

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA
Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN
DE PARTÍCULAS DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL
CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. LATACUNGA.**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**ALAN GERMÁN ARRIETA BARBOUR
CARLOS DAVID ESPINOZA YUMI**

**DIRECTOR: ING. FRANCISCO TERNEUS
CODIRECTOR: ING. EDGARDO FERNÁNDEZ**

Sangolquí, 16 de junio del 2011

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE PARTÍCULAS DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. LATACUNGA” fue realizado en su totalidad por los Sres. ALAN GERMÁN ARRIETA BARBOUR y CARLOS DAVID ESPINOZA YUMI como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Francisco Terneus

DIRECTOR

Ing. Edgardo Fernández

CODIRECTOR

Sangolquí, 2011/06/16

LEGALIZACION DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE PARTICULAS DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. LATACUNGA”

Elaborado por:

Alan Germán Arrieta Barbour
CI: 171073390-6

Carlos David Espinoza Yumi
CI: 171648305-0

Ing. Xavier Sánchez
DIRECTOR DE LA CARRERA

Sangolquí, 2011-Mayo

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por permitirme llegar hasta este momento importante de mi vida.

A mis padres Germán y Luisa ya que sin ellos no hubiera sido posible alcanzar esta significativa meta en mi vida. Su apoyo incondicional en tantos aspectos permitió que el deseo de convertirme en profesional se haga realidad.

A mis amigos que estuvieron cerca para darme ánimo y apoyo.

Alan Arrieta

A Dios por llenarme cada día de nuevos conocimientos útiles y necesarios para superar con optimismo cada obstáculo presentado.

A mis padres por enseñarme a que siempre es necesario proyectarse a futuro, trazarse nuevos objetivos y cada día tener una conducta auténtica de superación. Todo el esfuerzo que han realizado para mi progreso está plasmado en este proyecto. Gracias por ser siempre los mejores.

A mis familiares que siempre me apoyaron de forma sincera mediante palabras de ánimo y gestos de amabilidad.

A la Escuela Politécnica de Ejército, en especial a la carrera de Ingeniería Mecánica que me ha brindado la oportunidad de ser un nuevo profesional que contribuya al desarrollo integral del país.

David Espinoza

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento más grande va dirigido hacia el Creador de todas las cosas, Jehová Dios, ya que por su bondad inmerecida tengo vida, salud y unos padres muy buenos que me han educado para ser una persona de bien y útil para la sociedad.

A mis padres por su amor y preocupación en todo momento, lo que ha sido un fuerte impulso por el cual pude superar dificultades y problemas que se presentaron a lo largo de la carrera universitaria y en la realización de este proyecto.

Alan Arrieta

Agradezco primeramente a Dios por haberme dado la vida, la salud y los conocimientos necesarios para completar una etapa más de mi existencia. Gracias a ti Jesús por permitirme ser diferente y mejor cada día durante toda mi etapa universitaria. A ti toda mi admiración.

A mis padres por su apoyo incondicional durante toda mi vida ya que han sido un ejemplo a seguir de esfuerzo y superación. Todos estos valores han sido plasmados en mi vida gracias a sus enseñanzas.

A mis amigos sinceros por sus palabras de aliento y ánimo, por enseñarme a seguir en la lucha para conseguir objetivos rumbo a una vida de éxito.

David Espinoza

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACION DEL PROYECTO.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
RESUMEN.....	xxxvii

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 GENERAL.....	4
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	4
1.5 ALCANCE	5

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 CABINA DE PINTURA EN POLVO.....	6
2.1.1 DEFINICIÓN.....	6
2.1.2 CLASIFICACIÓN Y PARTES	7
2.1.2.1 Cabinas Continuas	7
2.1.2.2 Cabinas Batch	8
2.1.2.3 Cuarto Limpio de Pintura.....	9
2.1.2.4 Cabinas de alta producción	10
2.1.3 TIPOS DE MATERIALES.....	10
2.2 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN	11
2.2.1 DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES	11

2.2.1.1 Separador (filtros).....	12
2.2.1.2 Cuarto de succión	12
2.2.1.3 Ventilador	13
2.2.1.4 Ductos	13
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXTRACCIÓN.....	14
2.2.2.1 Recuperador con ciclón.....	14
2.2.2.1.1 Clasificación	15
2.2.2.1.2 Aplicaciones de los ciclones.....	17
2.2.2.2 Recuperador con sistema de filtros	17
2.2.2.2.1 Filtros de aire con media de fibras finas.....	18
2.2.2.2.2 Filtros de aire con media de fibras espesas	18
2.2.2.3 Recuperador con mangas	19
2.2.2.3.1 Operación de los filtros de mangas.....	21
2.2.2.3.2 Operación de la filtración	22
2.2.2.3.3 Operación de la limpieza.....	22
2.2.2.3.4 Aplicaciones	23
2.2.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE FILTRADO	24
2.2.3.1 Recuperador con Ciclón	24
2.2.3.2 Recuperador con filtros	24
2.2.3.3 Recuperador con mangas	25
2.2.4 TIPOS DE FILTROS	25
2.2.4.1 Filtros de difusión media.....	25
2.2.4.2 Pre-filtros y fundas filtrantes de escape	25
2.2.4.3 Paneles de entrada	26
2.2.4.4 Filtros de entrada húmeda.....	26
2.2.4.5 Pre-filtro enlazante	27
2.2.4.6 Rejillas captadoras de pintura	27
2.2.4.7 Almohadillas y rollos de fibra de vidrio	27
2.2.4.8 Captadores de pintura	28
2.2.4.9 Bolsas de pintura.....	28

2.2.4.10 Filtros cúbicos	29
2.2.4.11 Rollos de fibra de vidrio y poliéster.....	29
2.3 VENTILADORES	30
2.3.1 DESCRIPCIÓN.....	30
2.3.1.1 Partes principales	30
2.3.1.2 Leyes de ventiladores	31
2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO	32
2.3.2.1 Ventiladores centrífugos.....	32
2.3.2.1.1 Descripción	32
2.3.2.1.2 Clasificación	33
2.3.2.2 Ventiladores axiales	36
2.3.2.2.1 Descripción	36
2.3.2.3 Ventiladores mixtos	38
2.3.2.3.1 Descripción	38
2.3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA PRESIÓN DESARROLLADA.....	39
2.3.3.1 Baja presión	39
2.3.3.2 Media presión.....	39
2.3.3.3 Alta presión	40
2.3.3.4 Muy alta presión	40
2.3.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FUNCIÓN.....	41
2.3.4.1 Ventiladores con envolvente	41
2.3.4.1.1 Impulsores.....	41
2.3.4.1.2 Extractores	42
2.3.4.1.3 Impulsores-extractores.....	42
2.3.4.2 Ventiladores murales.....	42
2.3.4.3 Ventiladores de chorro	43
2.3.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	43
2.3.5.1 Presión	43
2.3.5.1.1 La presión total p_t	44
2.3.5.1.2 La presión estática p_s	44
2.3.5.1.3 La presión dinámica p_v	44

2.3.4.2 Caudal	45
2.3.4.3 Potencia	45
2.3.4.4 Velocidad de giro.....	45
2.3.4.5 Nivel sonoro	46
2.3.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN.....	46
2.3.5.1 Dispositivos de seguridad.....	46
2.3.5.1.1 Protecciones metálicas	47
2.3.5.1.2 Guardabanda	47
2.3.5.2 Problemas comunes de los ventiladores y sus posibles causas	47
2.3.5.2.1 Capacidades y presión abajo de las nominales	47
2.3.5.2.2 Vibraciones y ruido.....	48
2.3.5.2.3 Sobrecarga de la fuente motriz	48
2.3.5.3 Requisitos para la extracción de aire	49
2.3.5.4 Limpieza de los ventiladores	50
2.3.5.5 Mantenimiento de los motores eléctricos	50
2.4 DESIGNACIONES Y CONFIGURACIONES ESTÁNDAR	52
2.4.1 ROTACIÓN Y DESCARGA.....	52
2.4.2 DISEÑO ESTANDAR DE ACCIONAMIENTO.....	53
2.4.3 POSICIÓN DE CAJA DE ADMISIÓN	53
2.4.4 POSICIÓN DEL MOTOR.....	54
2.4.5 INSTALACIÓN.....	55
2.5 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	57
2.5.1 CLASIFICACIÓN	57
2.5.1.1 Materiales termoresistentes	57
2.5.1.2 Materiales resistentes a la corrosión	58
2.5.1.3 Materiales para construcción antichispas.....	61
2.6 TEORÍA DE VOLÚMENES FINITOS	62
2.7 CINEMÁTICA DE FLUIDOS	63
2.7.1 ECUACIÓN DE BERNOULLI	63
2.7.2 CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD.....	64

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA CABINA PARA PINTURA EN POLVO

3.1 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA	65
3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA CABINA.....	70
3.2.1 NIVEL DE PRODUCCIÓN	70
3.2.2 TIPOS DE PRODUCTOS	71
3.3 ILUMINACIÓN	72
3.4 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	73
3.4.1 MATERIALES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA.....	73
3.4.2 MATERIALES DE LAS PAREDES Y SOPORTE	74
3.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA CABINA EN SAP2000.....	75
3.5.1 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS.....	75
3.5.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS: ELEMENTO MÁS CRÍTICO	76
3.5.2.1 Análisis por flexión	76
3.5.3 RESULTADOS OBTENIDOS	78
3.5.3.1 Reacciones en los apoyos.....	79
3.5.3.2 Factores de carga de la estructura.....	81
3.5.4 CÁLCULO DE LA SOLDADURA EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO.....	82
3.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA MUEBLES METÁLICOS	83
3.6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	83
3.6.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL ELEMENTO MÁS CRÍTICO Y DIAGRAMA DE MOMENTOS	84
3.6.3 RESULTADOS OBTENIDOS	86
3.6.3.1 Factores de carga	87

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN

4.1 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.....	88
4.2 DINÁMICA DEL FLUIDO	92

