5 Flujo de gases contaminantes

Se debe conocer la naturaleza de los gases contaminantes que se generan en cada proceso. En esta sección se determinarán algunas características de estos gases que serán necesarias para el diseño de la campana.

### 2.5.1 Gases de combustión del carbón antracita

#### Flujo másico de emisión de contaminantes

Para el proceso de combustión de la fragua, se determinará el flujo másico de contaminantes mediante estequiometría. Se realiza esta estimación para conocer las propiedades de los gases de combustión en el mismo foco de contaminación de la fragua. Se tomará en cuenta lo establecido en el capítulo 1, en donde se determinó un consumo total de carbón de 1,25 kg/h.

Previamente, también, se señaló en la tabla 1.6 las fracciones másicas del carbón empleado para el proceso de forja. Con estos valores se puede determinar el consumo parcial de cada componente por medio de la ecuación 2.1 [Ref. 2.7].

$$\dot{m}_{ci} = fm_i \times \dot{m}_c \quad (2.1)$$

Donde:

$\dot{m}_{ci}$  : Consumo de masa del componente i del carbón antracita [kg/h]

$\dot{m}_c$  : Tasa de consumo de carbón [1,25 kg/h]

$fm_i$  : Fracción másica del componente i [-]

Asimismo, se definirán los coeficientes estequiométricos del carbón antracita mediante la ecuación 2.2 [Ref. 2.8].

$$\dot{n}_i = \frac{\dot{m}_{ci}}{M_{ci}} \quad (2.2)$$

Donde:

$\dot{n}_i$ : Coeficiente estequiométrico del componente i del carbón antracita [kmol/h]

$\dot{m}_i$ : Consumo de masa del componente *i* del carbón antracita [kg/h]

$M_i$ : Masa molar del componente *i* del carbón antracita [kg/kmol]

Para la ecuación estequiométrica de la combustión del carbón de la fragua, se considerará una combustión incompleta, en donde no todos los elementos del combustible se oxidan completamente [Ref. 2.9]. Asimismo, se asumirá una temperatura de 1827 °C (2100 K) durante la combustión y un 20% de exceso de aire teórico. La ecuación estequiométrica se muestra en la ecuación 2.3, en donde cada letra minúscula representa el coeficiente estequiométrico del elemento que lo acompaña.



En la tabla 2.3 se indican las fracciones másicas, masas molares y los coeficientes estequiométricos de cada componente. El procedimiento de cálculo de estos valores se muestra en el Anexo 3.

Tabla 2.3. Coeficientes estequiométricos y masas molares de cada componente.

Partes	Elementos y compuestos	Fórmula	Masa molar (kg/kmol)	Coficiente estequiométrico (kmol/h)
Carburante	Carbono	C	12,01	0,095
	Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2,02	0,007
	Oxígeno	O <sub>2</sub>	32,00	0,0008
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28,01	0,00025
	Azufre	S	32,07	0,00014
	Agua (Humedad)	H <sub>2</sub> O	18,02	0,0033
Aire	Oxígeno	O <sub>2</sub>	32,00	0,194
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28,01	0,733

Tabla 2.3. Coeficientes estequiométricos y masas molares de cada componente (continuación).

Partes	Elementos y compuestos	Fórmula	Masa molar (kg/kmol)	Coefficiente estequiométrico (kmol/h)
Productos	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,01	0,0941
	Agua	H <sub>2</sub> O	18,02	0,01
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28,01	0,73
	Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	64,07	0,00014
	Monóxido de nitrógeno	NO	30,01	0,0067
	Oxígeno	O <sub>2</sub>	32,00	0,0935
	Monóxido de carbono	CO	28,01	0,00084

Con estos valores obtenidos, se debe calcular el flujo másico de los gases de combustión por medio de la ecuación 2.4 [Ref. 2.7].

$$\dot{m}_{gf} = \sum \dot{m}_{pi} \quad (2.4)$$

Donde:

$\dot{m}_{gf}$  : Flujo másico de los gases de combustión de la fragua [kg/h]

$\dot{m}_{pi}$  : Flujo másico del producto i [kg/h]

El flujo másico de cada componente se puede determinar mediante la ecuación 2.5.

$$\dot{m}_{pi} = \dot{n}_{pi} \times M_{pi} \quad (2.5)$$

Donde:

$\dot{n}_{pi}$  : Coeficiente estequiométrico del producto i [kmol/h]

$M_{pi}$  : Masa molar del producto  $i$  [kg/kmol]

Una vez que se han definido estas ecuaciones, se procede a calcular el flujo másico de los gases de combustión de la fragua.

$$\dot{m}_{gf} = 28 \text{ kg/h}$$

### Densidad de gases contaminantes

Con el valor del flujo másico de gases contaminantes obtenido, se procede a calcular el valor de la densidad para obtener el flujo volumétrico. Para ello, se asumirá que los gases de combustión de la fragua están formados por una mezcla de gases ideales. De esta manera, se puede determinar la densidad por medio de la ecuación 2.6. Esta representa la ecuación de estado del gas ideal [Ref. 2.10].

$$P_{atm} \times v_{gf} = R_{gf} \times T_{gf} \quad (2.6)$$

Donde:

$P_{atm}$  : Presión atmosférica [kPa]

$v_{gf}$  : Volumen específico de los gases de combustión de la fragua [m<sup>3</sup>/kg]

$R_{gf}$  : Constante de los gases de combustión de la fragua [kJ/kg-K]

$T_{gf}$  : Temperatura de los gases de combustión de la fragua [K]

La densidad de los gases puede ser expresada modificando la ecuación 2.6 de la siguiente manera:

$$\rho_{gf} = \frac{P_{atm}}{R_{gf} \times T_{gf}} \quad (2.7)$$

Para poder determinar la constante de los gases de combustión se emplea la ecuación 2.8.

$$R_{gf} = \sum f m_{pi} \times R_{pi} \quad (2.8)$$

Donde:

$R_{pi}$  : Constante del producto  $i$  [Kj/kg-K]

$f m_{pi}$  : Fracción másica del producto  $i$  [-]

La constante de gases de un componente se define por la relación entre la constante universal de los gases con su masa molecular (ver ecuación 2.9) [Ref. 2.11].

$$R_{pi} = \frac{R_U}{M_{pi}} \quad (2.9)$$

Donde:

$R_U$  : Constante universal de los gases [8,314 kJ/kmol-K] [Ref. 2.12]

Se puede determinar la fracción másica de los productos de la combustión modificando la ecuación 2.1 de la siguiente manera:

$$f m_{pi} = \frac{\dot{m}_{pi}}{\dot{m}_{gf}} \quad (2.10)$$

Una vez que están definidas estas ecuaciones, se procede a calcular cada uno de los parámetros. La tabla 2.4 indica los valores de flujo másico (ecuación 2.5), fracciones másicas (ecuación 2.10) y constante de los gases (ecuación 2.9) de cada producto de la combustión de carbón antracita.

Tabla 2.4. Flujos máxicos, fracciones máxicas y constante R de productos de combustión de carbón antracita en la fragua.

Productos	Fórmula química	Flujo máxico de componente (kg/h)	Fracción máxica (%)	Constante $R_{pi}$ (Kj/kg-K)
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	4,14	14,78	0,18891
Agua	H <sub>2</sub> O	0,19	0,67	0,46138
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	20,44	73,02	0,29682
Dióxido de azufre	SO <sub>2</sub>	0,01	0,03	0,12977
Monóxido de nitrógeno	NO	0,20	0,72	0,27709
Oxígeno	O <sub>2</sub>	3,00	10,69	0,25981
Monóxido de carbono	CO	0,02	0,08	0,29682

Por lo tanto, al aplicar la ecuación 2.8, se puede determinar la constante de los gases de combustión del carbón antracita, habiendo considerado que estos gases son ideales.

$$R_{gf} = 0,278 \frac{kJ}{kg - K}$$

Se procede a reemplazar los valores de presión atmosférica<sup>8</sup> ( $P_{atm}$ ), temperatura de los gases de combustión ( $T_{gf}$ ) y constante de los gases ( $R_{gf}$ ) en la ecuación 2.7 para calcular la densidad de los gases

$$\rho_{gf} = 0,174 \frac{kg}{m^3}$$

<sup>8</sup> Se consideró una presión atmosférica de 14,7 psi ó 101,325 kPa.

Una vez obtenida la densidad de los gases, se puede obtener el flujo volumétrico de los gases de combustión. Este valor será empleado para el diseño del sistema de extracción de gases de fragua

$$\dot{V}_{gf} = 0,045 \frac{m^3}{s}$$

### 2.5.2 Humos de soldadura

En el caso del proceso de soldadura por arco eléctrico, no sería factible realizar una estimación estequiométrica debido a la gran variedad de productos que comprenden los humos. Estos productos dependen tanto del material del electrodo como el material base y los óxidos que se generan durante la soldadura. Es por ello, que se realizará una estimación en base a lo obtenido en el análisis de gases, los datos técnicos de los electrodos, entre otros.

Existen parámetros de soldadura que se pueden regular antes de comenzar el proceso SMAW y que influyen en la tasa de generación de humos de soldadura. En la tabla 2.5 se muestran los parámetros de soldadura aplicados en cada sesión en el Laboratorio de Manufactura.

Tabla 2.5. Parámetros de soldadura para cada sesión de Laboratorio.

Tipos de electrodo	Tensión en vacío (V)	Tensión de trabajo (V)	Espesor de metal base (mm)	Diámetro del alma del electrodo (mm)	Longitud del electrodo (mm)	Amperaje (A)
E6011	71	29 – 30	12,7	3	350	85
E6013						115

Sin embargo, existen otros parámetros que no son ajustables debido a que depende de otros factores, tales como la composición del electrodo, la velocidad de desplazamiento del electrodo, las propiedades del mismo proceso SMAW, entre otros. Algunos de estos parámetros se expondrán a continuación.

## Eficiencia de deposición

La eficiencia de deposición es un valor que depende del tipo de proceso de soldadura y es relevante para determinar el flujo de gases contaminantes. INDURA S.A., una compañía de soldadura de gran envergadura, establece que la eficiencia de deposición se encuentra en un rango de 60 – 80 % para electrodos revestidos en procesos SMAW [Ref. 2.13]. La eficiencia de deposición se define como la relación entre el peso del cordón de soldadura con respecto al peso del electrodo consumido. En la tabla 2.6 se indican los valores de eficiencia de deposición por tipo de electrodo.

Tabla 2.6. Eficiencias de deposición por tipo de electrodo en procesos SMAW [Ref. 2.13].

Proceso	Eficiencia de deposición (%)
Electrodo manual celulósico (E6011)	60
Electrodo manual rutílico (E6013)	70 – 80

La eficiencia de deposición se define por medio de la ecuación 2.11 [Ref. 2.14].

$$\eta_{depE} = \frac{\dot{m}_{dep}}{\dot{m}_{CE}} \quad (2.11)$$

Donde:

$\eta_{depE}$  : Eficiencia de deposición del electrodo E [-]

$\dot{m}_{depE}$  : Tasa de deposición del electrodo E [kg/h]

$\dot{m}_{CE}$  : Tasa de consumo del electrodo [kg/h]

El caso más crítico es el de menor eficiencia. Por ello, se tomará el valor mínimo para cada electrodo.

$$\eta_{depE6011} = 60 \%$$

$$\eta_{depE6013} = 70 \%$$

### Tasa de consumo del electrodo

Para determinar la tasa de consumo del electrodo, se llevó a cabo una prueba durante una sesión de soldadura. La prueba consistió en realizar dos cordones de soldadura en una placa de acero. Cada cordón fue realizado por un electrodo. Durante la prueba se registró los tiempos de duración de cada cordón y el peso del electrodo consumido durante la prueba. En la figura 2.4 se muestran los cordones de soldadura realizados.



Figura 2.4. Cordones de soldadura con electrodo E6011 (superior) y E6013 (inferior).