4.2.1 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO Y CÁLCULO DEL CAUDAL	94
4.2.2 CÁLCULO DE VELOCIDADES Y PRESIONES EN LOS PUNTOS PRINCIPALES	96
4.2.3 ANÁLISIS POR VOLÚMENES FINITOS	98
4.2.3.1 Metodología de resolución	101
4.2.3.2 Ecuación general escalar de transporte	102
4.2.3.3 Proceso de solución de ANSYS FLUENT con el solucionador basado en la presión (Pressure-Based Solver).....	105
4.2.4 TURBULENCIA	107
4.2.4.1 Modelo estándar de turbulencia $k - \epsilon$	108
4.2.5 ANÁLISIS COMPUTACIONAL	110
4.2.5.1 Selección de software óptimo.....	111
4.2.5.2 Cálculo computacional	112
4.2.5.2.1 Pasos para la solución con parámetros de simulación de Ansys Fluent 12.1 basados en los tutoriales de Solver settings del software ...	112
4.2.5.2.2 Resultados del análisis de la dinámica del fluido con Ansys Fluent.....	122
4.2.5.2.3 Análisis del flujo de partículas de pintura en polvo.....	146
4.2.5.2.4 Análisis de resultados obtenidos.....	163
4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRADO	174
4.3.1 SELECCIÓN DE FILTROS	174
4.3.1.1 Etapa inicial: Malla de acero fina convencional	174
4.3.1.2 Etapa final: Tela Filtrante.....	174
4.3.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	175
4.3.2.1 Filtro inicial:	175
4.3.2.2 Filtro final.....	175
4.3.3 CAMBIOS DE COLOR	176
4.4 SELECCIÓN DEL VENTILADOR	176
4.4.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL MOTOR.....	176
4.4.2 SELECCIÓN DE UNA MARCA Y MODELO DISPONIBLE EN EL MERCADO	178

4.4.3 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	180
4.4.4 ACCESORIOS DISPONIBLES DEL MODELO SELECCIONADO	180
4.4.4.1 Cubierta intemperie	180
4.4.4.2 Puerta de inspección	181
4.4.4.3 Brida para la descarga	181
4.4.4.4 Malla de protección en succión y descarga	181
4.4.4.5 Resortes con base	182
4.4.4.6 Cubierta para protección de las chumaceras	182
4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO	183
4.5.1 SISTEMA DE ADMISIÓN	183
4.5.2 SISTEMA DE DESCARGA	183
4.5.2.1 Cálculo de los codos rectos	184
4.5.2.2 Cálculo de los ductos rectos	185
4.5.2.3 Materiales	185
4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA EL VENTILADOR Y MOTOR	186
4.6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO	186
4.6.1.1 Dimensiones	186
4.6.1.2 Cargas totales aplicadas	186
4.6.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL ELEMENTO MÁS CRÍTICO Y DIAGRAMA DE MOMENTOS	188
4.6.3 RESULTADOS OBTENIDOS	190
4.6.4 FACTORES DE CARGA	191
4.6.5 CÁLCULO DE LA SOLDADURA EN LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL VENTILADOR Y MOTOR	192

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

5.1 DIAGRAMAS DE CONSTRUCCIÓN	194
5.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	210
5.3 MEDIOS PARA LA FABRICACIÓN	212

5.3.1 MATERIALES.....	212
5.3.1.1 Parantes y perfiles base de la cabina.....	212
5.3.1.2 Techo de la cabina (vigas transversales y longitudinales)	212
5.3.1.3 Paneles laterales, superiores y posteriores de la cabina y cuarto de succión	212
5.3.1.4 Estructura del cuarto de succión	213
5.3.1.5 Estructura de la base.....	213
5.3.1.6 Elementos de sujeción	213
5.3.2 MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS	214
5.3.2.1 Máquinas.....	214
5.3.2.2 Herramientas.....	220
5.3.3 RECURSO HUMANO.....	226
5.4 DIAGRAMAS DE MONTAJE	227
5.5 CONEXIONES ELÉCTRICAS	229
5.5.1 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL ARRANQUE TOGAMI de 22A CON BOTONERA INCLUIDA PARA MOTORES DE HASTA 7.5 HP. MODELO PAK-26JM	229
5.5.2 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA INSTALACIÓN GENERAL	230
5.6 CONEXIONES DE DUCTOS.....	230

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO

6.1 PRUEBA DE HERMETICIDAD	232
6.2 MEDICIÓN DEL PORCENTAJE DE RECOLECCIÓN DE PINTURA EN POLVO	232
6.2.1 PRUEBAS.....	232
6.2.1.1 Resultados obtenidos.....	233
6.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SISTEMA.....	234
6.3.1 MEDICIÓN EN LA BOCA DE ENTRADA DEL VENTILADOR.....	234
6.3.2 MEDICIÓN EN LA CARA ABIERTA DE LA CABINA.....	235
6.3.3 MEDICIÓN EN LA ENTRADA DEL CUARTO DE SUCCIÓN	237

6.4 NORMATIVA DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	239
CAPÍTULO 7	
ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO	
7.1 COSTOS EN MATERIALES Y EQUIPOS	240
7.2 COSTOS TOTALES	243
7.2.1 COSTO DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL.....	243
7.3 DEPRECIACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO	244
7.4 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.....	245
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	246
CONCLUSIONES	246
RECOMENDACIONES.....	248
REFERENCIAS.....	249
BIBLIOGRAFÍA.....	249
CATÁLOGOS Y MANUALES.....	250
PUBLICACIONES	251
DIRECCIONES DE INTERNET	251
ANEXOS.....	252

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1 Cabina de pintura en polvo	6
Figura 2.2 Cabina de pintura continua	7
Figura 2.3 Cabina de pintura tipo Batch	8
Figura 2.4 Cuarto limpio de pintura.....	9
Figura 2.5 Cabina de alta producción	10
Figura 2.6 Filtros de fibra de vidrio y poliéster.....	12
Figura 2.7 Ejemplo de cuarto de succión	13
Figura 2.8 Ventilador centrífugo.....	13
Figura 2.9 Sección de ducto.....	14
Figura 2.10 Ciclón sedimentador de partículas	14
Figura 2.11 Disposición geométrica de ciclones	16
Figura 2.12 Filtros de aire con media de fibras finas.....	18
Figura 2.13 Filtros de aire con media de fibras espesas.....	18
Figura 2.14 Recuperador con mangas.....	19
Figura 2.15 Funcionamiento de un recuperador con mangas.....	21
Figura 2.16 Aplicación típica de un filtro de mangas en una planta de tratamiento de gas.....	23
Figura 2.17 Filtros de difusión media	25

Figura 2.18 Pre-filtros y fundas filtrantes de escape	25
Figura 2.19 Paneles de entrada.....	26
Figura 2.20 Filtros de entrada húmeda	26
Figura 2.21 Pre-filtro enlazante.....	27
Figura 2.22 Rejillas captadoras de pintura	27
Figura 2.23 Almohadillas y rollos de fibra de vidrio	27
Figura 2.24 Captadores de pintura.....	28
Figura 2.25 Bolsas de pintura.....	28
Figura 2.26 Filtros cúbicos.....	29
Figura 2.27 Rollos de fibra de vidrio y poliéster	29
Figura 2.28 Izquierda: ventilador de transmisión por correa. Derecha: ventilador de transmisión directa.....	30
Figura 2.29 Ventilador centrífugo de transmisión por correa	32
Figura 2.30 Clasificación del tipo de aspas del impulsor.....	33
Fig. 2.31 Rodetes y triángulos de salida para Ventiladores centrífugos según la disposición de los álabes de su impulsor. a) Álabes curvados hacia adelante, b) Álabes de salida radial, c) Álabes curvados hacia atrás	33
Figura 2.32 Curvas de rendimiento para un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH ₂ O; SP: presión estática en inH ₂ O.....	35

Figura 2.33 Curvas de rendimiento para un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH ₂ O; SP: presión estática en inH ₂ O.....	35
Figura 2.34 Ventilador axial de transmisión directa.....	36
Figura 2.35 Curvas de rendimiento para un ventilador axial. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH ₂ O; SP: presión estática en inH ₂ O.....	37
Figura 2.36 Partes de un Ventilador de flujo mixto.....	38
Figura 2.37 Impulsor en un ventilador de flujo mixto.....	39
Figura 2.38 Ventilador de baja presión	39
Figura 2.39 Ventilador de media presión	40
Figura 2.40 Ventilador de alta presión	40
Figura 2.41 Ventilador de muy alta presión (turbocompresor)	41
Figura 2.42 Impulsor.....	41
Figura 2.43 Extractor.....	42
Figura 2.44 Impulsor-Extractor.....	42
Figura 2.45 Axial Mural.....	43
Figura 2.46 De chorro.....	43
Figura 2.47 Designaciones estándar para rotación y descarga (AMCA).....	52
Figura 2.48 Diseños estándar de accionamientos (AMCA).....	53

Figura 2.49 Posiciones estándar de la caja de admisión (AMCA).....	54
Figura 2.50 Posiciones estándar del motor (AMCA)	54
Figura 2.51 Instalaciones comunes.....	55
Figura 2.52 Formas de conexiones correctas e incorrectas.....	56
Figura 3.1 Armario tipo.....	71
Figura 3.2 Perfil en L.....	74
Figura 3.3 Distribución de cargas en la cabina	75
Figura 3.4 Elemento más crítico de la cabina	76
Figura 3.5 Estructura no deformada.....	76
Figura 3.6 Momentos obtenidos gráficamente	77
Figura 3.7 Resultados de deflexión, momento y cortante máximo el elemento más crítico de la cabina.....	78
Figura 3.8 Reacción en el apoyo# 1.....	79
Figura 3.9 Reacción en el apoyo# 2.....	79
Figura 3.10 Reacción en el apoyo# 3.....	80
Figura 3.11 Reacción en el apoyo# 4.....	80
Figura 3.12 Factores de carga de la cabina	81
Figura 3.13 Distribución de cargas aplicadas en la base	83
Figura 3.14 Elemento más crítico de la base	84

Figura 3.15 Momentos obtenidos gráficamente	85
Figura 3.16 Resultados de deflexión, momento y cortante máximo el elemento más crítico de la base.....	86
Figura 3.17 Factores de carga de la base.....	87
Figura 4.1 Puntos principales del análisis de velocidades	96
Figura 4.2 Definición de los volúmenes de control.....	99
Figura 4.3 Precisión y Falsa Difusión.....	101
Figura 4.4 Dominios divididos.....	101
Figura 4.5 Flujo neto en la frontera de un volumen de control	102
Figura 4.6 Volumen de Control usado para ilustrar la Discretización de una ecuación escalar de transporte.....	105
Figura 4.7 Diagrama del Pressure-Based Solver	107
Figura 4.8 Cuadro de diálogo General	112
Figura 4.9 Cuadro de diálogo Models	113
Figura 4.10 Cuadro de diálogo Viscous Model.....	114
Figura 4.11 Cuadro de diálogo Materials	114
Figura 4.12 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials	115
Figura 4.13 Cuadro de diálogo Cell Zone Conditions.....	115
Figura 4.14 Cuadro de diálogo Operating Conditions	116
Figura 4.15 Cuadro de diálogo Boundary Conditions.....	116