La ecuación 2.12 define la tasa de consumo del electrodo. Este parámetro depende de los datos obtenidos en la prueba.

$$\dot{m}_{CE} = \frac{m_{EC} \times 3600}{t_{CS}} \quad (2.12)$$

Donde:

$\dot{m}_{CE}$  : Tasa de consumo del electrodo E [kg/h]

$m_{EC}$  : Peso del electrodo E consumido [kg]

$t_{CS}$  : Tiempo de duración del cordón de soldadura [s]

### Tasa de generación de humos y gases de soldadura

Durante el proceso de soldadura, el electrodo se consume y genera el material de aporte necesario para el cordón. Al mismo tiempo, genera escoria, salpicaduras y emisiones de soldadura. Estas emisiones se clasificaron previamente como una mezcla de humos (material particulado) y gases. Para facilitar el cálculo, se asumirá que las escorias y salpicaduras están incluidas en la deposición de soldadura. De esta manera, se puede volver a definir la tasa de consumo del electrodo por medio de la ecuación 2.13. Asimismo, se define la tasa de generación de humos y gases de soldadura mediante la ecuación 2.14.

$$\dot{m}_{CE} = \dot{m}_{depE} + \dot{m}_{HGS} \quad (2.13)$$

Donde:

$\dot{m}_{HGS}$  : Tasa de generación de humos y gases de soldadura [kg/h]

$$\dot{m}_{HGS} = \dot{m}_{HS} + \dot{m}_{GS} \quad (2.14)$$

Donde:

$\dot{m}_{HS}$  : Tasa de generación de humos de soldadura [kg/h]

$\dot{m}_{GS}$  : Tasa de generación de gases de soldadura [kg/h]

Según lo establecido en la tabla 1.8, se puede definir la tasa de generación de humos de soldadura mediante la ecuación 2.15.

$$\dot{m}_{HS} = F \cdot E_{HS} \times \dot{m}_{CE} \quad (2.15)$$

Donde:

$F \cdot E_{HS}$  : Factor de emisión total de humos de soldadura  
[kg de humos / kg de electrodo consumido]

Una vez que se definieron estos parámetros, se procede a calcular la tasa de generación de gases de soldadura por electrodo que se produce durante una sesión en el Laboratorio de Manufactura. En la tabla 2.7 se muestran los datos obtenidos en la prueba de soldadura y los valores calculados según las ecuaciones y los datos presentados hasta ahora en esta sección.

Tabla 2.7. Datos de la prueba de soldadura y tasas de generación de humos y gases de soldadura.

Parámetros	E6011	E6013
Peso de electrodo (kg)	0,027	0,038
Peso del electrodo después de la soldadura (kg)	0,012	0,023
Peso de electrodo consumido (kg)	0,015	0,015
Tiempo de duración de la soldadura (s)	47,57	34,47
Tasa de consumo del electrodo (kg/h)	1,135	1,567
Tasa de deposición (kg/h)	0,681	1,097
Tasa de generación de humos y gases (kg/h)	0,454	0,470
Tasa de generación de humos (kg/kg electrodo consumido) (*)	0,0384	0,0197
Tasa de generación de humos (kg/h)	0,044	0,031
Tasa de generación de gases (kg/h)	0,410	0,439

(\*) Ver tabla 1.7.

### Densidad de gases de soldadura

Para facilitar el cálculo de la densidad, se asumirá que cada componente de los gases de soldadura es un gas ideal. Solo se tomarán los máximos valores de concentración de los resultados obtenidos (ver anexo 2). Los datos se tomaron en el mismo punto donde se realiza la soldadura. Por ello, se puede afirmar que los gases de soldadura están a presión atmosférica (101,325 kPa).

Asimismo, se tomarán en cuenta los valores de concentración obtenidos en otros estudios. Por ejemplo, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), que trabaja junto con la OMS, ha realizado monografías para la evaluación de riesgos carcinogénicos en humanos, en las cuales se expone el estudio de varios agentes y sus efectos en la salud. Esta Agencia publicó varios estudios de diferentes

investigadores (Casciani, 1986) que determinaron las concentraciones de otros elementos gaseosos en procesos SMAW que serán incluidos en este trabajo de tesis. Los valores de concentración propuestos por la IARC se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Concentraciones de gases de soldadura por electrodo [Ref. 2.15].

Electrodo	Elementos y compuestos	Fórmula química	Concentración (mg/m <sup>3</sup> )
E6011	Flúor	F	0,83
E6013	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	1,09

Para mostrar todos los valores en una sola unidad, es necesario realizar la conversión de ppm a mg/m<sup>3</sup> y viceversa. La relación entre estas unidades se encuentra en la ecuación 2.16 [Ref. 2.16].

$$C_{i(ppm)} = \frac{C_{i(mg/m^3)} \times R_U \times T_i}{M_i \times P_i} \quad (2.16)$$

Donde:

$C_{i(ppm)}$  : Concentración del componente i en ppm

$C_{i(mg/m^3)}$  : Concentración del componente i en mg/m<sup>3</sup>

$R_U$  : Constante universal de los gases [8,314 kJ/kmol-K]

$T_i$  : Temperatura del componente i [K]

$M_i$  : Masa molar del componente i [kg/kmol]

$P_i$  : Presión absoluta del componente i [kPa]

Como se puede observar, esta ecuación se basa en el supuesto de que todos los gases de soldadura son ideales.

La tabla 2.9 muestra las concentraciones máximas obtenidas en la toma de datos y las concentraciones indicadas en la tabla 2.8 con las mismas unidades de medida, tanto en ppm como en mg/m<sup>3</sup>.

Tabla 2.9. Concentraciones de los gases de soldadura.

Electrodo	Elementos y compuestos	Fórmula química	Concentración (ppm)	Concentración (mg/m <sup>3</sup> )
E6011	Monóxido de carbono	CO	20	18,30
	Monóxido de nitrógeno	NO	167	163,72
	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	1,5	2,25
	Flúor	F	0,55	0,83
E6013	Monóxido de carbono	CO	59,00	54,00
	Monóxido de nitrógeno	NO	91,00	136,79
	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	1,11	1,09

En la ecuación 1.2 se definió el nivel de concentración de un gas con respecto al volumen total de aire aspirado. Esta ecuación se puede modificar para determinar el flujo másico de un componente.

$$\dot{m}_{si} = C_{(si)} \times \dot{V}_T \times 10^{-6} \quad (2.17)$$

Donde:

$\dot{m}_{si}$  : Flujo másico del gas de soldadura i [kg/h]

$C_{(si)}$  : Concentración del gas de soldadura i [mg/m<sup>3</sup>]

$\dot{V}_T$  : Flujo volumétrico total [m<sup>3</sup>/h]

El flujo másico total de los gases de soldadura es la suma de todos los flujos másicos de cada componente (ver ecuación 2.18).

$$\dot{m}_{GS} = \dot{V}_T \left( \sum C_{(si)} \right) \quad (2.18)$$

Donde:

$\dot{m}_{GS}$  : Flujo másico total de los gases de soldadura [kg/h]

Al reemplazar la ecuación 2.18 en la ecuación 1.2, se obtiene que la fracción másica de un gas de soldadura puede expresarse solamente en función de las concentraciones de cada componente (ver ecuación 2.19). Es decir, no es necesario conocer el flujo volumétrico total.

$$f_{m_{gsi}} = \frac{C_{(si)}}{\sum C_{(si)}} \quad (2.19)$$

Donde:

$f_{m_{gsi}}$  : Fracción másica del gas de soldadura i [-]

Para determinar las fracciones másicas y las constantes de gas ideal de cada componente se emplean las ecuaciones 2.19 y 2.9, respectivamente. Los resultados se indican en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Fracciones másicas y constantes de gas ideal de cada componente.

Electrodo	Elementos y compuestos	Fórmula química	Porcentaje en peso (%)	Constante R (kJ/kg-K)
E6011	Monóxido de carbono	CO	9,888	0,2968
	Monóxido de nitrógeno	NO	88,446	0,2771
	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	1,218	0,1807
	Flúor	F	0,448	0,4376
E6013	Monóxido de carbono	CO	28,14	0,2968
	Monóxido de nitrógeno	NO	71,29	0,2771
	Dióxido de nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0,57	0,1807

Una vez obtenidos estos parámetros, se procede a calcular las propiedades de los gases de soldadura. Para determinar la densidad y la constante de los gases de

soldadura se emplean las ecuaciones 2.7 y 2.8, respectivamente. Los resultados se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Flujos de gases de soldadura y propiedades por tipo de electrodo.

Parámetros	E6011	E6013
Flujo másico de gases de soldadura (kg/h)	0,410	0,439
Constante de los gases de soldadura (Kj/kg-K)	0,279	0,282
Densidad de los gases de soldadura (kg/m <sup>3</sup> )	0,975	0,963
Flujo volumétrico de gases de soldadura (m <sup>3</sup> /s)	0,000117	0,000127

El caso más crítico lo presenta el electrodo de tipo rutilico con clasificación E6013, con un flujo volumétrico de  $1,27 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s y una densidad de 0,963 kg/m<sup>3</sup>. Estos valores serán empleados para el diseño del sistema de extracción de gases de soldadura.

## 2.6 Campanas

La campana es una entrada con una geometría determinada y diseñada para capturar el aire contaminado y conducirlo hacia los ductos del sistema de extracción.

La selección de una campana depende de las características del equipo o instalación, del mecanismo de generación del contaminante y de la relación equipo-trabajador [Ref. 2.17].

### 2.6.1 Tipos de campana

Las campanas tienen diferentes configuraciones que pueden ser agrupadas en dos categorías: cabinas y campanas exteriores.

## Cabinas

Este tipo de campanas encierran completa o parcialmente el proceso o el punto de generación del contaminante. Las cabinas son las campanas más recomendadas siempre y cuando la configuración del proceso y la operación lo permita [Ref. 2.17] (ver figura 2.5).

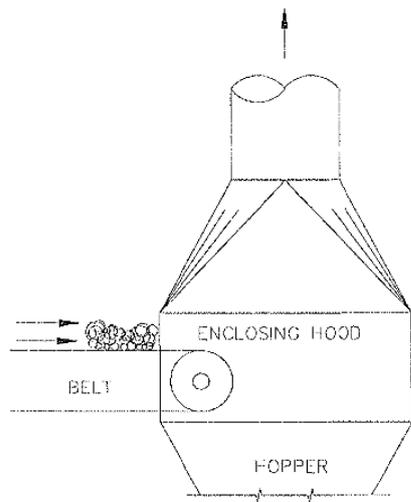


Figura 2.5. Campana tipo cabina de encierre total [Ref. 2.2].

## Campanas exteriores

Las campanas exteriores se ubican adyacentes a la fuente de emisión pero sin encerrarla (ver figura 2.6). Cuando el contaminante es un gas, vapor o polvo fino, y no es emitido con una velocidad significativa, la orientación de la campana no es crítica. Sin embargo, para partículas grandes y velocidades apreciables, es necesario colocar la campana en la dirección de la emisión [Ref. 2.17].

Si el proceso emite aire contaminado muy caliente, este ascenderá por ser menos denso. Para este caso, se debe emplear una campana exterior en la misma dirección de la emisión para producir una captación adecuada.

Para el diseño de una campana de extracción, es necesario que el caudal de aire extraído por el sistema sea mayor al caudal de aire contaminado más el caudal de aire del medio ambiente; de lo contrario, el exceso de aire contaminado se conduciría fuera de la campana [Ref. 2.18].

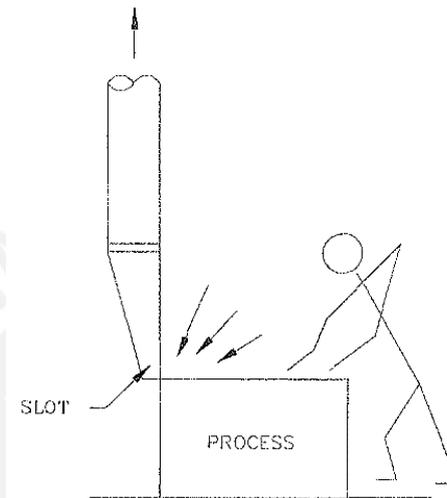


Figura 2.6. Campana exterior de tipo rendija [Ref. 2.2].

### 2.6.2 Campana para la fragua

Como se describió en el capítulo 1, la fragua y su campana actual forman parte de un solo sistema. Por esta razón, en el caso de que se implemente el nuevo sistema de extracción, se debe realizar una modificación en la fragua para instalar la nueva cabina. Esta medida consistiría en cortar la fragua de manera horizontal, de tal forma que remueva la campana actual. Este cambio sí sería factible, ya que la zona donde se cortaría la fragua está construida a base de planchas de acero de 0,5 mm de espesor (dato tomado en campo). De este modo, se podría instalar la nueva campana. La nueva configuración de la fragua y sus dimensiones generales se muestran en la figura 2.7.

Habiendo asumido esta modificación, se procede a diseñar la campana de acuerdo a las recomendaciones dadas, de manera que su construcción sea lo más práctica posible.

En la actualidad no existen reglas para el diseño de campanas para forjado manual; la única información dada por la ACGIH es una velocidad de cara (*face velocity*) recomendada de 200 fpm (1,016 m/s) y que la campana debe ser de tipo cabina [Ref. 2.19].

Asimismo, uno de los requerimientos de diseño expuestos en el capítulo 1 es mantener el foco de contaminación lo más aislado posible del personal técnico que opera la fragua. Por ello, se diseñará una campana tipo cabina para el sistema de extracción de gases.

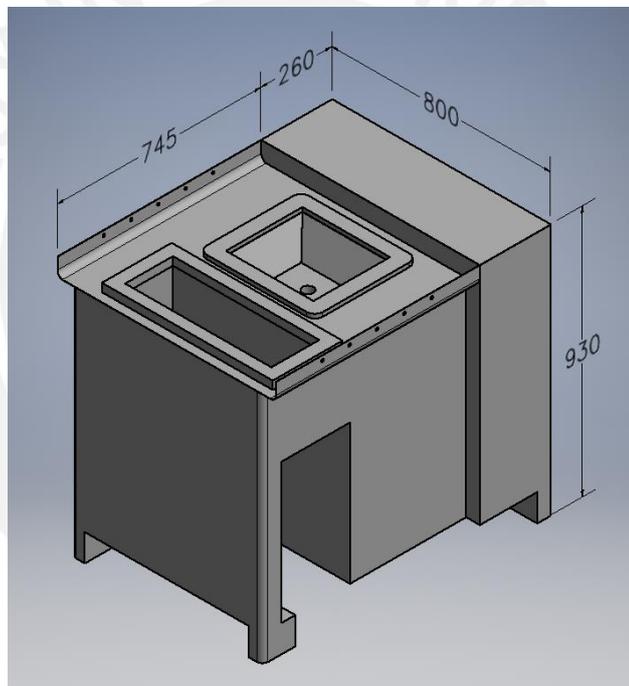


Figura 2.7. Nueva configuración de la fragua y dimensiones generales en mm.

Para el diseño de campanas tipo cabina se debe considerar la velocidad de boca o cara (*face velocity*). Esta se define como la velocidad promedio que pasa por la entrada de la campana. La ecuación 2.20 muestra la relación entre la velocidad de cara con el caudal de extracción y el área de entrada de la campana [Ref. 2.20]. Se debe recalcar que el flujo de aire calculado en la ecuación 2.20 está compuesto únicamente de aire ambiente. Por ello se debe determinar el caudal de aspiración total del sistema. En la sección 2.7 se muestra este cálculo con mayor detalle.

$$V_f = \frac{\dot{V}_{asp}}{A_{cabina}} \quad (2.20)$$

Donde:

$V_f$  : Velocidad de cara (*Face velocity*) [fpm ó m/s]

$\dot{V}_{ext}$  : Caudal de extracción [cfm ó m<sup>3</sup>/s]

$A_{cabina}$  : Área de la entrada de la campana tipo cabina [ft<sup>2</sup> ó m<sup>2</sup>]

El efecto de las altas temperaturas de forjado hace que los gases de combustión tiendan a dirigirse de manera vertical. Por esta razón, la extracción se efectuará desde la parte superior de la cabina para asegurar la captura de los gases. La figura 2.8 muestra un esquema de la parte superior de la campana propuesta para este sistema.

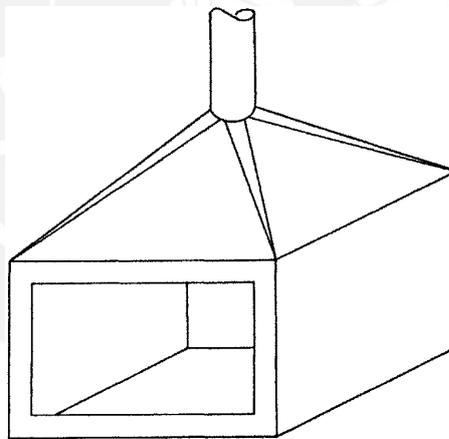


Figura 2.8. Campana tipo cabina con extracción en la parte superior [Ref. 2.21].

Para determinar las dimensiones de la campana se debe considerar el tamaño del proceso y el modo de operación del trabajador sobre el equipo. La campana tipo *canopy* actual tiene una distancia desde el foco contaminante hasta la cara de la campana de 33 cm. La campana tipo cabina tiene menor acceso a iluminación que una campana *canopy*. Por esta razón, se optó por aumentar a 40 cm la distancia desde el foco contaminante hasta la cara superior de la cabina.

Otro factor muy importante es la distribución del flujo de aire dentro de la cabina. Se debe asegurar la misma velocidad de cara en toda el área de entrada de la campana. Por ejemplo, si una campana tipo cabina es muy estrecha, puede cumplir con el requerimiento de la velocidad de cara; pero el flujo de aire no estaría distribuido en toda el área. Esto afectaría la captación de los contaminantes y conduciría a un posible escape de los gases fuera de la campana [Ref. 2.22].

Según las recomendaciones dadas por William Burgess [Ref. 2.22], para asegurar una distribución uniforme de los gases extraídos, se debe contrarrestar el efecto de la resistencia al flujo de aire en toda el área de entrada de la campana. Para lograr esto, se pueden aplicar las siguientes consideraciones de diseño:

- a) Diseñar la campana lo más profunda posible. Las recomendaciones indican que esta profundidad debe ser, por lo menos, el 75% de la altura o ancho del área de entrada de la campana, dependiendo de cuál sea la mayor.
- b) Usar deflectores (*baffles*). Estos son superficies que impiden el flujo de aire procedente de diferentes direcciones alrededor de la cara de la campana. Se puede ajustar el espaciamiento entre los deflectores con los lados internos de la campana para obtener una distribución uniforme de aire.
- c) Usar rendijas (*slots*). Estas tienen un área de entrada con una relación de anchura/longitud igual o inferior a 0,2. Si bien es posible conseguir una distribución de flujo de aire uniforme mediante rendijas, la velocidad en la rendija es notablemente mayor que la velocidad de captura. Esto conlleva a altas pérdidas por caída de presión. Por ello, es necesario dimensionar correctamente las rendijas para evitar una velocidad muy alta.

Se consideró solo los puntos a) y c) debido a que el sistema de rendijas es más práctico que el de deflectores.

Una campana con sistema de rendijas está conformada por una abertura estrecha, seguida de un pleno y una transición hacia el ducto. Normalmente, este tipo de campanas es más conocida como campana compuesta (*compound hood*) [Ref. 2.23]. El pleno es una especie de cámara vacía que tiene como función proporcionar una

velocidad uniforme del flujo de aire después de la rendija (aguas abajo). La corriente de aire que atraviesa el pleno es semejante un chorro que es impulsado a través de una abertura. El chorro de aire, después de ser impulsado, mantiene la misma dirección hacia una determinada distancia, pero con menor velocidad. De la misma manera, el flujo de aire que atraviesa la rendija disminuye su velocidad por estar en un espacio bastante ancho en comparación con la rendija [Ref. 2.23]. En la figura 2.9 se muestra el ejemplo del chorro de aire y un esquema de una campana compuesta.

Se debe dimensionar el ancho de la rendija y la profundidad del pleno para obtener una uniformidad del flujo de aire a lo largo de la rendija. De tal manera que la velocidad del aire en la rendija sea muy superior a la del pleno [Ref. 2.23].

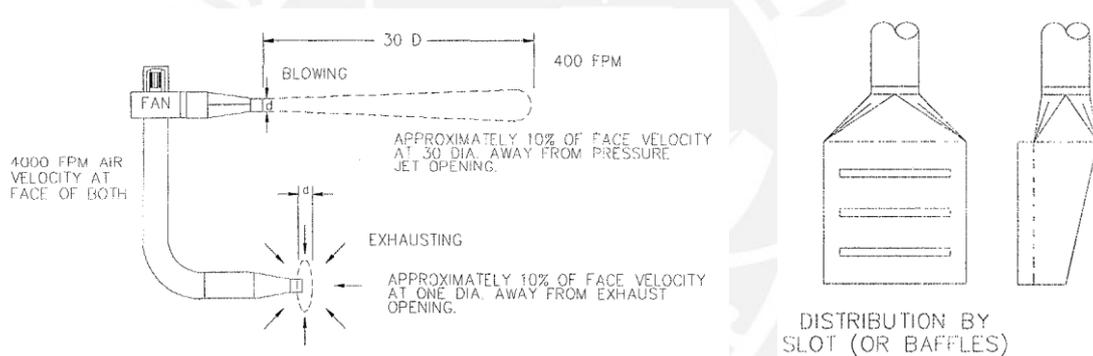


Figura 2.9. Chorro de aire (izquierda) y campana compuesta (derecha) [Ref. 2.24] [Ref. 2.25].

Para el diseño de campanas compuestas, se recomienda una velocidad en la rendija (*slot velocity*) mayor o igual que 2000 fpm (10 m/s) [Ref. 2.25]. Asimismo, la velocidad máxima en el pleno se define mediante la ecuación 2.21 [Ref. 2.26].

$$V_{max_{pl}} = 0,5V_{re} \tag{2.21}$$

Donde:

$V_{max_{pl}}$  : Velocidad máxima en el pleno de la campana [m/s ó fpm]

$V_{re}$  : Velocidad en la rendija [m/s ó fpm]

Para la mayoría de campanas compuestas, una velocidad en la rendija de 2000 fpm (10 m/s) y una velocidad en el pleno de 1000 fpm (5 m/s) es una buena elección de diseño [Ref. 2.23]. Se tomará como prioridad dimensionar la campana de tal manera que se obtenga estos valores de velocidad.

Se procede a dimensionar la campana mediante prueba y error hasta obtener valores cercanos a los recomendados. Las rendijas y el pleno todavía no serán dimensionadas, ya que dependen del caudal de aspiración total (ver sección 2.7). La distancia entre la cara de la campana y las rendijas será de 60 cm. La tabla 2.12 muestra las dimensiones y la velocidad de cara (*face velocity*) de la campana.

Tabla 2.12. Dimensiones de cabina, velocidad de cara (*face velocity*) y caudal de aspiración de campana para la fragua.

Parámetros	Unidades	Valores
Ancho de fragua	m	0,80
	ft	2,62
Altura de cabina	m	0,40
	ft	1,31
Área de cabina	m <sup>2</sup>	0,32
	ft <sup>2</sup>	3,44
Velocidad de cara	m/s	0,86
	fpm	170
Caudal de aspiración	m <sup>3</sup> /s	0,276
	cfm	585,6

### 2.6.3 Campana para las cabinas de soldadura

A diferencia de la fragua, es imposible aislar el proceso de soldadura del personal técnico. Por ello, la campana necesariamente debe ser de tipo exterior. En el capítulo 1 se estableció que uno de los requerimientos de diseño era emplear campanas estáticas. Se consideró este criterio porque no es necesaria la movilidad del personal técnico y los alumnos durante una sesión de soldadura dentro de las cabinas.

Asimismo, una campana estática presenta mayor facilidad constructiva que las campanas móviles.

Una campana exterior debe captar los gases de soldadura con mayor grado de confiabilidad que una cabina, ya que es más probable la fuga de las emisiones hacia el interior del recinto. Es por ello que se elegirá una campana compuesta para asegurar la distribución del flujo de aire y evitar su retorno. La figura 2.10 muestra la configuración de una campana compuesta para soldadura, propuesta por la ACGIH.

El caudal de aspiración recomendado por la ACGIH es de  $0,5419 \text{ m}^3/\text{s}$  por metro de longitud de la mesa de trabajo. De acuerdo a la disposición de la Zona de Soldadura (ver plano LM4-A2), se trabajará con un ancho de mesa de 90 cm, lo que resulta en un caudal de aspiración por cabina de soldadura de  $0,488 \text{ m}^3/\text{s}$ . Además, el ancho de la zona de trabajo debe ser de 600 mm como máximo (cota "W" en la figura 2.10)

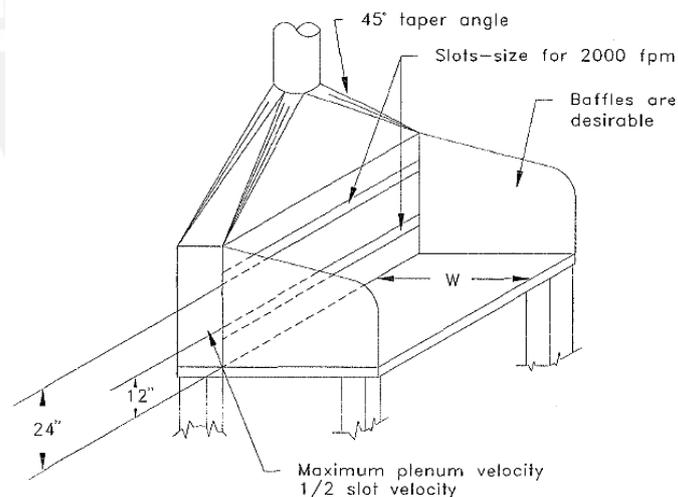


Figura 2.10. Configuración de campana compuesta para soldadura [Ref. 2.27].

Se considerarán los criterios de diseño expuestos en la sección 2.6.2 para campanas compuestas. Se procede a dimensionar la campana mediante el método de prueba y error. Las tabla 2.13 muestran las dimensiones y la velocidad de cara (*face velocity*) de la campana.

Tabla 2.13. Dimensiones de cabina, velocidad de cara (*face velocity*) y caudal de aspiración de campana para las cabinas de soldadura.