Figura 4.16 Cuadro de diálogo Velocity Inlet	117
Figura 4.17 Cuadro de diálogo Pressure Inlet.....	117
Figura 4.18 Cuadro de diálogo Solution Methods	118
Figura 4.19 Cuadro de diálogo Solution Controls.....	119
Figura 4.20 Cuadro de diálogo Monitors	119
Figura 4.21 Cuadro de diálogo Residual Monitors	120
Figura 4.22 Cuadro de diálogo Solution Initialization	120
Figura 4.23 Cuadro de diálogo Run Calculation.....	121
Figura 4.24 Cuadro de diálogo Graphics and Animations.....	121
Figura 4.25 Cuadro de diálogo Contours	122
Figura 4.26 Residuales con 7212 elementos	123
Figura 4.27 Malla de 7212 elementos	123
Figura 4.28 Recorrido de las líneas de velocidad con 7212 elementos	124
Figura 4.29 Contornos de velocidad con 7212 elementos	124
Figura 4.30 Vectores de velocidad con 7212 elementos.....	125
Figura 4.31 Contornos de velocidad en la cara frontal con 7212 elementos.....	125
Figura 4.32 Residuales con 64883 elementos	126
Figura 4.33 Malla de 64883 elementos	126
Figura 4.34 Contornos de velocidad con 64883 elementos	127

Figura 4.35 Vectores de velocidad con 64883 elementos.....	127
Figura 4.36 Contornos de velocidad de la cara frontal con 64883 elementos.....	128
Figura 4.37 Contornos de velocidad en la boca de succión con 64883 elementos.....	128
Figura 4.38 Residuales con 111699 elementos	129
Figura 4.39 Malla de 111699 elementos	129
Figura 4.40 Contornos de velocidad con 111699 elementos	130
Figura 4.41 Vectores de velocidad con 111699 elementos.....	130
Figura 4.42 Contornos de velocidad de la cara frontal con 111699 elementos...	131
Figura 4.43 Residuales con 186550 elementos	131
Figura 4.44 Malla de 186550 elementos	132
Figura 4.45 Contornos de presión dinámica con 186550 elementos	132
Figura 4.46 Contornos de presión estática con 186550 elementos	133
Figura 4.47 Contornos de presión total con 186550 elementos.....	133
Figura 4.48 Contornos de velocidad con 186550 elementos	134
Figura 4.49 Contornos de velocidad en la boca de succión con 186550 elementos (rango 1)	134
Figura 4.50 Contornos de velocidad en la boca de succión con 186550 elementos (rango 2)	135
Figura 4.51 Contornos de velocidad con 186550 elementos (rango 1).....	135

Figura 4.52 Contornos de velocidad con 186550 elementos (rango 2).....	136
Figura 4.53 Vectores de velocidad con 186550 elementos.....	136
Figura 4.54 Contornos de velocidad en la cara frontal con 186550 elementos...	137
Figura 4.55 Residuales con 249004 elementos	137
Figura 4.56 Malla de 249004 elementos	138
Figura 4.57 Contornos de razón de disipación de turbulencia con 249004 elementos.....	138
Figura 4.58 Contornos de intensidad de turbulencia con 249004 elementos.....	139
Figura 4.59 Contornos de energía cinética de la turbulencia con 249004 elementos.....	139
Figura 4.60 Contornos de velocidad con 249004 elementos	140
Figura 4.61 Vectores de velocidad con 249004 elementos.....	140
Figura 4.62 Contornos de velocidad en la cara frontal con 249004 elementos...	141
Figura 4.63 Residuales con cambio de posición del mueble	141
Figura 4.64 Malla de cambio de posición del mueble	142
Figura 4.65 Vectores de velocidad con cambio de posición del mueble	142
Figura 4.66 Contornos de velocidad con cambio de posición del mueble.....	143
Figura 4.67 Contornos de velocidad en la cara frontal con cambio de posición del mueble.....	143
Figura 4.68 Residuales del análisis del cuarto de succión.....	144

Figura 4.69 Malla del análisis del cuarto de succión	144
Figura 4.70 Contornos de velocidad del análisis del cuarto de succión	145
Figura 4.71 Vectores de velocidad del análisis del cuarto de succión	145
Figura 4.72 Contornos de velocidad en el panel de filtros del análisis del cuarto de succión.....	146
Figura 4.73 Cuadro de diálogo General	147
Figura 4.74 Cuadro de diálogo Models	148
Figura 4.75 Cuadro de diálogo Viscous Model.....	148
Figura 4.76 Cuadro de diálogo Set Injection Properties.....	149
Figura 4.77 Cuadro de diálogo Material	149
Figura 4.78 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials (aire)	150
Figura 4.79 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials (polvo)	150
Figura 4.80 Cuadro de diálogo Cell Zone Conditions.....	151
Figura 4.81 Cuadro de diálogo Operating Conditions	151
Figura 4.82 Cuadro de diálogo Boundary Conditions.....	152
Figura 4.83 Cuadro de diálogo Velocity Inlet (cara frontal)	152
Figura 4.84 Cuadro de diálogo Velocity Inlet (pistola).....	153
Figura 4.85 Cuadro de diálogo Wall.....	153
Figura 4.86 Cuadro de diálogo Solution Methods	154

Figura 4.87 Cuadro de diálogo Solution Controls.....	155
Figura 4.88 Cuadro de diálogo Monitors	155
Figura 4.89 Cuadro de diálogo Residual Monitors	156
Figura 4.90 Cuadro de diálogo Solution Initialization	156
Figura 4.91 Cuadro de diálogo Run Calculation.....	157
Figura 4.92 Cuadro de diálogo Graphics and Animations.....	157
Figura 4.93 Cuadro de diálogo Particle Tracks	158
Figura 4.94 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 1)	158
Figura 4.95 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 2)	159
Figura 4.96 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 3)	159
Figura 4.97 Velocidad de las partículas (Caso 1).....	160
Figura 4.98 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 1)	160
Figura 4.99 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 2)	161
Figura 4.100 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 - vista 3)	161
Figura 4.101 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 3 - vista 1)	162

Figura 4.102 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 3 - vista 2)	162
Figura 4.103 Gráfica de velocidad máxima vs N° elementos (Fluent).....	167
Figura 4.104 Gráfica de velocidad máxima vs N° elementos (Flowizard)	168
Figura 4.105 Gráfica de vectores de velocidad máxima vs N° elementos (Fluent).	168
Figura 4.106 Gráfica de vectores de velocidad máxima vs N° elementos (Flowizard)	169
Figura 4.107 Gráfica de velocidad máxima de cara vs N° elementos (Fluent)....	169
Figura 4.108 Gráfica de velocidad máxima de cara vs N° elementos (Flowizard).....	170
Figura 4.109 Gráfica de velocidad media de cara vs N° elementos (Fluent).....	170
Figura 4.110 Gráfica de velocidad media de cara vs N° elementos (Flowizard) .	171
Figura 4.111 Gráfica comparativa de velocidad media de cara vs N° elementos de ambos programas.....	171
Figura 4.112 Curva de factor de corrección por pérdidas de transmisión	177
Figura 4.113 Cubierta del ventilador	180
Figura 4.114 Puerta de inspección.....	181
Figura 4.115 Brida de descarga.....	181
Figura 4.116 Malla de protección de succión.....	182
Figura 4.117 Malla de protección de descarga	182

Figura 4.118 Cubierta de protección	183
Figura 4.119 Codo de 90°	184
Figura 4.120 Localización de cargas aplicadas.....	187
Figura 4.121 Elemento más crítico del cuarto de succión	188
Figura 4.122 Diagrama de momentos del cuarto de succión	189
Figura 4.123 Cortante, momento y deflexión máxima para el elemento más crítico del cuarto de succión.....	190
Figura 4.124 Factores de carga del cuarto de succión	191
Figura 4.125 Gráfico de la ubicación de los cordones de soldadura.....	193
Figura 5.1 Simbología utilizada en los diagramas de construcción.....	194
Figura 5.2 Construcción de los parantes de la cabina	195
Figura 5.3 Construcción de los paneles laterales de la cabina	196
Figura 5.4 Construcción del panel posterior de la cabina	197
Figura 5.5 Construcción de las placas unión de la cabina	198
Figura 5.6 Construcción del perfil transversal del techo de la cabina	199
Figura 5.7 Construcción del soporte	200
Figura 5.8 Construcción de los paneles posteriores del cuarto de succión.....	201
Figura 5.9 Construcción de los paneles laterales del cuarto de succión.....	202
Figura 5.10 Construcción de los paneles superiores del cuarto de succión.....	203

Figura 5.11 Construcción del canal de polvo de recolección del cuarto de succión.....	204
Figura 5.12 Construcción del recipiente de recolección del cuarto de succión ...	205
Figura 5.13 Construcción de los perfiles frontales del cuarto de succión.....	206
Figura 5.14 Construcción del perfil superior del cuarto de succión	207
Figura 5.15 Ensamble final de la cabina de pintura	208
Figura 5.16 Ensamble final del cuarto de succión.....	209
Figura 5.17 Cronograma de actividades	211
Figura 5.18 Taladro de pedestal.....	214
Figura 5.19 Soldadora GMAW	215
Figura 5.20 Dobladora de tol.....	215
Figura 5.21 Cizalla automatizada.....	216
Figura 5.22 Amoladora.....	216
Figura 5.23 Taladro manual.....	217
Figura 5.24 Máquina Pullmax.....	217
Figura 5.25 Cizalla manual.....	218
Figura 5.26 Tronzadora.....	219
Figura 5.27 Soldadora por puntos (RWS)	219
Figura 5.28 Esmeril de banco.....	220