Parámetros	Unidades	Valores
Largo de la zona de trabajo	m	0,9
	ft	2,95
Ancho de la zona de trabajo	m	0,5
	ft	1,64
Velocidad de cara	m/s	0,508
	fpm	100
Caudal de aspiración	m <sup>3</sup> /s	0,488
	cfm	1033,5

## 2.7 Caudal de aspiración total y diseño de rendijas y pleno

### 2.7.1 Fragua

La cabina propuesta para la fragua tiene un diseño particular que influye en el cálculo del caudal de aspiración total. El flujo de aire extraído afuera de la campana está compuesto únicamente de aire del medio ambiente debido a que el foco contaminante está ubicado en el interior de la campana. En el instante de la extracción, el flujo de aire ambiente se mezclaría con los gases de combustión. La suma de estos dos flujos da como resultado el verdadero caudal de aspiración total del sistema (ecuación 2.22).

$$\dot{V}_{Tasp} = \dot{V}_{gases} + \dot{V}_{amb} \quad (2.22)$$

Donde:

$\dot{V}_{Tasp}$  : Caudal de aspiración total del sistema [m<sup>3</sup>/s]

$\dot{V}_{gases}$  : Flujo volumétrico de gases contaminantes [m<sup>3</sup>/s]

$\dot{V}_{amb}$  : Caudal de aspiración de aire ambiente [m<sup>3</sup>/s]

Mediante la ecuación 2.22, se procede a determinar el caudal de aspiración total del sistema. La tabla 2.14 muestra cada uno de los flujos de aire determinados hasta el momento.

Tabla 2.14. Flujos de aire calculados para el sistema de extracción de gases de combustión.

Flujo volumétrico de gases de combustión ( $\dot{V}_{gases}$ )		Caudal de aspiración de aire ambiente ( $\dot{V}_{amb}$ )		Caudal de aspiración total del sistema ( $\dot{V}_{Tasp}$ )	
(m <sup>3</sup> /s)	cfm	(m <sup>3</sup> /s)	cfm	(m <sup>3</sup> /s)	cfm
0.045	94.88	0.325	688.89	0.370	783.77

Una vez que el caudal de aspiración total esté calculado, se puede proceder a diseñar las rendijas y el pleno de la campana compuesta. Se empleará el método de prueba y error hasta obtener valores cercanos a los recomendados en la sección 2.6.2. La tabla 2.15 muestra el diseño de las rendijas y el pleno.

Tabla 2.15. Dimensiones y velocidad en las rendijas y el pleno de campana para la fragua.

Parámetros	Unidades	Valores
Longitud de rendija	m	0,78
	ft	2,56
Anchura de rendija	m	0,01
	ft	0,03
Número de rendijas	-	4
Velocidad de rendija	m/s	10,29
	fpm	2026,1
Relación ancho longitud de rendija	-	0,013
Profundidad de pleno	m	0,28
	ft	0,92
Ancho de pleno	m	0,80
	ft	2,62
Área de pleno	m <sup>2</sup>	0,22
	ft <sup>2</sup>	2,41
Velocidad de pleno	m/s	1,43
	fpm	282,2
Velocidad máximo en el pleno	m/s	5,15
	fpm	1013,1

### 2.7.2 Cabinas de soldadura

De la misma manera que en el diseño de la campana para la fragua, el caudal de aspiración mostrado en la tabla 2.13 solamente contiene aire ambiente. Por lo tanto, se empleará la ecuación 2.22 para determinar el caudal de aspiración total. En la tabla 2.16 se muestra cada uno de los flujos de aire del sistema de soldadura. En la tabla 2.17 se muestra el diseño de las rendijas y el pleno.

Tabla 2.16. Flujos de aire calculados para el sistema de extracción de gases de soldadura.

Flujo volumétrico de gases de combustión ( $\dot{V}_{gases}$ )		Caudal de aspiración de aire ambiente ( $\dot{V}_{amb}$ )		Caudal de aspiración total del sistema ( $\dot{V}_{Tasp}$ )	
(m <sup>3</sup> /s)	cfm	(m <sup>3</sup> /s)	cfm	(m <sup>3</sup> /s)	cfm
1,27x10 <sup>-4</sup>	0,268	0,488	1033,46	0,488	1033,73

Tabla 2.17. Dimensiones y velocidad en el pleno de campana para las cabinas de soldadura.

Parámetros	Unidades	Valores
Longitud de rendija	m	0,88
	ft	2,89
Anchura de rendija	m	0,01
	ft	0,03
Número de rendijas	-	5
Velocidad de rendija	m/s	11,09
	fpm	2182,1
Relación ancho longitud de rendija	-	0,011
Profundidad de pleno	m	0,28
	ft	0,92
Ancho de pleno	m	0,9
	ft	2,95
Área de pleno	m <sup>2</sup>	0,25
	ft <sup>2</sup>	2,71
Velocidad de pleno	m/s	1,94
	fpm	381
Velocidad máximo en el pleno	m/s	5,54
	fpm	1091,05

## 2.8 Propiedades de los flujos de aire

### 2.8.1 Propiedades del aire ambiente

El aire dentro del recinto se caracteriza por su contenido de vapor de agua. Esta mezcla de aire seco y agua se denomina aire húmedo. Es por ello que será necesario determinar estas propiedades mediante psicrometría.

Se considerará que el aire húmedo es una mezcla de gases ideales, con el fin de obtener sus características mediante fracciones másicas (ver sección 2.5). El flujo másico total de aire húmedo se define en la ecuación 2.23. Para obtener las fracciones másicas, se debe determinar el flujo másico de aire húmedo. Para ello, se debe calcular la densidad del aire húmedo (ver ecuación 2.24) [Ref. 2.28].

$$\dot{m}_{\text{aire húmedo}} = \dot{m}_{\text{vapor}} + \dot{m}_{\text{aire seco}} \quad (2.23)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{aire húmedo}}$  : Flujo másico del aire húmedo [kg/s]

$\dot{m}_{\text{vapor}}$  : Flujo másico de vapor de agua en el ambiente [kg/s]

$\dot{m}_{\text{aire seco}}$  : Flujo másico de aire seco en el ambiente [kg/s]

$$\rho_{\text{amb}} = \frac{1 + x}{v_{\text{amb}}} \quad (2.24)$$

Donde:

$\rho_{\text{amb}}$  : Densidad del aire ambiente o húmedo [kg/m<sup>3</sup>]

$v_{\text{amb}}$  : Volumen específico del aire húmedo [m<sup>3</sup>/kg aire seco]

$x$  : Humedad absoluta [kg vapor de agua / kg aire seco]

Se define el volumen específico por medio de la ecuación 2.25 [Ref. 2.29].

$$v_{amb} = \frac{0,2871 \times (T_{amb} + 273,15) \times (1 + 1,6078x)}{P_{atm}} \quad (2.25)$$

Donde:

$T_{amb}$  : Temperatura del aire ambiente [°C]

$P_{atm}$  : Presión atmosférica [101,325 kPa]

Se puede determinar la humedad absoluta mediante la ecuación 2.26 [Ref. 2.30]

$$x = 0,622 \times \frac{P_{vapor}}{P_{atm} - P_{vapor}} \quad (2.26)$$

Donde:

$\phi$  : Humedad relativa [%]

$P_{vapor\ sat}$  : Presión parcial de vapor de agua [kPa]

La humedad relativa se define como la razón entre la presión parcial de vapor con la presión de saturación del vapor a la temperatura de la mezcla [Ref. 2.31]. En este caso, la temperatura es la de ambiente.

$$\phi = \frac{P_{vapor}}{P_{vaporsat}} \quad (2.27)$$

Donde:

$P_{vaporsat}$  : Presión de saturación del vapor de agua a temperatura ambiente [kPa]

Se procede a reemplazar la ecuación 2.27 en la ecuación 2.26, de tal manera que exista una relación entre la humedad absoluta y relativa.

$$x = 0,622 \times \frac{\phi \times P_{vapor\ sat}}{P_{atm} - \phi \times P_{vapor\ sat}} \quad (2.28)$$

Una vez que se determina la densidad del aire ambiente, se procede a calcular el flujo másico del aire ambiente. Después, se deben calcular los flujos másicos del aire seco y del vapor de agua. Estos últimos valores serán necesarios para calcular las fracciones másicas.

La humedad absoluta expresa la relación entre la masa de vapor de agua con la masa de aire seco (kg vapor / kg aire seco) [Ref. 2.32]. A partir de esto, se puede modificar la ecuación 2.23 de tal forma que se obtenga la humedad absoluta en función de los flujos másicos (ver ecuación 2.29).

$$x = \frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{m}_{aire\ húmedo} - \dot{m}_{vapor}} \quad (2.29)$$

Se puede modificar la ecuación 2.29 para determinar el flujo másico de vapor.

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{aire\ húmedo} \times \left( \frac{x}{x + 1} \right) \quad (2.30)$$

Una vez obtenidos los flujos másicos de cada componente, se pueden determinar las fracciones másicas de acuerdo a la ecuación 2.10 y la constante de gas ideal del aire húmedo mediante la ecuación 2.8. Los valores de humedad absoluta, volumen específico y densidad del aire húmedo se indican en el anexo 4.

### 2.8.2 Propiedades de la mezcla de gases de fragua

Se aplicará el mismo método de las fracciones másicas para obtener las propiedades de la mezcla de gases de combustión en la fragua. Este método consiste en calcular la constante de gases de la mezcla mediante las ecuaciones 2.8 y 2.10 y la densidad de la mezcla de gases por medio de la ecuación 2.7. En el anexo 5 se indican los valores

de flujos máxicos, fracciones máxicas, constante de gases y densidad de la mezcla de gases de fragua para diferentes condiciones ambientales.

### 2.8.3 Propiedades de la mezcla de gases de soldadura

Se llevará a cabo el mismo método para determinar las propiedades de la mezcla de gases de soldadura. En el anexo 6 se indican los valores de flujos máxicos, fracciones máxicas, constante de gases y densidad de la mezcla de gases de soldadura para diferentes condiciones ambientales.

## 2.9 Diseño de ductos y accesorios

### 2.9.1 Sección transversal del ducto

Es recomendable el uso de tuberías circulares para sistemas de control de contaminación y captación de gases. Además, produce menor pérdida de presión y ofrece mayor resistencia estructural que los ductos rectangulares. [Ref. 2.33].

Para este trabajo de tesis se emplearán tuberías de sección circular.

### Fragua

En la sección 2.4 se estableció que las velocidades de transporte para el sistema de la fragua debería estar en un rango de 1000 – 2000 fpm (5,08 – 10,16 m/s). Se añadirá otra recomendación más por parte de la ACGIH. Este indica que la velocidad de transporte mínima para procesos de forja manual debe ser de 1500 fpm (7,62 m/s) [Ref. 2.19]. En consecuencia, se establecerá un nuevo rango de velocidades recomendadas de 1500 – 2000 fpm (7,62 – 10,16 m/s). A partir de estos valores, se puede determinar un rango de diámetros permisibles para tuberías.

La tabla 2.18 indica los diámetros para diferentes velocidades dentro del nuevo rango establecido.

Tabla 2.18. Diámetros de tuberías para velocidades entre 1500 a 2000 fpm.

Velocidad de ducto		Área de ducto		Diámetro interior de ducto	
m/s	fpm	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	mm	ft
7,62	1500	0,042	0,454	231,64	0,760
7,87	1550	0,041	0,439	227,88	0,748
8,13	1600	0,040	0,425	224,29	0,736
8,38	1650	0,038	0,412	220,86	0,725
8,64	1700	0,037	0,400	217,59	0,714
8,89	1750	0,036	0,389	214,46	0,704
9,14	1800	0,035	0,378	211,46	0,694
9,40	1850	0,034	0,368	208,58	0,684
9,65	1900	0,033	0,358	205,82	0,675
9,91	1950	0,032	0,349	203,16	0,667
10,16	2000	0,032	0,340	200,61	0,658

Se obtiene que el diámetro interno de tubería debe estar en un rango de 20 – 23,2 cm. Se seleccionó un diámetro de 210 mm para obtener una velocidad que no sea muy excesiva (2000 fpm) pero que también garantice el transporte de los gases de combustión. En la tabla 2.19 se muestra la velocidad real de transporte para el sistema de extracción.

Tabla 2.19. Velocidad real de transporte para el sistema de extracción de la fragua.

Diámetro interno		Área real de ducto		Velocidad actual de ducto	
mm	ft	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m/s	fpm
210	0,689	0,035	0,373	9,39	1847,79

### Cabinas de soldadura

Para el sistema de extracción de gases de soldadura, se estableció en la sección 2.4 que las velocidades de transporte deberían estar en un rango de 2000 – 2500 fpm (10,16 – 12,7 m/s). Se añadirá otra recomendación más por parte de la ACGIH. Este señala que el rango de velocidades de transporte para procesos de soldadura debe

ser de 1000 – 3000 fpm (5,08 – 15,24 m/s) [Ref. 2.34]. En consecuencia, se establecerá un nuevo rango de velocidades de 2000 – 3000 fpm (10,16 – 15,24 m/s).

En la tabla 2.20 se muestra los diámetros permisibles de tuberías para el sistema de extracción de gases de soldadura.

Tabla 2.20. Diámetros de tuberías para velocidades entre 2000 a 3000 fpm.

Velocidad de ducto		Área de ducto		Diámetro interior de ducto	
m/s	fpm	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	mm	ft
10,160	2000	0,0480	0,5169	247,263	0,811
10,668	2100	0,0457	0,4923	241,304	0,792
11,176	2200	0,0437	0,4699	235,756	0,773
11,684	2300	0,0418	0,4494	230,574	0,756
12,192	2400	0,0400	0,4307	225,719	0,741
12,700	2500	0,0384	0,4135	221,159	0,726
13,208	2600	0,0369	0,3976	216,864	0,711
13,716	2700	0,0356	0,3829	212,810	0,698
14,224	2800	0,0343	0,3692	208,975	0,686
14,732	2900	0,0331	0,3565	205,341	0,674
15,240	3000	0,0320	0,3446	201,889	0,662

Se obtiene que el diámetro interno de tubería está en un rango de 20,2 – 24,7 cm. Se seleccionó un diámetro de 220 mm para obtener una velocidad cerca del promedio (2500 fpm). Además, escoger un diámetro un poco menor implicaría una velocidad de transporte mayor. Esto produciría mayores pérdidas de carga de aire.

En la tabla 2.21 se muestra la velocidad real de transporte para el sistema de extracción de gases de soldadura.

Tabla 2.21. Velocidad real de transporte para el sistema de extracción de gases de soldadura.

Diámetro interno		Área real de ducto		Velocidad actual de ducto	
mm	ft	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	m/s	fpm
220	0,722	0,0380	0,4092	12,83	2526,41

### 2.9.2 Espesor mínimo de tuberías y accesorios

Según la ACGIH, el espesor mínimo requerido depende del diámetro de los tramos rectos y del tipo de sistema de extracción localizada. Estos se pueden clasificar en cuatro grupos (ver tabla 2.22).

Tabla 2.22. Clasificación de sistemas de extracción localizada [Ref.2.35].

Clasificación	Tipo de aplicación
Clase 1 Prestaciones bajas	Aplicaciones no abrasivas
Clase 2 Prestaciones medias	Aplicaciones con partículas moderadamente abrasivas a bajas concentraciones
Clase 3 Prestaciones elevadas	Aplicaciones con partículas altamente abrasivas a bajas concentraciones
Clase 4 Prestaciones muy elevadas	Aplicaciones con partículas altamente abrasivas a concentraciones elevadas

Se puede considerar que los gases emitidos por los procesos de soldadura y por la combustión de carbón antracita producen abrasión moderada a bajas concentraciones. Por lo tanto, se clasifica a los sistemas de extracción propuestos como clase 2.

La tabla 2.23 muestra los valores recomendados para espesor de tubería.

Tabla 2.23. Valores recomendados para espesores de tubería [Ref. 2.35].

Diámetros de los tramos rectos (mm)	Espesores recomendados (mm)			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
100 hasta 200	0,8 – 1	0,8 – 1,5	1,5	2
más de 200 hasta 450	0,8 – 3	0,8 – 3	1,5 – 3	2 – 3
más de 450 hasta 750	1 – 5	1,5 – 5	1,5 – 5	2 – 5
más de 1750	2 – 7	2 – 7	3 – 7	3 – 7

Según la ACGIH, no se recomienda la soldadura de tuberías con espesores menores a 1,5 mm [Ref. 2.35]. Asimismo, se recomienda que los espesores para los accesorios y la campana sean mayores que los espesores de los tramos rectos por 0,5 – 1 mm de espesor adicional [Ref. 2.36].

Por lo tanto, se seleccionará un espesor de tubería de 1,5 mm y un espesor de campana y accesorios de 2 mm.

### **2.9.3 Material para ductos y accesorios**

Las tuberías se construyen normalmente de acero al carbono soldado o de chapa de acero galvanizado. Se puede emplear este tipo de materiales si es que la temperatura de los gases extraídos no superan los 200°C [Ref. 2.35]. Además, las emisiones producidas en cada proceso permite el uso de acero para la construcción de las tuberías. También, todas las tuberías, accesorios y transiciones deben soldarse según el código de la AWS.

Por lo tanto se seleccionará acero galvanizado según la norma ASTM A-653 G90 como material de las tuberías, campanas y accesorios para ambos sistemas de extracción.

### **2.9.4 Accesorios**

De acuerdo con las recomendaciones de la ACGIH [Ref. 2.36], los codos de 90° deben construirse con 5 piezas para diámetros menores a 150 mm y con 7 piezas para diámetros mayores. Por lo tanto, de acuerdo a los diámetros seleccionados en la sección 2.9.1, los codos serán construidos en 7 piezas de chapa de acero galvanizado. Las transiciones de sección rectangular a sección circular, tendrán un ángulo interno de 90°.

Los ramales deben conectarse al ducto principal con un ángulo de 45° de preferencia. Además, los cambios de sección deben tener una inclinación de 15° como máximo.

## 2.10 Distribución del flujo de aire

Para diseñar un sistema con varias campanas y ramales, se debe considerar el equilibrio del flujo de aire a través de todos los ductos; es decir, el caudal debe ser repartido en todos los conductos de manera correcta. En un sistema no equilibrado, el flujo de aire circularía por el ducto de menor resistencia. Por esta razón, se debe lograr que los ramales estén a la misma presión estática en todos sus puntos.

Uno de los requerimientos de diseño para el sistema de extracción de gases de soldadura es emplear ramales que conecten cada campana hasta un ducto principal. Existen dos métodos para equilibrar el caudal en un sistema de extracción [Ref. 2.37]:

- El primero consiste en un balance de caudales y presiones en todos los ramales del sistema de tuberías. Este método es el más económico y conservador.
- El segundo consiste en la regulación de caudal por medio de compuertas, que serán ajustadas una vez que el sistema esté en funcionamiento.

Se escogió el método de balance debido a que el empleo de compuertas podría conllevar fugas de aire y también podría haber un mal uso por parte del operador. Esto traería como consecuencia mayor demanda del ventilador.

Según la ACGIH, para realizar este balance se debe corregir el caudal por medio de la ecuación 2.31. Esta corrección se debe aplicar solo si la relación entre la presión menor con la presión mayor es menor a 0,8.

$$\dot{V}_{corr} = \dot{V}_{diseño} \sqrt{\frac{PE_{gob}}{PE_{ramal}}} \quad (2.31)$$

Donde:

$\dot{V}_{corr}$  : Caudal de aspiración total corregido [m<sup>3</sup>/s]

$\dot{V}_{diseño}$  : Caudal de aspiración total de diseño [m<sup>3</sup>/s]

$PE_{gob}$  : Presión estática gobernante [Pa]

$PE_{ramal}$  : Presión estática en el ramal [Pa]

## 2.11 Método de cálculo de pérdidas

Existen diferentes métodos para el cálculo de pérdidas en un sistema de extracción de aire. Para este trabajo, se empleará el método propuesto por la ASHRAE y la ACGIH. Además, los procedimientos para determinar las pérdidas en tramos rectos y en accesorios son distintos y se explicarán con mayor detalle en esta sección.

### 2.11.1 Pérdidas en tramos

La ASHRAE explica que la pérdida por tramos rectos está en función de la velocidad, la densidad del fluido, la longitud del ducto, el diámetro del ducto y del coeficiente de fricción de la tubería (ver ecuación 2.32) [Ref. 2.38].

$$h_{tub} = f \times \frac{L_{tub}}{D_{tub}} \times \frac{\rho_f \times V_{ducto}^2}{2} \quad (2.32)$$

Donde:

$h_{tub}$  : Pérdidas en tramo de tubería [Pa]

$L_{tub}$  : Longitud de tubería [m]

$D_{tub}$  : Diámetro interno de tubería [m]

$f$  : Coeficiente de rozamiento de tubería [-]

$PD_{tub}$  : Presión dinámica en tubería [Pa]

$\rho_f$  : Densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V_{ducto}$  : Velocidad en el ducto [m/s]

El coeficiente de rozamiento se puede determinar mediante el diagrama de Moody. Sin embargo, para abreviar el procedimiento, se empleará la ecuación de Darcy, que está basada en este diagrama (ver ecuación 2.34) [Ref. 2.39]. Se debe calcular el coeficiente mediante técnicas de iteración.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D_{tub}} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.34)$$

Donde:

$\varepsilon$  : Rugosidad absoluta del material de tubería [m]

$Re$  : Número de Reynolds [-]

El número de Reynolds está definido por la ecuación 2.35.

$$Re = \frac{\rho_f \times V_{ducto} \times D_{tub}}{\mu} \quad (2.35)$$

Donde:

$\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido [ $2,17 \times 10^{-5}$  Pa-s] (Aire puro a 100 °C)

### 2.11.2 Pérdidas en codos y transiciones

La ACGIH y la ASHRAE proponen que las pérdidas en accesorios son directamente proporcionales a la presión dinámica que ejerce el fluido (ver ecuación 2.36).

$$h_{acc} = K_D \times PD_{tub} \quad (2.36)$$

Donde:

$h_{acc}$  : Pérdidas en accesorio [Pa]

$K_D$  : Coeficiente de pérdidas de accesorio [-]

$PD_{tub}$  : Presión dinámica en la tubería [Pa]

La presión dinámica que ejerce un fluido se define por medio de la ecuación 2.37.

$$PD_{tub} = \frac{\rho_f \times (V_{ducto})^2}{2} \quad (2.37)$$

Sin embargo, para este trabajo de tesis, se emplearán los coeficientes propuestos por la ACGIH, debido a que la ASHRAE no propone coeficientes para algunos accesorios.

### 2.11.3 Pérdidas en la entrada de la campana

Para el cálculo de pérdidas en la entrada de la campana, se emplea el mismo método anterior; a diferencia que se debe agregar la presión dinámica como un componente más (ver ecuación 2.38). Esto se debe a que, según el principio de conservación de la energía, el estado inicial está en reposo, mientras que el estado final del aire tiene una presión dinámica. Las pérdidas en la entrada de la campana representan la energía necesaria para vencer ese estado de reposo del aire.

$$h_{campana} = K_D \times PD_{tub} + PD_{tub} \quad (2.38)$$

Donde:

$h_{campana}$  : Pérdida de presión en la entrada de la campana [Pa]

### 2.11.4 Pérdidas en expansiones

En los ramales, para que en cada uno de los puntos exista la misma velocidad de transporte, necesariamente debe existir un cambio de sección de un diámetro menor a uno mayor. Sin embargo, la velocidad en el conducto principal suele ser mayor que la velocidad en el ramal. Si la diferencia es notable, se debe compensar ese incremento

de presión dinámica con una disminución de la presión estática. La condición para corregir la presión estática es que la diferencia entre la presión dinámica en el conducto principal es mayor a la presión dinámica resultante por 2,5 mmH<sub>2</sub>O ó 24,5 Pa [Ref. 2.40]. Esta presión dinámica resultante se define mediante la ecuación 2.39, mientras que la presión dinámica en el ducto principal ( $PD_3$ ) se calcula por medio la ecuación 2.37 [Ref. 2.40].

$$PD_{re} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_3}\right) PD_1 + \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_3}\right) PD_2 \quad (2.39)$$

Donde:

- $PD_{re}$  : Presión dinámica resultante [mmH<sub>2</sub>O]
- $\dot{V}_1$  : Caudal de ramal 1 [m<sup>3</sup>/s]
- $\dot{V}_2$  : Caudal de ramal 2 [m<sup>3</sup>/s]
- $\dot{V}_3$  : Caudal resultante [m<sup>3</sup>/s]
- $PD_1$  : Presión dinámica en ramal 1 [mmH<sub>2</sub>O]
- $PD_2$  : Presión dinámica en ramal 2 [mmH<sub>2</sub>O]

En caso de que se realice la corrección, la presión estática en el ducto principal se calcularía por medio de la ecuación 2.40 [Ref. 2.40].

$$PE_3 = PE_1 - (PD_3 - PD_{re}) \quad (2.40)$$

Donde:

- $PE_1$  : Presión estática en el ramal 1 [mmH<sub>2</sub>O]

Asimismo, para los cambios de sección de un diámetro menor a uno mayor, existe un factor de ganancia de presión estática, debido al ensanchamiento. Sin embargo, esta recuperación de presión estática se produce con una cierta pérdida de energía que

está en función de la geometría de la expansión. La pérdida por ensanchamiento se expresa en la ecuación 2.41.

$$PE_{salida} = PE_{entrada} + F.G. \times (PD_{entrada} - PD_{salida}) \quad (2.41)$$

Donde:

- F.G.* : Factor de ganancia [-]
- PE<sub>salida</sub>* : Presión estática en la salida de la expansión [mmH<sub>2</sub>O]
- PE<sub>entrada</sub>* : Presión estática en la entrada de la expansión [mmH<sub>2</sub>O]
- PD<sub>entrada</sub>* : Presión dinámica en la entrada de la expansión [mmH<sub>2</sub>O]
- PD<sub>salida</sub>* : Presión dinámica en la salida de la expansión [mmH<sub>2</sub>O]

La pérdida de presión en una expansión resulta ser la suma de las pérdidas por cambio de velocidad de transporte y por ensanchamiento. En el anexo 7 se muestran todos los coeficientes de pérdidas para cada tipo de elemento.