Figura 5.29 Entenalla.....	221
Figura 5.30 Playo de presión.....	221
Figura 5.31 Arco de sierra.....	222
Figura 5.33 Martillo de uña.....	222
Figura 5.34 Juego de racha.....	223
Figura 5.35 Llave mixta.....	223
Figura 5.36 Granete.....	224
Figura 5.37 Flexómetro.....	224
Figura 5.38 Escuadra.....	225
Figura 5.39 Tijera de tol.....	225
Figura. 5.40 Cabina de pintura ensamblada	227
Figura 5.41 Cabina de pintura ensamblada al cuarto de succión, posición para el montaje del ventilador (Vista 1)	227
Figura 5.42 Cabina de pintura ensamblada al cuarto de succión, posición para el montaje del ventilador (Vista 2)	228
Figura 5.43 Cuarto de succión.....	228
Figura 5.44 Diagrama eléctrico del arranque y protección del motor	229
Figura 5.45 Diagrama eléctrico general	230
Fig. 5.46 Configuración del ducto de salida	231
Figura 6.1 Posiciones de medición en la entrada de la cabina	235
Figura 6.2 Posiciones de medición en la entrada del cuarto de succión.....	237

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Leyes de los ventiladores.....	31
Tabla 2.2 Recubrimientos de protección	60
Tabla 3.1 Matriz de criterios.....	65
Tabla 3.2 Matriz de alternativas #1.....	66
Tabla 3.3 Matriz de alternativas #2.....	66
Tabla 3.4 Matriz de alternativas #3.....	67
Tabla 3.5 Matriz de alternativas #4.....	67
Tabla 3.6 Matriz de alternativas #5.....	68
Tabla 3.7 Matriz de priorización.....	69
Tabla 3.8 Producción mensual.....	70
Tabla 3.9 Materiales de construcción de la estructura metálica	73
Tabla 3.10 Materiales de construcción paredes y soporte	74
Tabla 4.1 Matriz de criterios.....	88
Tabla 4.2 Matriz de alternativas #1.....	89
Tabla 4.3 Matriz de alternativas #2.....	89
Tabla 4.4 Matriz de alternativas #3.....	90

Tabla 4.5 Matriz de alternativas #4.....	90
Tabla 4.6 Matriz de priorización.....	91
Tabla 4.7 Ventajas y desventajas del método de volúmenes finitos.....	100
Tabla 4.8 Obtención de la velocidad de cara apropiada a partir de los caudales del catálogo.....	163
Tabla 4.9 Análisis de las velocidades en la cabina.....	164
Tabla 4.10 Análisis de la cabina completa.....	165
Tabla 4.11 Análisis de las velocidades en el cuarto de succión	165
Tabla 4.12 Diferencias en los análisis	166
Tabla 4.13 Condiciones de frontera utilizadas	166
Tabla 4.14 Códigos utilizados.....	167
Tabla 4.15 Resumen de las simulaciones del flujo de partículas.....	173
Tabla 6.1 Resultados de la prueba.....	233
Tabla 6.2 Especificaciones del anemómetro.....	234
Tabla 6.3 Tabla comparativa de las velocidades medidas y calculadas de la boca de entrada del ventilador.....	234
Tabla 6.4 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada de la cabina ...	236

Tabla 6.5 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada del cuarto de succión.....	238
Tabla 7.1 Costos de los materiales de la cabina.....	240
Tabla 7.2 Costos del cuarto de succión	241
Tabla 7.3 Costos de los materiales de la base soporte de muebles	242
Tabla 7.4 Costos de los equipos.....	242
Tabla 7.5 Costos totales.....	243
Tabla 7.6 Costo del análisis computacional	243
Tabla 7.7 Depreciación de los equipos	244
Tabla 7.8 Parámetros de cálculo.....	245

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A: Tabla de propiedades a la flexión de soldadura en filete	253
ANEXO B: Cargas constantes permisible y tamaños mínimos de soldadura de filete.....	254
ANEXO C: Tamaño mínimo de una PJP precalificada	254
ANEXO D: Propiedades de la atmósfera a gran altitud	255
ANEXO E: Tablas de factores de corrección de temperatura y altitud.....	256
ANEXO F: Pérdidas en codos rectos	257
ANEXO G: Pérdidas en ductos rectos	258
ANEXO H: Hoja Técnica del motor trifásico.....	259
ANEXO I: Hoja Técnica del ventilador centrífugo: Catalogo Ventiladores Centrífugos serie CM y CMA. Soler & Palau S.A Pág. 51	260
ANEXO J: Fotografías del proceso de construcción y montaje	261
ANEXO K: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CABINA DE PINTURA ELECTROSTÁTICA.....	268
ANEXO L: PLANOS.....	274

NOMENCLATURA

A1	: Ancho de la cabina
Aev	: Área de entrada del ventilador
Anf	: Ancho del panel de filtros
Apf	: Área del panel de filtros
Asc	: Área de la sección transversal de la cabina perpendicular al flujo
C_{μ}	: Constante
C1	: Distancia del centro de gravedad
C_{1E} , C_{2E} , C_{3E}	: Constantes
d	: Longitud del cordón de soldadura (mm)
dB	: Decibeles
Deq	: Diámetro equivalente
din	: Longitud del cordón de soldadura (in)
Din	: Distancia de la fuerza al centro de gravedad de la soldadura (mm)
Dinc	: Distancia de la fuerza al centro de gravedad de la soldadura (in)
F1	: Fuerza aplicada a la soldadura (kg)
F2	: Fuerza aplicada a la soldadura (lbf)
Fa	: Factor de corrección por altitud
Ft	: Factor de corrección por temperatura
Ftot	: Factor de corrección total
g	: Aceleración de la gravedad
G_b	: Energía cinética de turbulencia debido a sustentación hidráulica
G_k	: Energía cinética de turbulencia debido a gradientes
gL	: Gravedad a 2800 m.s.n.m
h	: Altura del sitio de trabajo
h1	: Cordón de soldadura mínimo requerido (in)

H1	: Largo de la boca de salida del ventilador
h2	: Cordón de soldadura mínimo requerido (mm)
h3	: Cordón de soldadura propuesto según norma AWS
Ha1	: Altura de la cabina
Hpf	: Altura del panel de filtros
I	: Matriz identidad
Iu	: Segundo momento de área unitaria
k	: Energía cinética de turbulencia
L1	: Largo de la cabina
M	: Momento generado
n	: Factor de seguridad de la junta
Nfaces	: Número de caras que encierra una celda
η_t	: Rendimiento del ventilador
\varnothing_{ev}	: Diámetro de la boca de entrada del ventilador
P	: Presión estática
Patm	: Presión atmosférica
Pdin1	: Presión dinámica en el punto 1
Pdin2	: Presión dinámica en el punto 2
Pdin3	: Presión dinámica en el punto 3
Pdin4	: Presión dinámica en el punto 4
Pe1	: Presión estática en el punto 1
Pe2	: Presión estática en el punto 2
Pe3	: Presión estática en el punto 3
Pe4	: Presión estática en el punto 4
Pec	: Presión estática corregida
Pet1	: Presión estática del ventilador (Catálogo)
Pota	: Potencia del ventilador entregada al aire a nivel del mar
Potac	: Potencia del ventilador entregada al aire corregido
Potc	: Potencia corregida
Potr	: Potencia que el ventilador recibe en su eje (real)

Potv	: Potencia que el ventilador recibe en su eje (catálogo)
Pt1	: Presión total en el punto 1
Pt2	: Presión total en el punto 2
Pt3	: Presión total en el punto 3
Pt4	: Presión total en el punto 4
Pv	: Potencia del ventilador (lbf*ft/min)
Pv1	: Potencia del ventilador (Hp)
Qext	: Caudal de trabajo (m ³ /s)
Qext1	: Caudal de trabajo (CFM)
Qf	: Caudal de trabajo según catálogo
Qmáx	: Caudal máximo de trabajo (CFM)
Qmín	: Caudal mínimo de trabajo (CFM)
Re	: Número de Reynolds
re1	: Relación de la boca largo/ancho
RPM	: Velocidad de giro (revoluciones por minuto)
S _k , S _c	: Números definidos por el usuario
Sy	: Resistencia a la fluencia
Syy	: Resistencia mínima a la fluencia
T	: Temperatura ambiente
V1	: Volumen de la cabina
Ve1	: Velocidad de salida del ventilador
Vface	: Velocidad de cara de la cabina
Vneto	: Volumen neto de la cabina
Vp1	: Velocidad en el punto 1
Vp1°	: Velocidad sin caída de presión de entrada del ventilador
Vp2	: Velocidad en el punto 2
Vp2°	: Velocidad sin pérdida de presión en el punto 2
Vp3	: Velocidad sin pérdida de presión en el punto 3
Vp4	: Velocidad en el punto 4
W1	: Ancho de la boca de salida del ventilador

Y_M	: Contribución de la dilatación fluctuante
z	: Altura sobre el nivel de referencia
γ_{ag}	: Peso específico del agua (N/m^3)
γ_{ag1}	: Peso específico del agua (lbf/ft^3)
v	: Velocidad de flujo del fluido
ρ	: Densidad del fluido
ρ_a	: Densidad del aire corregida
ρ_{ag}	: Densidad del agua a la temperatura del fluido
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: Números de Prandtl turbulentos
τ	: Esfuerzo cortante permisible
ϵ	: Tasa de disipación
\mathcal{V}	: Volumen de la celda
\vec{A}_f	: Área de la cara
ϕ_f	: Valor de ϕ a través de la cara f
$\nabla\phi_f$: Gradiente de ϕ en la cara f
∇_ϕ	: Gradiente de ϕ
\vec{A}	: Vector de área
\vec{F}	: Vector fuerza
S_ϕ	: Fuente de ϕ por unidad de volumen
Γ_ϕ	: Coeficiente de difusión para ϕ
$\rho_f * \vec{v}_f * \vec{A}_f$: Flujo másico a través de la cara
\vec{v}	: Vector velocidad
$\bar{\tau}$: Tensor de esfuerzo
ΔP_{tin}	: Caída de presión (inH_2O)
μ_t	: Viscosidad turbulenta

RESUMEN

Este proyecto surgió de la necesidad que existía en el área de pintura especial del Centro de Producción de la ESPE sede Latacunga, donde el proceso de pintado se encontraba incompleto en sus fases, al no existir un ambiente controlado de trabajo para pintar los productos manufacturados en este Centro de Producción.