## 2.12 Tratamiento de gases

Según las condiciones de operación del personal técnico y los alumnos durante las sesiones de forja y soldadura, uno de los requerimientos para los sistemas es el diseño del equipo de tratamiento de las emisiones producidas, con el fin de disminuir el efecto invernadero y de mejorar la salud pública dentro del campus de la universidad. En esta sección se determinará el método de tratamiento de gases para cada sistema; así como los parámetros principales.

### 2.12.1 Sistema de extracción para fragua

Según la ACGIH, el tipo de tratamiento para la combustión de carbón es por torre empacada (depuración húmeda). Se emplean estos equipos para el tratamiento de

elementos gaseosos; sin embargo, no es recomendable para depurar material particulado [Ref. 2.41]. Además, se seleccionará la torre empacada como método de tratamiento debido a la presencia de gases corrosivos como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y a su solubilidad con respecto al agua.

### Torres empacadas

Las torres empacadas emplean el principio de la absorción de gases por medio de solubilidad. El flujo másico del gas contaminante actúa como soluble y es transferido hacia el flujo másico del líquido, que actúa como solvente. Este tipo de equipos disponen de una configuración en contra-corriente; es decir, el flujo de gas contaminante ingresa por la parte inferior de la torre y evacúa por la parte superior; mientras que el flujo de líquido solvente ingresa por la parte superior mediante canales. Además, la torre está conformada por empaques distribuidos en todo lo largo [Ref. 2.42]. En la figura 2.11 se muestra un ejemplo de configuración de una torre empacada.

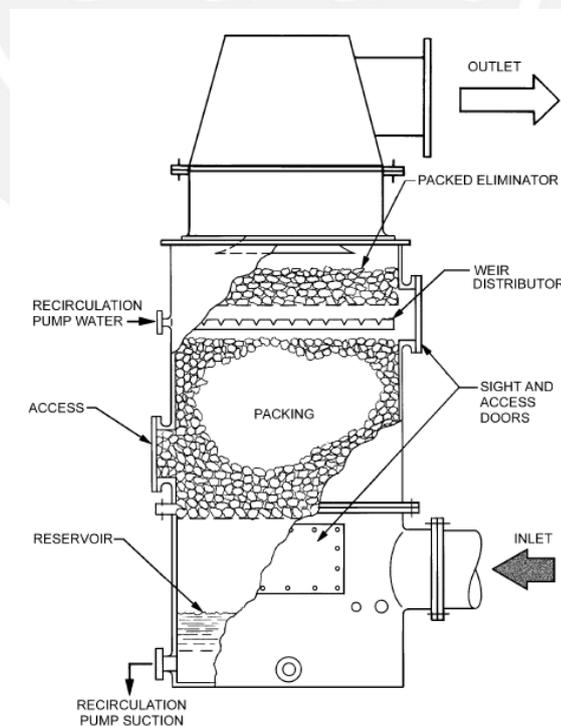


Figura 2.11. Torre empacada con flujos de gas y líquido en contra-corriente. [Ref. 2.43].

### Tipos de empaque

El empaque es un cuerpo sólido que tiene una configuración geométrica en particular, que tiene como fin permitir un contacto efectivo entre la fase líquida y gaseosa que se produce durante la absorción. Los empaques pueden implementarse de tres maneras: aleatoria, colocados a mano u ordenada y estructurada. Por lo general, el material de los empaques es económico y es capaz de soportar el efecto corrosivo de los gases contaminantes. En la figura 2.12 se muestran los diseños de empaques más utilizados.

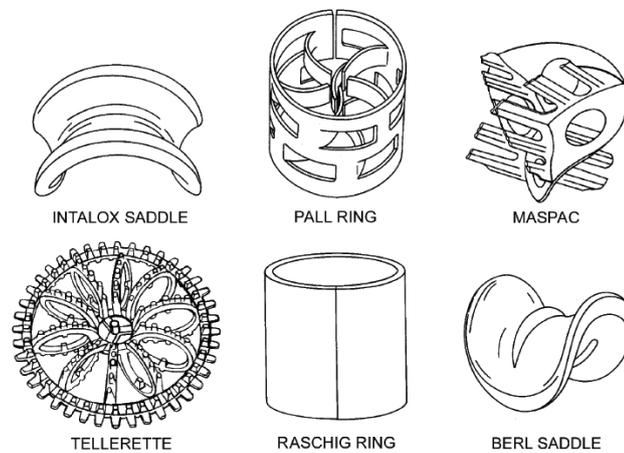


Figura 2.12. Tipos de empaque [Ref. 2.44].

El diseño de la torre empacada y el empaque influye de manera significativa el cálculo de pérdidas de presión y altura de la torre. En la tabla 2.24 se muestran las características de cada tipo y tamaño de empaque que se pueden emplear.

Tabla 2.24. Características de empaque por tipo y tamaño [Ref. 2.45] [Ref. 2.46].

Tipo de empaque	Material	Tamaño nominal (*)	Factor de empaque [-]	Coefficiente de transferencia de masa ( $K_{Ga}$ ) [mol/(s.m <sup>3</sup> .kPa)]
Intalox	Plástico	1"	131	0,096
		2"	92	0,063
	Cerámico	25	302	0,086
		50	131	0,063
		75	72	0,036

Tabla 2.24. Características de empaque por tipo y tamaño (continuación) [Ref. 2.45] [Ref. 2.46].

Tipo de empaque	Material	Tamaño nominal (*)	Factor de empaque	Coefficiente de transferencia de masa ( $K_{Ga}$ ) [mol/(s.m <sup>3</sup> .kPa)]
Anillos Raschig	Cerámico	25	587	0,076
		50	213	0,053
Anillos Pall	Plástico	25	180	0,087
		50	85	0,064
		90	56	0,039
	Metálico	25	183	0,102
		38	131	0,082
		50	89	0,071
		90	59	0,040

(\*) De no indicarse la unidad, el tamaño nominal está en mm.

### Diámetro de torre empacada

Según la recomendación de ASHRAE, la velocidad del gas contaminante dentro de la torre debe ser de 0,6 m/s ó 1,2 m/s ó 1,8 m/s [Ref.2.47]. A partir de ello, se puede determinar el diámetro de la torre por medio de la ecuación 2.20. En la tabla 2.25 se muestran los diámetros obtenidos para cada una de las velocidades.

Tabla 2.25. Diámetro de torre empacada.

Velocidad de entrada de gas a lavador (m/s)	Sección transversal de torre empacada (m <sup>2</sup> )	Diámetro de torre empacada (m)
0,6	0,535	0,826
1,2	0,268	0,584
1,8	0,178	0,477

### Pérdida de presión en torre empacada

Para determinar la pérdida de presión en la torre, se empleará una correlación para torres empacadas generalizada, en donde están involucrados diferentes parámetros; tales como el flujo másico por unidad de área del gas contaminante ( $G_y$ ) y del líquido solvente ( $G_x$ ).

Según McCabe, se puede asumir una relación de  $G_x/G_y$  igual a 1 [Ref. 2.48]. En la figura 2.13 se muestra la correlación y su gráfica con sus respectivos valores en cada eje coordinado. Los subíndices “x” e “y” hacen referencia al líquido y al gas, respectivamente. En el eje de las abscisas se puede apreciar la siguiente ecuación.

$$\frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x - \rho_y}} \quad (2.42)$$

Donde:

- $G_x$  : Flujo másico de agua por unidad de área [lb/ft<sup>2</sup>-s]
- $G_y$  : Flujo másico de gas contaminante por unidad de área [lb/ft<sup>2</sup>-s]
- $\rho_x$  : Densidad del agua [lb/ft<sup>3</sup>]
- $\rho_y$  : Densidad del gas contaminante [lb/ft<sup>3</sup>]

Mientras que en el eje de las ordenadas se muestra la ecuación 2.43.

$$\frac{G_y^2 \times F_p \times u_x^{0,1}}{g \times (\rho_x - \rho_y) \times \rho_y} \quad (2.43)$$

Donde:

- $F_p$  : Factor de empaque [-]
- $u_x$  : Viscosidad absoluta del agua [1 Cp]
- $g$  : Aceleración de la gravedad [32,174 ft/s<sup>2</sup>]

La velocidad de gas tiene un límite máximo llamado “inundación”. Cuando un proceso de absorción en torre empacada se encuentra en “inundación” se dice que la velocidad de gas es tan alta que retiene gran cantidad de agua dentro de la torre, lo que ocasiona que los elementos metálicos tiendan a oxidarse más rápidamente [Ref. 2.49].

La densidad de los gases contaminantes de la fragua, en unidades inglesas, es de 0,059 lb/ft<sup>3</sup> y la densidad del agua, a temperatura ambiente, es de 62,43 lb/ft<sup>3</sup>. Empleando la relación  $G_x/G_y = 1$  y reemplazando los valores, se tiene que el valor de la abscisa es de 0,0307.

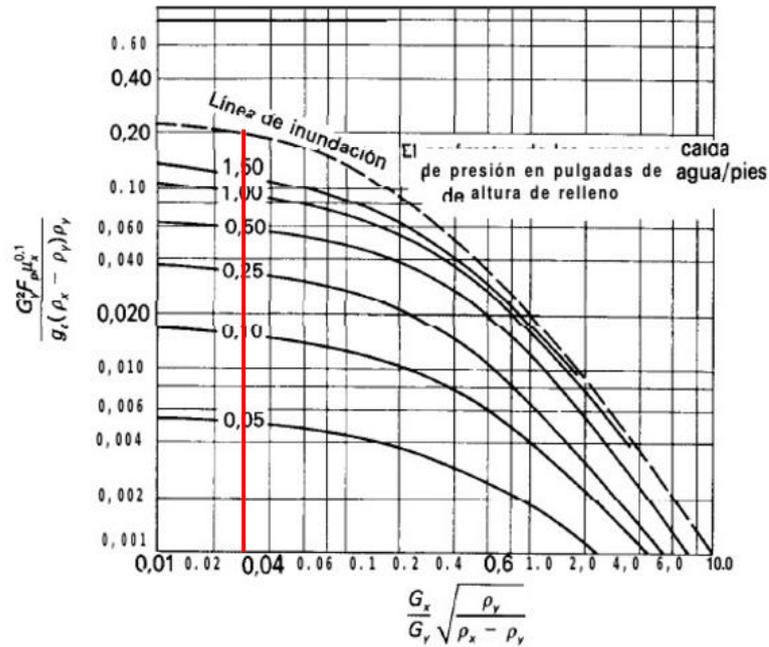


Figura 2.13 Correlación generalizada para torres empacadas [Ref. 2.50]

El flujo másico por unidad de área ( $G$ ) se puede determinar dividiendo el flujo másico total entre el área total de la sección transversal de la torre. En la tabla 2.26 se muestran los flujos calculados por cada valor de velocidad de transporte de gas.

Tabla 2.26. Flujos másicos de gas y de agua por unidad de área.

Velocidad de entrada de gas a lavador (m/s)	Flujo másico de gas y agua por unidad de área (lb/ft <sup>2</sup> -s)	Flujo másico de agua (kg/h)	Caudal de agua (m <sup>3</sup> /h)
0,6	0,116	1091,4	1,09
1,2	0,232	1091,4	1,09
1,8	0,348	1091,4	1,09

Con estos datos ya definidos se puede determinar el valor de la ordenada de la correlación y la pérdida de presión resultante intersectando el valor de la abscisa y la ordenada con la correlación. La tabla 2.27 muestra los valores obtenidos usando la correlación en la figura 2.13.

Tabla 2.27. Pérdida de presión por unidad de altura por tipo y tamaño de empaque.

Tipo de empaque	Material	Tamaño nominal	Valor de ordenada	Pérdida de presión (in H <sub>2</sub> O/ft altura)	Pérdida de presión (mm H <sub>2</sub> O/m altura)
Intalox	Plástico	1"	0,015	0,09	7,50
		2"	0,010	0,08	6,67
	Cerámico	25	0,034	0,44	36,67
		50	0,015	0,09	7,50
		75	0,008	0,07	5,83
Anillos Raschig	Cerámico	25	0,067	0,75	62,50
		50	0,024	0,175	14,58
Anillos Pall	Plástico	25	0,020	0,15	12,50
		50	0,010	0,08	6,67
		90	0,006	0,51	42,50
	Metálico	25	0,021	0,15	12,50
		38	0,015	0,09	7,50
		50	0,010	0,08	6,67
		90	0,007	0,06	5,00

### Altura de torre empacada

Para determinar la altura de la torre es necesario determinar el porcentaje de absorción requerido y qué contaminante se debe depurar. Se empleará como contaminante crítico al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) debido a que es un componente muy soluble con el agua.

Según la EPA, la concentración de SO<sub>2</sub> debe ser menor que 0,5 ppm (ver tabla 1.10) y, según los resultados obtenidos en el anexo 1, la concentración máxima de SO<sub>2</sub> es de

12 ppm. Con estos datos, se puede determinar que la torre necesita una capacidad de absorción de  $\text{SO}_2$  de 95,8%.