Al no existir una cabina adecuada con su respectivo sistema de extracción de las partículas de pintura en polvo, el proceso de pintado generaba mucho desperdicio lo que se traduce en mayores costos de producción y menor competitividad en el mercado. Otro problema existente era el riesgo inminente en la salud de los trabajadores, debido a que la pintura en polvo era esparcida sin ningún control esta llegaba incluso a áreas ajenas a la de pintura, por lo que se ponía en riesgo el sistema respiratorio del personal directa o indirectamente involucrado en el proceso de pintura especial. Por esto motivo el día 5 de mayo del 2010 los representantes directos del Centro de Producción tomaron la decisión de financiar la elaboración de un sistema de recolección de partículas de pintura para el mejoramiento del proceso productivo.

Para llevar a cabo este proyecto se tomaron en cuenta varios aspectos como: el espacio físico disponible, el presupuesto asignado, la utilización de los conocimientos adquiridos y la investigación necesaria para el cumplimiento satisfactorio de los objetivos buscados.

Primeramente se procedió a diseñar la cabina, mediante la utilización del software de cálculo estructural SAP2000, en base al volumen de producción y a la geometría de los muebles metálicos producidos, llegando a establecerse una cabina tipo Batch como la más adecuada para este tipo de proceso, y con las siguientes dimensiones: 3.5 metros de largo, 1.8 metros de ancho y 2.2 metros de alto.

En segundo lugar se procedió a diseñar una base metálica móvil de trabajo con la ayuda del software SAP2000, para mejorar las condiciones del operador en cuanto a ergonomía y a su vez reducir los tiempos del proceso.

En tercer lugar se procedió a seleccionar el sistema de recolección más adecuado, el cual luego de un análisis de varios criterios resultó como más apropiado un sistema de panel de filtros con un cuarto de succión independiente de la cabina. Posterior a este diseño se seleccionó en base a los modelos disponibles en el mercado y al cumplimiento de los criterios de diseño establecidos, un ventilador de tipo centrífugo para generar la presión negativa necesaria para obtener una alta eficiencia de captación y que se acople a las configuraciones geométricas del diseño.

La estructura del cuarto de succión que a su vez sirve como soporte para el ventilador fue diseñada en el software SAP2000. La selección del ventilador se realizó mediante un estudio de mecánica de fluidos computacional, el cual es el único medio posible para analizar el complejo comportamiento de la mezcla aire y partículas de pintura en polvo dentro de la cabina y cuarto de succión hasta su llegada a la boca de succión del ventilador como aire limpio. Los programas utilizados para analizar la dinámica del fluido de este sistema fueron: ANSYS FLUENT versión 12.1 y FLOWIZARD versión 2.0.4. Los programas utilizados para realizar el mallado de la geometría del sistema fueron GAMBIT 2.4.6 y el programa realizador de mallas propio del paquete ANSYS.

Después de completar la construcción y montaje del sistema, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento pertinentes para verificar que se cumplan los parámetros de diseño establecidos y corroborar los resultados obtenidos con el análisis teórico. Las pruebas de captación de pintura dieron como resultado un promedio de eficiencia del 68%. El promedio de velocidad del aire medido en la cara abierta de la cabina es de 0.5 m/s, el cual está dentro del rango permitido y se acerca satisfactoriamente a los resultados del análisis computacional.

Se realizó un análisis económico y financiero para calcular la depreciación del sistema completo, y además el tiempo de recuperación de la inversión total, el cual resultó en un ahorro mensual de \$421.88 La inversión total será recuperada en aproximadamente 10 meses.

Una vez cumplidos todos los objetivos, los beneficiarios directos son el Centro de Producción y los autores de este proyecto, el cual ha concluido satisfactoriamente al haberse obtenido excelentes resultados y la conformidad de sus financiadores y el personal operativo.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto a desarrollarse a lo largo de este documento está destinado al beneficio del Centro de Producción ESPE sede Latacunga. Esta es una empresa dedicada a la fabricación de muebles metálicos de oficina y otros.

Los muebles metálicos pasan por una serie de procesos hasta llegar al acabado final y su posterior entrega. El primer punto es el ensamble metal mecánico, posteriormente se somete a un proceso de pintura electrostática donde las partículas de polvo de la pintura se cargan eléctricamente mientras el mueble metálico a pintar está conectado a tierra, lo que produce una atracción electrostática que permite adherirle al mueble una película de polvo suficiente, y el espesor deseado según la calibración del equipo, para recubrir toda su superficie de manera pareja y total.

Posteriormente pasa a un horno de curado en donde la pintura se funde y fija al metal, logrando con esto una adherencia y resistencia muy altas. Este tipo de proceso de pintura ofrece excelentes resultados en términos de acabado y sello hermético. En la industria manufacturera se encuentra una amplia aplicación, de hecho, desde un punto de vista cualitativo, es más fácil de aplicar, y desde un punto de vista ecológico, no crea ningún problema para los operadores y el medio ambiente.

En la actualidad el Centro de Producción de la ESPE sede Latacunga no cuenta con ningún sistema de recolección de las partículas de pintura y por lo tanto se emiten al ambiente, esto le representa a la empresa un alto costo de producción por el desperdicio de material. Cabe recalcar que este tipo de pintura es reutilizable en un gran porcentaje. Otro gran problema es la salud ocupacional de

los trabajadores ya que ellos respiran este material particulado que se acumula en gran medida en el ambiente de trabajo produciéndoles a corto o largo plazo enfermedades respiratorias.

Este proyecto surgió de la necesidad de dar solución a estos problemas y por lo tanto los directivos del Centro de Producción han decidido desarrollarlo y ponerlo en marcha con el siguiente nombre: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE PARTÍCULAS DE PINTURA ELECTROSTÁTICA PARA EL CENTRO DE PRODUCCIÓN E.S.P.E. LATACUNGA”

1.2 ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en el país todavía no se encuentra muy difundido este proceso de pintura ya que los equipos y la materia prima presentan una cierta dificultad de adquisición.

Existen empresas en el país que utilizan este procedimiento pero lo realizan de una manera algo artesanal por lo que no se pueden aprovechar al máximo las ventajas de este tipo de proceso.

El proceso de pintura electrostática se implementó en el año de 1996 en el Centro de Producción de la ESPE sede Latacunga, sin embargo no está completo en todas sus fases.

Se hizo la adquisición de equipos analógicos para la aplicación de la pintura en polvo, y mediante un proyecto de tesis se realizó recientemente el diseño y construcción de un horno para el curado u horneado de las piezas metálicas, el cual está ya instalado completamente y en funcionamiento.

En el proceso de pintura especial en el Centro de Producción no existe una etapa de limpieza llevada a cabo en forma técnica y completa en donde se realice

desengrase, decapado y fosfatizado para lograr la máxima adherencia y resistencia establecidas por el fabricante de este tipo de pintura en polvo.

Existe una limitante en cuanto al espacio disponible para la pintura ya que esta actualmente se realiza en un área de aproximadamente 25m² ubicada próxima al horno de curado.

Se debe mencionar también que existe una estructura metálica incompleta de una cabina para pintura electrostática pero lamentablemente sus dimensiones son inferiores a los requerimientos en cuanto a espacio, geometría y capacidad de recepción de los muebles metálicos. Además la cabina actualmente se encuentra en desuso debido a estas limitaciones presentadas

Actualmente el proceso de pintura se está realizando en el ambiente de trabajo (sin la utilización de una cabina), sin ningún sistema de recolección para las partículas sobrantes de la pintura en polvo, lo que significa pérdidas económicas para la institución ya que este tipo de pintura está diseñada para ser reutilizada cerca del 100% y en este momento el porcentaje de reutilización es muy bajo o nulo.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El desarrollar este sistema busca conseguir excelentes resultados tanto en términos de aprovechamiento de la pintura, un medio adecuado de trabajo y mejores acabados.

Con la implementación de este sistema de una cabina bien dimensionada e iluminada y su sistema de extracción, se pretende alcanzar un alto aprovechamiento del proceso de pintura, esto implica dejar de lado los procesos artesanales que generan muy bajos niveles de producción y mucho desperdicio, sino más bien; desarrollar un sistema técnico-competitivo dentro de la industria y a un bajo costo.

Algunas de las ventajas que se presentan al implementar este sistema son las siguientes:

- Se reducen los defectos del proceso de pintura en polvo.
- Se mantiene el ambiente de trabajo ordenado y limpio.
- Se reducen costos y tiempos de producción.
- Las cabinas poseen un sistema de iluminación eficiente para brindar al operador condiciones de trabajo adecuadas.
- Existe una continua ventilación gracias al sistema de extracción, que impide que el aire de la cabina se sature de partículas lo cual puede producir un ambiente desfavorable de trabajo.

Estas son las ventajas que se presentan al implementar el proyecto, el cual será en beneficio inmediato del Centro de Producción. Para el desarrollo del sistema serán necesarios los conocimientos de Mecánica de fluidos y Resistencia de materiales.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Diseñar y construir una cabina con un sistema de recolección de partículas de pintura electrostática para su reutilización, consiguiendo una eficiencia de captación del 60%.

1.4.2 ESPECÍFICOS

- Dimensionar la geometría óptima de la cabina de pintura en base al volumen de producción y los tipos de productos que se fabrican.
- Diseñar el sistema más adecuado de extracción de partículas de pintura para conseguir la máxima eficiencia de reutilización a un bajo costo.

- Utilizar las herramientas computacionales de la Mecánica de fluidos para analizar el comportamiento del aire y las partículas de polvo dentro de la cabina.

1.5 ALCANCE

Mejorar los procedimientos de pintura electrostática mediante un correcto aprovechamiento de la materia prima, equipos, recursos económicos, tiempo y la infraestructura. Alcanzando mayores estándares de calidad, así como también mayor productividad. Se desea brindar además un ambiente más adecuado de trabajo en cuanto a seguridad, orden, limpieza y mayores prestaciones para un mejor desempeño laboral.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 CABINA DE PINTURA EN POLVO

La cabina es un componente fundamental en el taller de pintura, en la que se produce el ambiente idóneo para un pintado de calidad. Pero no sólo aporta ventajas al garantizar un acabado perfecto, sino también desde el punto de vista medio ambiental, ya que se retienen la mayoría de partículas de pintura, y desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales, ya que permite al pintor trabajar en condiciones controladas.



Figura 2.1 Cabina de pintura en polvo¹

2.1.1 DEFINICIÓN

Son estructuras diseñadas como recintos semi-abiertos o cerrados para realizar la operación de pintado mediante pintura en polvo (electrostática), en la cual se introducen las partes a pintar. Dentro de la cabina existe una circulación forzada de aire lo que permite arrastrar los restos de una pulverización aerográfica.

¹ <http://www.cabinser.com/Pages/cabsec.html>

2.1.2 CLASIFICACIÓN Y PARTES

Las cabinas de pintura en polvo constan de diferentes partes de acuerdo a su tipo de construcción y necesidad industrial.

2.1.2.1 Cabinas Continuas

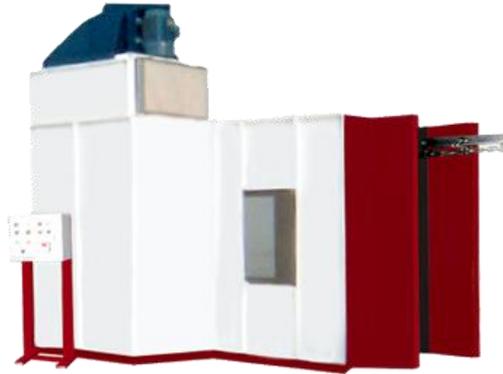


Figura 2.2 Cabina de pintura continua²

Adecuados para producción media, minimizan el manejo de material evitando defectos en el acabado final. Algunas de sus características son:

- Agilizan la producción y permiten reducir costos en el consumo de combustible del horno.
- Son utilizadas regularmente en sistemas con transportadores aéreos
- Filtros fabricados en poliéster que incrementan la duración y maximizan la recuperación de polvo.
- Sistema de auto limpieza de filtros a través de pulsos de aire de alta velocidad

Partes principales:

- Recuperador
- Filtros de absorción

² http://www.powdertronic.com/cabinas_polvo/continuas.html

- Paneles protectores
- Tablero de control

2.1.2.2 Cabinas Batch

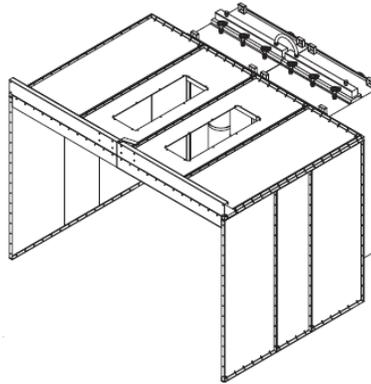


Figura 2.3 Cabina de pintura tipo Batch³

- Adecuadas para producciones medianas y pequeñas, para cuando se tiene una gran variedad de piezas y colores; o bien, las piezas son muy pesadas.
- Fabricadas en paneles modulares de ensamblado fácil.
- Extractor centrífugo de alta eficiencia, alta presión y gran caudal de flujo.
- Filtros fabricados en poliéster que incrementan la duración y maximizan la recuperación de polvo.
- Sistema de auto limpieza de filtros a través de pulsos de aire de alta velocidad.

Partes principales:

- Recuperador con extractor centrífugo
- Filtros de poliéster (tipo cartucho)
- Paneles modulares
- Tablero de control
- Piso falso (para partes ligeras)

³ Catálogo de Global Finishing Solutions, Powder Booths, 2006 pág 2.

2.1.2.3 Cuarto Limpio de Pintura



Figura 2.4 Cuarto limpio de pintura⁴

- Utilizados cuando se requiere una pureza extrema de la pintura.
- Evitan la existencia de contaminantes en la pintura (pelusas, polvo, etc.)
- Pueden incluir controles de humedad y temperatura para mantener las condiciones del cuarto homogéneas a lo largo del día.

Partes principales:

- Recuperador posterior con extractor centrífugo
- Filtros para pintura en polvo
- Paneles modulares
- Puertas de seguridad
- Tablero de control
- Sistema de iluminación

⁴ Imagen obtenida de la página web de la empresa Powdertronic:
http://www.powdertronic.com/cabinas_polvo/cabinas_polvo.html

2.1.2.4 Cabinas de alta producción

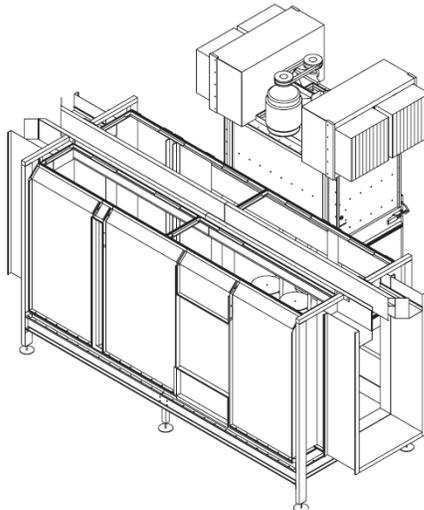


Figura 2.5 Cabina de alta producción⁵

Están diseñadas para incrementar la productividad del sistema de pintura. Poseen las siguientes características:

- Construida con paneles de acero inoxidable o vidrio templado
- Posee filtros tipo cartucho para recolectar el polvo
- Máxima eficiencia en el flujo de aire
- Diseñada con ángulos especiales que permiten su fácil limpieza
- Cuenta con un extractor, selenoides de aire con venturios diseñados para proveer una gran eficiencia a través de los filtros de cartucho.
- Sistema automatizado de pistolas
- Sistema de presión de aire controlado mediante PLC's.

2.1.3 TIPOS DE MATERIALES

Características Constructivas:

- Cabinas para pintura en polvo, en chapa de acero galvanizado de 0.5, 0.7, 1,5 mm. de espesor, o con panel doble tipo sándwich, módulos desde 2mm.

⁵ Catálogo de Global Finishing Solutions, Powder Booths, 2006 pág 2.

- Estructura de soporte de toda la cabina, para dar consistencia estructural al sistema.
- Paneles de chapa estándar, tipo mecano, totalmente desmontables.
- Montaje del conjunto atornillado, facilitando eventuales traslados, y/o modificaciones.

Los materiales más adecuados para la construcción de las cabinas de pintura son el vidrio templado o el acero inoxidable, debido a sus propiedades anti corrosivas y de fácil limpieza; pero debido a que estos materiales son muy costosos, cuando no es posible su adquisición se utiliza como alternativa más económica el acero galvanizado.

Otra alternativa de construcción se presenta mediante el poliuretano. Este tipo de material suele estar constituido en paneles de 8 cm de espesor aproximadamente para evitar su fractura y eventuales daños en el mismo. Pero el principal limitante en la adquisición de este producto es su elevado costo en nuestro mercado.

2.2 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN

2.2.1 DESCRIPCIÓN Y COMPONENTES

La extracción localizada capta el contaminante en su lugar de origen antes de que pueda pasar al ambiente de trabajo. La mayor ventaja es su menor requerimiento de aire además que no contribuye a esparcir el contaminante.

Un sistema de extracción localizada consta de:

- Separador (filtro): para separar el contaminante del aire, recogéndolo de forma adecuada y liberar aire limpio.
- Cuarto de succión: es un espacio sellado lo más herméticamente posible para evitar fugas y poder alcanzar una buena presión de succión.

- Ventilador: para transmitir la energía necesaria al aire y hacerlo circular a través del sistema.
- Ducto: para transportar el aire al sitio adecuado, evitando que se disperse en el sitio de trabajo.

A continuación se detalla las características básicas de cada uno de los componentes:

2.2.1.1 Separador (filtros)

El objeto de los separadores o purificadores es recoger el contaminante del aire antes de que éste entre a la atmósfera. Un dispositivo separador de aire adecuado debería formar parte de todo sistema de extracción.

En algunas ocasiones el material recogido en los filtros representa algún valor económico pero no es el caso más frecuente.



Figura 2.6 Filtros de fibra de vidrio y poliéster

2.2.1.2 Cuarto de succión

Es un espacio sellado lo más herméticamente posible para evitar fugas con el objetivo de poder alcanzar una buena presión de succión y así arrastrar la mayoría del material particulado hacia los filtros.

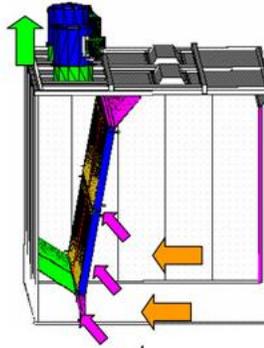


Figura 2.7 Ejemplo de cuarto de succión

2.2.1.3 Ventilador

Los ventiladores son los dispositivos que suministran energía al sistema para el movimiento del aire en el interior del mismo. Siempre que sea posible, el ventilador se colocará después del separador, con objeto de que por él pase aire limpio y así evitar el deterioro del mismo por erosión de partículas o corrosión de las diversas sustancias



Figura 2.8 Ventilador centrífugo

2.2.1.4 Ductos

El ducto en un sistema de extracción localizada es el lugar por donde se traslada el aire contaminado o limpio y lo dirige hacia cierto lugar de descarga. En los ductos es importante que estén presentes los siguientes aspectos:

- En la extracción de polvo, la velocidad del conducto debe ser lo suficientemente alta para evitar que el polvo sedimente y atasque la tubería.

- En la localización y construcción de los ductos deben estar previstos los medios de protección necesarios para evitar la corrosión, con objeto de aumentar la vida del sistema de extracción.



Figura 2.9 Sección de ducto

2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE EXTRACCIÓN

2.2.2.1 Recuperador con ciclón

Los ciclones son uno de los equipos más empleados dentro de las operaciones de separación de partículas sólidas de una corriente gaseosa, además de poder emplearse para separar sólidos de líquidos.

Su éxito se debe en parte a que son equipos de una gran sencillez estructural debido a que no poseen partes móviles y a que apenas exigen mantenimiento.

Utiliza fuerzas centrífugas en vez de gravitatorias lo que hace que la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa en gran medida haciéndose más efectiva la separación.

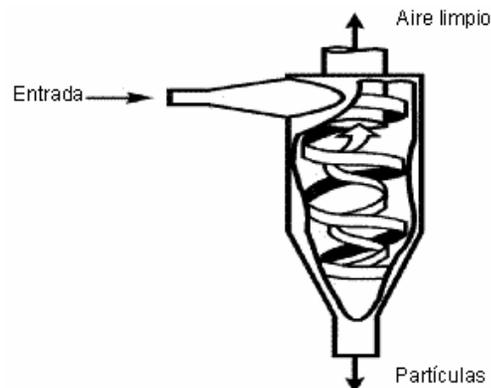


Figura 2.10 Ciclón sedimentador de partículas

Un separador ciclónico está compuesto básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, dotado de una entrada tangencial normalmente rectangular

La corriente gaseosa cargada con las partículas sólidas se introduce tangencialmente en el recipiente cilíndrico a velocidades de aproximadamente 30m/s, saliendo el gas limpio a través de una abertura central situada en la parte superior.