Según las recomendaciones de ASHRAE, se debe definir el coeficiente de transferencia de masa del contaminante crítico. En este caso, el  $\text{SO}_2$  tiene un coeficiente  $K_{Ga}$  de  $0,13 \text{ mol}/(\text{s}\cdot\text{m}^3\cdot\text{kPa})$  [Ref. 2.45].

Una vez definido este valor, se empleará el gráfico de porcentaje de contaminante absorbido vs altura de torre empacada para diferentes valores de coeficientes  $K_{Ga}$  (ver figura 2.14). Es importante resaltar que este gráfico es válidos solamente para empaques tipo Intalox de plástico de 2" de tamaño nominal.

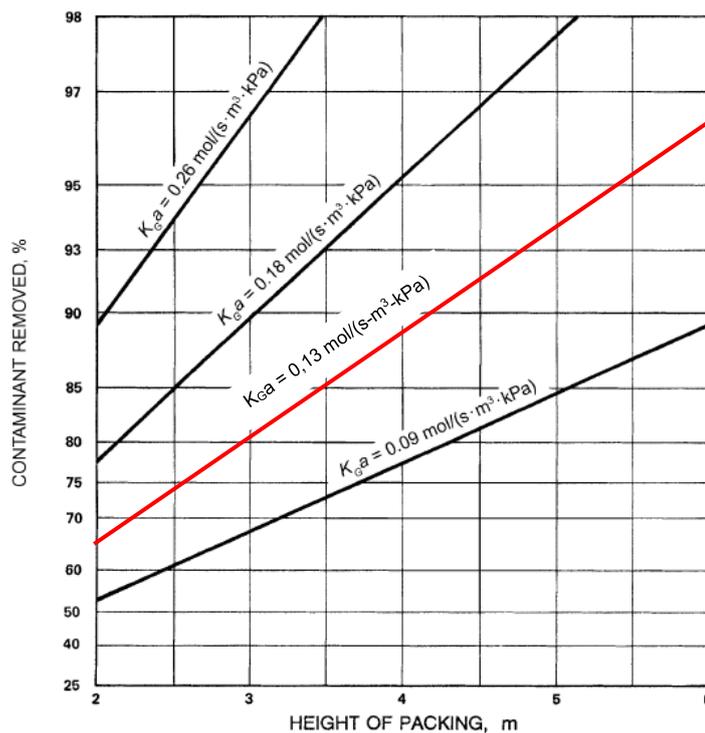


Figura 2.14. Porcentaje de absorción vs altura de torre, para velocidad superficial de  $0,6 \text{ m/s}$  [Ref. 2.47].

Para determinar la altura de torre necesaria para otros tipos y tamaños de empaque, ASHRAE señala que la altura de torre es inversamente proporcional al coeficiente de transferencia de masa del empaque  $K_{Ga}$  [Ref. 2.47].

$$H_1 \times K_G a_1 = H_2 \times K_G a_2 \quad (2.44)$$

Donde:

$H_1$  : Altura de torre para empaque 1 [m]

$K_G a_1$  : Coeficiente de transferencia de masa para empaque 1 [mol/(s-m<sup>3</sup>-kPa)]

$H_2$  : Altura de torre para empaque 2 [m]

$K_G a_2$  : Coeficiente de transferencia de masa para empaque 2 [mol/(s-m<sup>3</sup>-kPa)]

Para un porcentaje de absorción de 95,8% se tiene una altura aproximada de 5,9 metros, la cual no cumpliría con las condiciones del Laboratorio. Es por ello que se deben emplear dos torres empacadas para obtener 0,5 ppm de concentración de SO<sub>2</sub> a la descarga. Para esto, se debe calcular el porcentaje de absorción de cada una de las torres. Se emplearán las siguientes ecuaciones, en donde los subíndices “1” y “2” indican los estados en la entrada y salida de todo el proceso de absorción y el término “i” al estado intermedio entre las dos torres.

$$y_1 = 12 \text{ ppm} = 1,2 \times 10^{-5}$$

$$y_2 = 0,5 \text{ ppm} = 5 \times 10^{-7}$$

$$y_i = (1 - P.A._1) y_1$$

$$y_2 = (1 - P.A._2) y_i$$

Donde:

$P.A._1$  : Porcentaje de absorción de torre 1 [%]

$P.A._2$  : Porcentaje de absorción de torre 2 [%]

Si  $P.A._1 = P.A._2 = P.A.$  entonces se tiene lo siguiente:

$$y_2 = (1 - P.A.)^2 y_1$$

Reemplazando los valores correspondientes, se determina que el porcentaje de absorción, para dos torres, es de 79,6% cada una.

$$P. A. = 79,6\%$$

Con este P.A. se tienen obtienen dos torres de 2,875 m de altura. Este valor, a pesar de cumplir con lo requerido, sigue siendo relativamente alto. Por ello, se calcularán las alturas para otros tipos de empaques, mediante la ecuación 2.43. En la tabla 2.28 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2.28. Altura de torre empacada para diferentes tipos y tamaños de empaque.  
Configuración de 1 torre y dos torres.

Tipo de empaque	Material	Tamaño nominal	Altura de empaque (m) [2 torres]	Altura de empaque (m) [1 torre]
Intalox	Plástico	1"	1,89	3,86
		2"	2,88	5,88
	Cerámico	25	2,11	4,30
		50	2,88	5,88
		75	5,03	10,28
Anillos Raschig	Cerámico	25	2,38	4,87
		50	3,42	6,98
Anillos Pall	Plástico	25	2,08	4,25
		50	2,83	5,78
		90	4,64	9,49
	Metálico	25	1,78	3,63
		38	2,21	4,51
		50	2,55	5,21
		90	4,53	9,25

Se optó por la configuración de 2 torres empacadas para que el sistema de extracción sea más compacto y se pueda realizar mantenimiento con menor dificultad, ya que la altura es menor. También se optó por un empaque hecho de plástico, con el fin de soportar los efectos corrosivos del SO<sub>2</sub>. Se seleccionó el empaque Intalox de 1" de tamaño nominal, ya que presenta la menor caída de presión total.

Por lo tanto, las torres empacadas tendrán 0,83 metros de diámetro y 1,90 metros de altura, con capacidades de absorción de 79,6% cada una. La caída de presión total de

una torre es de 14,15 mmH<sub>2</sub>O ó 138,8 Pa. El caudal de agua necesario para cada torre será de 1,09 m<sup>3</sup>/h (0,30 l/s).

### 2.12.2 Sistema de extracción para cabinas de soldadura

Según lo determinado anteriormente en el capítulo 1, los humos de soldadura se caracterizan porque emiten gran cantidad de material particulado, a diferencia de los gases de combustión de la fragua. No sería factible emplear depuración de gases por torre empacada. Por otro lado, según la recomendación de la ACGIH, se debe emplear un depurador húmedo tipo Venturi, ya que estos equipos son eficaces para la depuración de material particulado [Ref. 2.51]. Por ello, se empleará un lavador de gases tipo Venturi para este sistema.

#### Depurador Venturi

El depurador de tipo Venturi emplea un estrangulamiento para poder obtener velocidades de transporte notablemente mayores a las obtenidas en el diseño de ductos. En estos equipos, el método de captación del material particulado es mediante impacto. A diferencia de las torres empacadas, el agua se suministra a través de inyectores que pueden estar ubicados en la garganta. El Venturi tiene la ventaja de que produce un contacto íntimo entre las partículas contenidas en el gas y el agua de lavado. La figura 2.15 muestra un esquema de estos equipos.

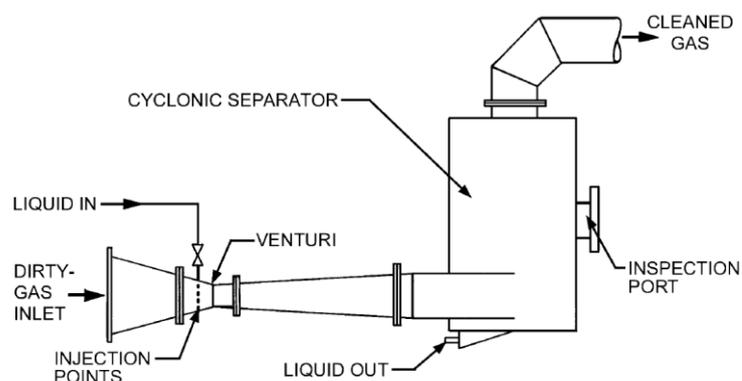


Figura 2.15. Depurador de tipo Venturi [Ref. 2.52]

La ASHRAE explica que a mayor potencia que se aplica al depurador, mayor eficiencia de captación del material particulado. La figura 2.16 muestra la relación entre las pérdidas de presión en un lavador de tipo Venturi con el porcentaje de absorción de los humos y el diámetro aerodinámico del material particulado.

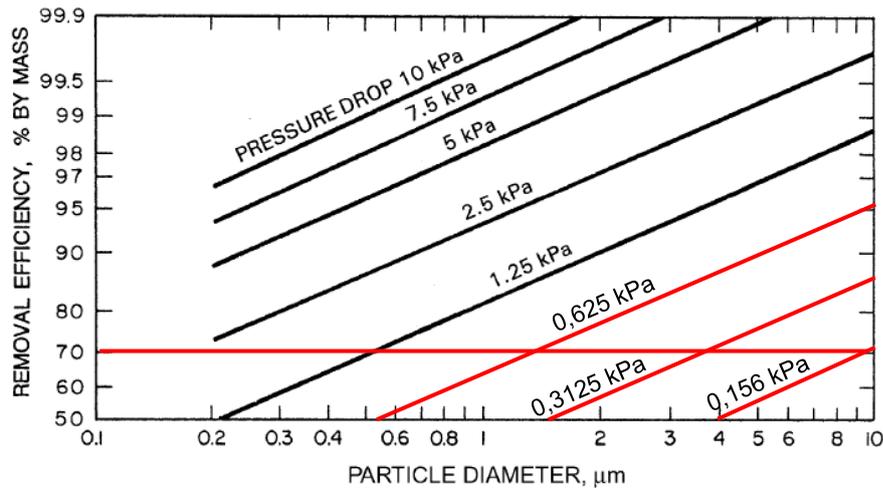


Figura 2.16. Eficiencia de un depurador tipo Venturi vs Diámetro aerodinámico [Ref. 2.53]

En el capítulo 1 se estableció que el tamaño de partícula promedio en los humos de soldadura es menor de  $10 \mu\text{m}$ . Por lo tanto, según la figura 2.17, se puede determinar que la caída de presión dentro del lavador Venturi sería de  $156,25 \text{ Pa}$  o  $15,93 \text{ mmH}_2\text{O}$ . Se determinó que la eficiencia del depurador es de 70% para evitar mayores pérdidas de presión y por los altos costos de operación.

### 2.13 Cálculo de pérdidas

Se procede a calcular todas las pérdidas de cada uno de los elementos. En el anexo 8 se muestran esquemas generales de los dos sistemas de extracción y, a partir de estos esquemas, se procede a identificar cada una de las campanas, tramos rectos, codos y demás accesorios para poder realizar el cálculo de presiones.

Las pérdidas de presión de cada elemento de los sistemas se muestran en el anexo 9.

## 2.14 Selección de ventiladores

Una vez que se ha calculado las pérdidas de presión en cada uno de los sistemas, se puede identificar los parámetros de selección para cada uno de los ventiladores. En la tabla 2.29 se muestran las características de ambos sistemas.

Tabla 2.29. Parámetros de los sistemas de fragua y soldadura.

Parámetros	Unidades	Sistema de fragua	Sistema de soldadura
Pérdida de presión	mmH <sub>2</sub> O	58,92	75,96
	inH <sub>2</sub> O	2,32	3,00
Caudal de aspiración total	m <sup>3</sup> /s	0,32	1,46
	cfm	680,4	3100,4

Se procederá a determinar las características de los ventiladores centrífugos por el método gráfico, según el anexo 10. La tabla 2.30 indica las características de los ventiladores seleccionados.

Tabla 2.30. Ventiladores centrífugos Greenheck seleccionados para cada sistema [Ref. 2.54].

Parámetros	Sistema de fragua	Sistema de soldadura
Modelo	SWB-208	SWB-215
Potencia de ventilador (BHP)	0,57	2,54
Caudal de aspiración (cfm)	730	3300
Presión estática (inH <sub>2</sub> O)	2,5	3
Velocidad de giro (rpm)	2715	2293
Ruido (sones)	17,8	23

Greenheck recomienda que la unión del ventilador al sistema de extracción deba consistir en un tramo recto de longitud igual a 3 veces el diámetro de dicho tramo. Asimismo, se debe disponer de uniones flexibles en la entrada y salida del ventilador [Ref. 2.55]. Se tomarán estas recomendaciones para el diseño de los sistemas de extracción.