Se observa que el modelo de flujo seguido por el gas dentro de los ciclones es el de un doble vórtice. Primero el gas realiza una espiral hacia abajo y por la zona exterior, para después ascender por la zona interior describiendo igualmente una hélice.

Las partículas de polvo tienden a moverse hacia la periferia del equipo alejándose de la entrada del gas y recogándose en un colector situado en la base cónica.

Se trata de un equipo muy eficaz a menos que la corriente gaseosa contenga una gran proporción de partículas de diámetro inferior a unos 10 μm . Aunque se puedan emplear ciclones para separar partículas con diámetros mayores de 200 μm , esto no suele ser muy frecuente ya que los sedimentadores por gravedad o los separadores por inercia resultan normalmente más efectivos y menos sujetos a abrasión.

2.2.2.1.1 Clasificación

Una forma de clasificar los distintos tipos se puede efectuar atendiendo a la manera en que se produce la carga y la descarga del equipo y otro modo sería en función de su eficiencia: De acuerdo a su disposición geométrica (Figura 2.11) se distinguen los siguientes tipos de separadores ciclónicos:

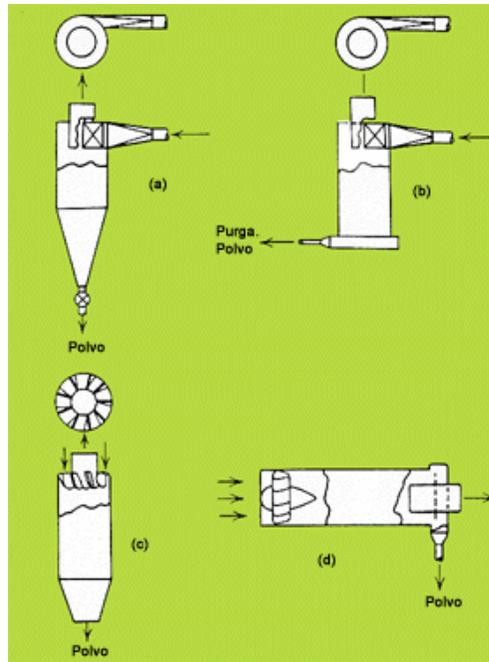


Figura 2.11 Disposición geométrica de ciclones

(a)- entrada tangencial y descarga axial

(b)- entrada tangencial y descarga periférica

(c)- entrada y descarga axiales

(d)- entrada axial y descarga periférica

Otra posible clasificación de los ciclones se puede realizar en función de su eficiencia.

La eficiencia de un ciclón está determinada en gran medida por su tamaño. Se ha comprobado que los ciclones de menor diámetro son los que proporcionan mejores eficacias en la separación de partículas. Asimismo se observa que la altura total del equipo también afecta a la eficacia, aumentando ésta con la altura.

Según este criterio se consideran los siguientes tipos:

- muy eficientes (98 - 99%)

- moderadamente eficientes (70- 80%)
- de baja eficiencia (50%)

Existen también los denominados hidro-ciclones que se encargan de separar las partículas sólidas de líquidos.

2.2.2.1.2 Aplicaciones de los ciclones

En general sus aplicaciones son muy parecidas a las de los filtros de mangas.

Los ciclones se pueden emplear también como equipos de limpieza previos a los filtros de mangas y cuentan con la ventaja de que pueden ser diseñados para tratar con un rango de condiciones químicas y físicas más amplio que cualquier otro equipo de captación de partículas.

Los ciclones se pueden disponer bien en serie, buscando una mejor separación de los sólidos, o bien en paralelo si se ha de hacer frente a grandes caudales.

Se suelen emplear para el control de la contaminación del aire de determinadas fuentes, tales como plantas generadoras de electricidad a partir de combustibles fósiles, en hornos de tostación, refinerías petrolíferas, molinos de pasta de papel e incineradores.

Entre las aplicaciones de los ciclones hay que destacar también las de los hidro-ciclones, muy utilizados por ejemplo para la depuración de aguas residuales y en otros sistemas de lavado.

2.2.2.2 Recuperador con sistema de filtros

Los filtros de aire retienen las partículas que entran en contacto con la superficie de las fibras de la media filtrante y se adhieren a las mismas.

Existen dos grandes categorías de filtros de aire:

2.2.2.2.1 Filtros de aire con media de fibras finas



Figura 2.12 Filtros de aire con media de fibras finas

Estos filtros utilizan medias filtrantes cuyas fibras tienen un diámetro lo suficientemente pequeño como para permitir la parada eficaz de partículas sub-micrónicas sin atracción electrostática. La media de fibras finas tiene a menudo fibras de vidrio o PTFE (politetrafluoroetileno, teflón).

2.2.2.2.2 Filtros de aire con media de fibras espesas

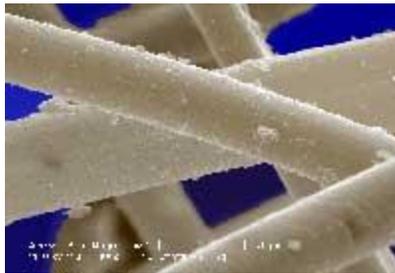


Figura 2.13 Filtros de aire con media de fibras espesas

Estos filtros utilizan medias filtrantes cuyas fibras tienen un diámetro que no permite, normalmente, detener de manera eficaz las partículas sub-micrónicas. Para detener estas partículas con más eficacia, la media se carga electrostáticamente para permitir una atracción de esta naturaleza de las partículas. Las medias de fibras espesas tienen a menudo fibras sintéticas.

La instalación de estos filtros se la realiza antes del ventilador para que se contengan todas las partículas de pintura en polvo. Estos filtros producen una caída de presión la misma que se debe tomar en cuenta para la selección del ventilador y sus parámetros de funcionamiento.

2.2.2.3 Recuperador con mangas

Los filtros de mangas son considerados como los equipos más representativos de la separación sólido-gas mediante un medio poroso. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa, esto se consigue haciendo pasar dicha corriente a través de un tejido.

El tamaño de las partículas a separar por los filtros de mangas será entre 2 y 30 μm . Sin embargo, no es usual disponer de medios filtrantes con poros tan pequeños como para retener las partículas que transporta el gas, debido a que los diámetros de éstas son extraordinariamente pequeños. Por tanto la filtración no comienza a efectuarse de manera efectiva hasta que no se han acumulado una cierta cantidad de partículas sobre la superficie de la bolsa en forma de torta filtrante.

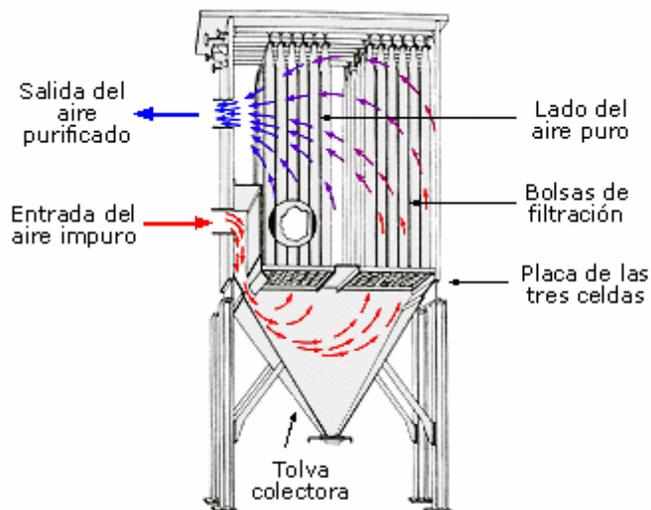


Figura 2.14 Recuperador con mangas

Los filtros de mangas constan de una serie de bolsas con forma de mangas, normalmente de fibra sintética o natural, colocadas en unos soportes para darles consistencia y encerrados en una carcasa como muestra la figura 2.14.

El gas sucio, al entrar al equipo, fluye por el espacio que está debajo de la placa a la que se encuentran sujetas las mangas y hacia arriba para introducirse en las mangas.

A continuación el gas fluye hacia afuera de las mangas dejando atrás los sólidos. El gas limpio fluye por el espacio exterior de los sacos y se lleva por una serie de conductos hacia la chimenea de escape.

La eliminación de polvo o de las pequeñas gotas que arrastra un gas puede ser necesaria bien por motivos de contaminación, para acondicionar las características de un gas a las tolerables para su vertido a la atmósfera, o bien como necesidad de un proceso para depurar una corriente gaseosa intermedia en un proceso de fabricación. En ocasiones el condicionante de la separación será un factor de seguridad, ya que algunos productos en estado de partículas muy finas forman mezclas explosivas con el aire.

La característica principal que diferencia unos tipos de filtros de mangas de otros es la forma en que se lleve a cabo su limpieza. Esto además condiciona que los filtros sean continuos o discontinuos.

- Continuos: la limpieza se realiza sin que cese el paso del aire por el filtro
- Discontinuos: es necesario aislar temporalmente la bolsa de la corriente de aire.

Según este criterio, se tienen tres tipos principales de filtros de mangas que son los siguientes:

- Por sacudida,
- Sacudida y aire inverso
- Aire inverso.

Para seleccionar el tipo de manga necesaria se debe tener en cuenta que debe cumplir una serie de condiciones como:

- Ser resistente química y térmicamente al polvo y al gas
- Las mangas deben recoger el polvo de manera eficiente
- Resistente a la abrasión ocasionada por el polvo
- Caudal y velocidad del gas apropiada

2.2.2.3.1 Operación de los filtros de mangas

La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, a través de la tela que forma la bolsa, de esa forma las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela formando una torta filtrante. De esta manera la torta va engrosando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema. Para evitar disminuciones en el caudal se procede a efectuar una limpieza periódica de las mangas.



Figura 2.15 Funcionamiento de un recuperador con mangas⁶

⁶ Catálogo de United Air Specialists, Inc. BDC series página 4

2.2.2.3.2 Operación de la filtración

- Una corriente de gas cargado de polvo entra al equipo, choca contra una serie de paneles y se divide en varias corrientes.
- Las partículas más gruesas se depositan directamente en el fondo de la tolva cuando chocan contra dichos paneles.
- Las partículas finas se depositan en la superficie del tejido cuando el gas pasa a través de la bolsa.
- Una vez que el gas ha sido filtrado, éste fluye (ya limpio) a través de la salida y se descarga a la atmósfera por medio de un ventilador.