## REFERENCIAS CAPITULO 2

- [2.1]. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH). *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice. 23rd Edition.* 1998. p. 2-14
- [2.2]. *Ibíd.* p. 3-5
- [2.3]. *Ibíd.* p. 3-3
- [2.4]. *Ibíd.* p. 3-6. Tabla 3-1
- [2.5]. AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). *ANSI Z49.1:2012. Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes.* 2012. p. 12-13
- [2.6]. ACGIH op. cit., p. 3-19. Tabla 3-2
- [2.7]. MORAN, Michael; SHAPIRO, Howard. *Fundamentos de Termodinámica Técnica.* Segunda edición. 2004. p. 630
- [2.8]. *Ibíd.* p. 631
- [2.9]. *Ibíd.* p. 702
- [2.10]. *Ibíd.* p. 119
- [2.11]. *Ibíd.* p. 114
- [2.12]. *Ibíd.* p. 113
- [2.13]. INDURA S.A. *Manual de sistemas y materiales de soldadura.* 2013. Cerrillos, Chile. p. 14
- [2.14]. THE ESAB GROUP, Inc. *Basic welding filler metal technology: A Correspondence Course. Lesson IX: Estimating and comparing weld metal costs.* 2000. p. 4
- [2.15]. ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). *International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Volume 49: Chromium, Nickel and Welding.* 1990. p. 467
- [2.16]. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Indoor Air Unit Conversion.* Disponible en:

[http://archive.epa.gov/athens/archive-athens/web/pdf/indoor\\_air\\_unit\\_conversions.pdf](http://archive.epa.gov/athens/archive-athens/web/pdf/indoor_air_unit_conversions.pdf)

- [2.17]. ACGIH op. cit., p. 3-2
- [2.18]. BATURIN V. V. Fundamentos de Ventilación Industrial. Editorial Labor. 1976. p. 539
- [2.19]. ACGIH op. cit., p. 10-178. Tabla 10.99.2
- [2.20]. BURGESS, William; ELLENBECKER, Michael; TREITMAN, Robert. *Ventilation for control of the work environment*. 2nd Edition. 2004. p. 117
- [2.21]. *Ibíd.* p. 109
- [2.22]. *Ibíd.* p. 118
- [2.23]. ACGIH op. cit., p. 3-18
- [2.24]. ACGIH op. cit., p. 1-10
- [2.25]. ACGIH op. cit., p. 3-14
- [2.26]. ACGIH op. cit., p. 3-8
- [2.27]. ACGIH op. cit., p. 10-146
- [2.28]. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). *Fundamentals*. 2001. p. 6.8. Ecuación 11.
- [2.29]. *Ibíd.* p. 6.9. Ecuación 28
- [2.30]. *Ibíd.* p. 6.8. Ecuación 22
- [2.31]. *Ibíd.* p. 6.9. Ecuación 24
- [2.32]. *Ibíd.* p. 6.8. Ecuación 7
- [2.33]. ACGIH op. cit., p. 10-146
- [2.34]. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH). *Ventilación Industrial Manual de Recomendaciones Prácticas para la Prevención de Riesgos Profesionales*. Primera edición en español. 1992. p. 10-57.

- [2.35]. Ibíd. p. 8-2
- [2.36]. Ibíd. p. 8-4
- [2.37]. Ibíd. p. 5-6
- [2.38]. ASHRAE op. cit., p. 34.7. Ecuación 19
- [2.39]. ASHRAE op. cit., p. 34.7. Ecuación 20
- [2.40]. ACGIH, *Industrial Ventilation*, op. cit., p. 5-12
- [2.41]. ACGIH, *Industrial Ventilation*, op. cit., p. 4-18
- [2.42]. McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Cuarta edición. 1991. McGraw-Hill. p. 717
- [2.43]. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). *HVAC Systems and Equipment*. 2008. p. 29.20
- [2.44]. Ibíd. p. 29.19
- [2.45]. Ibíd. p. 29.21
- [2.46]. PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7th Edition*. 1999. p. 14-43.
- [2.47]. ASHRAE, *HVAC Systems and Equipment*, op. cit., p. 29.22
- [2.48]. McCABE, Warren op. cit., p.723
- [2.49]. McCABE, Warren op. cit., p.720
- [2.50]. McCABE, Warren op. cit., p.722
- [2.51]. ACGIH, *Industrial Ventilation*, op. cit., p. 4-21
- [2.52]. ASHRAE, *HVAC Systems and Equipment*, op. cit., p. 29.17
- [2.53]. ASHRAE, *HVAC Systems and Equipment*, op. cit., p. 29.16
- [2.54]. GREENHECK FAN CORPORATION. Centrifugal Utility Fans Model SFD, SFB, SWD and SWB. Direct and Belt Drive. Catálogo. p. 42, 46
- [2.55]. Ibíd. p. 13

## CAPITULO 3

### PRESUPUESTO DEL PROYECTO

En este capítulo se determinarán los costos de diseño, fabricación e instalación de los dos sistemas de extracción de gases. Para ello es necesario conocer todos los elementos que los conforman.

#### 3.1 Costos de diseño

La tabla 3.1 muestra los costos de diseño para el sistema de fragua. Se asumió que un ingeniero junior emplearía una cantidad de 400 horas de trabajo. Se tomó como referencia los precios del mercado para estimar el precio unitario de diseño.

Tabla 3.1. Costos de diseño para ambos sistemas de extracción

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario (\$/h)	Precio parcial (\$)
Diseño de sistema para fragua	Horas	800	2.5	2000
Diseño de sistema para soldadura	Horas	900	2.5	2250

Se obtuvo un subtotal de costos de diseño de **\$ 4250**.

### 3.2 Costos de materiales

La tabla 3.2 muestra la lista de insumos que se emplearán en la fabricación de cada sistema, así como sus costos unitarios y costo total.

Tabla 3.2. Costos de insumos para ambos sistemas de extracción.

Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio parcial (\$)
Plancha de acero galvanizado de 1000x2000 mm; espesor: 1,5 mm	10	50	500
Plancha de acero galvanizado de 1000x2000 mm; espesor: 2 mm	6	60	360
Angulo L 40x40x3x4000; acero ASTM A36	1	15	15
Angulo L 50x50x4x4000; acero ASTM A36	1	20	20
Angulo L 25x25x3x2000; acero ASTM A36	1	10	10
Tornillos hexagonales M14x30	292	0,5	146
Tornillos hexagonales M12x25	16	0,4	6,4
Tornillos hexagonales M20x80	28	0,6	16,8
Tornillos hexagonales M16x65	20	0,5	10
Tuercas hexagonales M12	16	0,5	30
Tuercas hexagonales M14	292	0,5	146
Tuercas hexagonales M16	24	0,5	12
Tuercas hexagonales M20	20	0,6	12
Ventilador centrífugo Greenheck 730 cfm, 2,5" H <sub>2</sub> O	1	1000	1000
Ventilador centrífugo Greenheck 3300 cfm, 3" H <sub>2</sub> O	1	1500	1500
Torres de empaque	2	8000	16000
Lavador Venturi	1	10000	20000

Se obtiene un subtotal de costos de materiales de **\$ 39 761**, por parte de los dos sistemas de extracción.

### 3.3 Costos de fabricación y montaje

La tabla 3.3 muestra los costos unitarios y totales de fabricación y de montaje para los sistemas de extracción de gases.

Tabla 3.3. Costos unitarios y totales de fabricación para los sistemas de extracción de gases.

Descripción	Cantidad de horas	Precio unitario (\$/h)	Precio parcial (\$)
Mano de obra de fabricación	20	8	160
Mano de obra de soldadura	20	10	200
Mano de obra de montaje	30	15	450

Se obtuvo un subtotal de costos de fabricación y montaje de **\$ 810** para los dos sistemas de extracción.

### 3.4 Costo Total

La tabla 3.4 muestra la suma de los subtotales obtenidos hasta el momento.

Tabla 3.4. Costo Total del proyecto.

Descripción	Subtotal (\$)
Costo de diseño	4250
Costo de materiales	39761
Costo de fabricación y montaje	810
<b>Costo Total</b>	<b>44 821</b>

## PLANOS

El presente trabajo cuenta con 57 planos, de los cuales se pueden dividir en tres grupos:

- Disposición de la Zona de Soldadura y Forja del Laboratorio de Manufactura  
Cantidad : 2 planos de planta y 2 planos de elevación (4 planos en total).  
Denominación: LMX-AY  
Donde:  
LMX : Plano N° X del grupo LM (Laboratorio de Manufactura)  
AY : Tamaño de hoja
- Sistema de extracción y tratamiento de gases de combustión de la fragua  
Cantidad : 5 planos de ensamble y 15 planos de fabricación (20 planos en total).  
Denominación: FX-AY  
Donde:  
FX : Plano N° X del grupo F (Forja)  
AY : Tamaño de hoja
- Sistema de extracción y tratamiento de gases de soldadura  
Cantidad : 7 planos de ensamble y 26 planos de fabricación (33 planos en total).  
Denominación: SX-AY  
Donde:  
SX : Plano N° X del grupo S (Soldadura)  
AY : Tamaño de hoja

Todos los planos se muestran como anexos en un volumen aparte, así como el índice, que indica la descripción y denominación de cada uno de los planos.

## CONCLUSIONES

1. Se diseñaron dos sistemas de extracción y tratamiento de gases para los procesos de forja y soldadura, respectivamente. El caudal de aspiración total del sistema para la fragua es de  $0,321 \text{ m}^3/\text{s}$  ó  $680,4 \text{ cfm}$ ; mientras que el caudal de aspiración total del sistema para las cabinas de soldadura es de  $1,46 \text{ m}^3/\text{s}$  ó  $3100 \text{ cfm}$ . Ambos sistemas son independientes entre sí, para que puedan ser accionados solo durante las sesiones correspondientes en los cursos de Taller Mecánico 1 y Taller de Procesos de Manufactura.
2. Se logró determinar las concentraciones de los contaminantes más relevantes en los procesos descritos en este trabajo. En el caso del proceso de soldadura, el analizador de gases TESTO 350-XL está diseñado para detectar gases de combustión. Por esta razón, las concentraciones de los gases de soldadura emitidos en el Laboratorio deben tomarse como una referencia, mas no como un resultado preciso.
3. El presupuesto total para la fabricación e instalación de los dos sistemas de extracción y tratamiento de gases es de \$ 44 821. Este monto no se basó en una consulta a una empresa en particular. Por ello, solo debe considerarse este monto como un valor de referencia. En el caso de que ambos sistemas se instalen, será necesaria una cotización más detallada.
4. Los sistemas diseñados garantizarían una extracción eficiente de los gases y humos producidos dentro del ambiente de forja y soldadura del Laboratorio de Manufactura, así como una efectiva limpieza de los gases que contribuiría con el medio ambiente. De implementarse ambos sistemas de extracción, beneficiaría a la Sección de Ingeniería Mecánica a nivel educativo y fomentaría las buenas prácticas en salud y seguridad ocupacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALDEN, Jhon Leslie. (1982). *Design of industrial ventilation systems* (5th ed.). New York.
- AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. (1998). *Industrial Ventilation: a manual of recommended practice* (23rd ed.). Cincinnati, Ohio.
- AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. (2012). *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices* (23rd ed.). Cincinnati, Ohio.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. (2001). *Fundamentals*. Atlanta, USA.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. (2008). *HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, USA.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. (2012). *ANSI Z49.1:2012. Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes*.
- ARIAS RIVEROS, Julio Miker. (2011). *Diseño del sistema de extracción localizado para el banco de pruebas de combustión del proyecto carbón*. Lima, Perú.
- BATURIN, V. V.;. (1976). *Fundamentos de Ventilación Industrial*. Labor.
- BURGESS, William A. (2004). *Ventilation for control of the work environment* (2nd ed.). New Jersey: Wiley-Interscience.
- ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. (2011). *Ventilación Industrial*. Bogotá, Colombia.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (1995). *Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors - "Electric Arc Welding"* (Vol. I). Research Triangle Park, North Carolina, USA, North Carolina, USA.

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (1995). *Emission Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors – “Anthracite Coal”* (Vol. I). Research Triangle Park, North Carolina, USA.
- FLORES MORALES, Allan Walter. (2009). *Instalación de ventilación de laboratorios con extracción de gases*. Lima, Perú.
- GROOVER, Mikell. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- MAS BAUTISTA, Ronald Eduardo. (2011). *Diseño de sistema de extracción de emisiones de gases de combustión de biomasa bajo condiciones controladas*. Lima, Perú.
- McCABE, Warren L; SMITH, Julian C. (1991). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química* (4ta ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM). (2012). *Balance Nacional de Energía*.
- MORAN, M. J., & SHAPIRO, H. N. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté S.A.
- BERG, Erik;. (2012). *Machinery's Handbook* (29th ed.). New York: Industrial Press.
- ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). (1990). *International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. (Vols. 49: Chromium, Nickel and Welding.).
- ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). (n.d.). *Environmental Health Criteria 213: Carbon Monoxide* (2nd ed.).
- PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. (1999). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. ( 7th ed.).
- SOLDEXA S.A. (n.d.). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos* (7ma ed.).
- THE ESAB GROUP, Inc. (2000). *Basic welding filler metal technology: A Correspondence Course*.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). (2006). *World Coal Quality Inventory: South America*.