2.2.2.3.3 Operación de la limpieza

Las partículas depositadas en la superficie de la bolsa se sacuden durante un breve periodo de tiempo por medio de aire comprimido inyectado desde una tobera hacia la bolsa, o bien de manera mecánica.

El chorro de propulsión actúa periódicamente mediante un controlador automático de secuencia.

El polvo recogido en el fondo de la tolva se descarga mediante un transportador de tornillo helicoidal y una válvula rotativa.

La limpieza de las mangas no es completa en ningún caso debido a la dificultad para desprender la torta en su totalidad y también porque, si se aplicaran procedimientos más vigorosos de limpieza, el desgaste de las mangas sería mayor y se provocaría un mayor número de paradas de planta motivadas por el cambio de las mangas.

La eficiencia del filtro será baja hasta que se forme sobre la superficie del tejido filtrante una capa que constituye el medio filtrante para la separación de partículas finas.

La limitación más importante que se da en los filtros de mangas es la debida a la temperatura, ya que se debe tener en cuenta el material del que está constituida la tela para conocer la temperatura máxima que se puede aplicar.

Así para fibras naturales la temperatura máxima a aplicar es alrededor de 90°C. Los mayores avances dentro de este campo se han dado en el desarrollo de telas hechas a base de vidrio y fibras sintéticas, que han aumentado la temperatura máxima aplicable hasta rangos de 230 a 260 °C.

2.2.2.3.4 Aplicaciones

Los filtros de mangas aparecen en todos aquellos procesos en los que sea necesaria la eliminación de partículas sólidas de una corriente gaseosa.

Los filtros de mangas son capaces de recoger altas cargas de partículas resultantes de procesos industriales de muy diversos sectores, tales como: Cemento, yeso, cerámica, caucho, química, petroquímica, siderúrgica, automovilística, cal, minera, amianto, aluminio, hierro, coque, silicatos, almidón, carbón, anilina, fibras de granos etc.

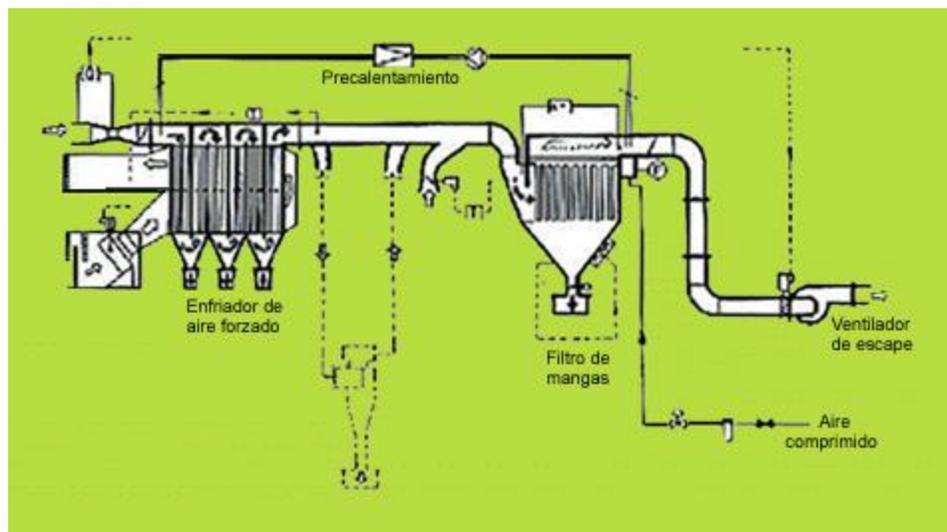


Figura 2.16 Aplicación típica de un filtro de mangas en una planta de tratamiento de gas

La recogida de polvo o eliminación de partículas dispersas en gases se efectúa para finalidades tan diversas como:

1. Control de la contaminación del aire; como la eliminación de cenizas volantes de los gases de escape en una central eléctrica.
2. Reducción del coste de mantenimiento de los equipos; como la filtración de la toma de aire de un motor o el tratamiento del gas de tostación de piritas previo a su entrada a una planta de ácido sulfúrico
3. Eliminación de peligros para la salud o para la seguridad; como la recogida de polvos silíceos y metálicos resultantes de equipos de molienda y trituración y en algunas operaciones metalúrgicas y en el ensacado.
4. Mejora de la calidad del producto; como la limpieza del aire para la producción de productos farmacéuticos o de película fotográfica.
5. Recuperación de productos valiosos; como la recogida de partículas procedentes de secadores y hornos de tostación.
6. Recogida de productos en polvo; aplicado a casos como en el transporte neumático.

2.2.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE FILTRADO

2.2.3.1 Recuperador con Ciclón

- Velocidad de la corriente de aire: 30 m/s
- Diámetro de las partículas a separar: 10-200 μm
- Eficiencia: 50-99%
- Consumo de aire: Depende de la instalación

2.2.3.2 Recuperador con filtros

- Velocidad común de entrada del aire a los filtros: ≤ 1 m/s
- Caída de presión: Depende del modelo y la capacidad de retención.
- Micraje de los filtros: 1-500 μm

2.2.3.3 Recuperador con mangas

- Diámetro de las partículas a separar: 2-30 μm
- Temperatura de funcionamiento: 90°C
- Temperatura máxima de aplicación: 230-260 °C. (Telas sintéticas)
- Eficiencia: 99% (depende de condiciones del ambiente)

2.2.4 TIPOS DE FILTROS

Existen varios tipos de filtros para cabinas de pintura en el mercado mundial, entre los principales tenemos:

2.2.4.1 Filtros de difusión media



Figura 2.17 Filtros de difusión media

- Alcanzan hasta un 99% de eficiencia en partículas de 7-10 micrones.
- Filtros principales de las cabinas de pintura

2.2.4.2 Pre-filtros y fundas filtrantes de escape



Figura 2.18 Pre-filtros y fundas filtrantes de escape

- Fundas de poliéster de alta dureza
- Alta capacidad de captación

2.2.4.3 Paneles de entrada



Figura 2.19 Paneles de entrada

- Alcanzan hasta un 90% de eficiencia en partículas de hasta 10 micrones.
- Constan de 2 capas de 100 % poliéster.

2.2.4.4 Filtros de entrada húmeda



Figura 2.20 Filtros de entrada húmeda

- No son afectados por la humedad
- Filtro construido de 1/2" la primera capa seca y la segunda capa húmeda del mismo espesor.

2.2.4.5 Pre-filtro enlazante



Figura 2.21 Pre-filtro enlazante

- Alta capacidad de retención
- Fácil de manipular
- Diseñado para soportarse a sí mismo.

2.2.4.6 Rejillas captadoras de pintura



Figura 2.22 Rejillas captadoras de pintura

- Poseen sobre el 98% de eficiencia
- Reutilizables hasta 20 veces
- Prácticamente elimina el traslado de los desperdicios

2.2.4.7 Almohadillas y rollos de fibra de vidrio



Figura 2.23 Almohadillas y rollos de fibra de vidrio

- Atrapa una amplia gama de tipos de partículas de pintura de base seca (pintura en polvo)
- Filtros que combinan la eficacia con la duración

2.2.4.8 Captadores de pintura

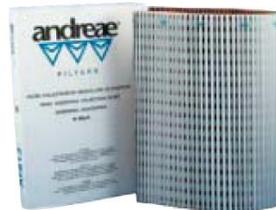


Figura 2.24 Captadores de pintura

- Ahorran espacio acorde al tipo de paquete
- Fácil de manipular
- Diseñado para soportarse a sí mismo.
- Utiliza un material ecológico

2.2.4.9 Bolsas de pintura



Figura 2.25 Bolsas de pintura

- Alta eficiencia con múltiples almohadillas de poliéster
- Alta capacidad de captación de partículas

2.2.4.10 Filtros cúbicos



Figura 2.26 Filtros cúbicos

- Poseen un 99% de eficiencia
- Alta capacidad de retención de pintura en polvo.

2.2.4.11 Rollos de fibra de vidrio y poliéster

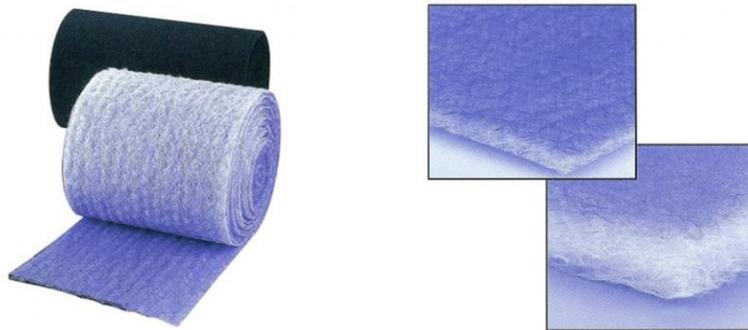


Figura 2.27 Rollos de fibra de vidrio y poliéster

- La media filtrante de Fibra de Vidrio en rollos y cuadros en medidas nominales de 1", 2" y 4" de espesor.
- La media filtrante de Poliéster en rollos y cuadros en medida nominal de 1", 2" y 4" de espesor.
- La media filtrante de Poliéster está hecha 100% de Poliéster no tejido y fibras sintéticas con combinaciones químicas con resina retardante de fuego.
- Las propiedades sintéticas del poliéster hacen que ésta media sea extremadamente resistente a la humedad.

2.3 VENTILADORES

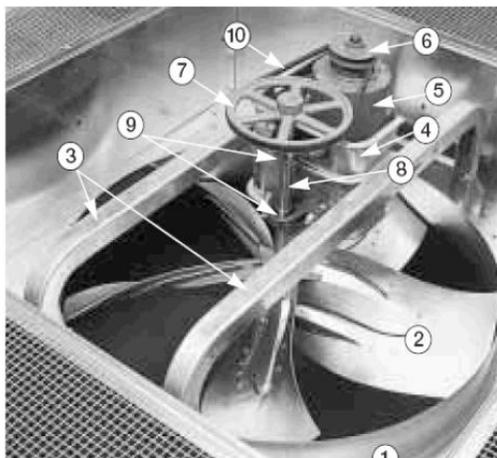
2.3.1 DESCRIPCIÓN

Los ventiladores son máquinas destinadas a producir un incremento o decremento de presión total ΔP_{total} pequeño.

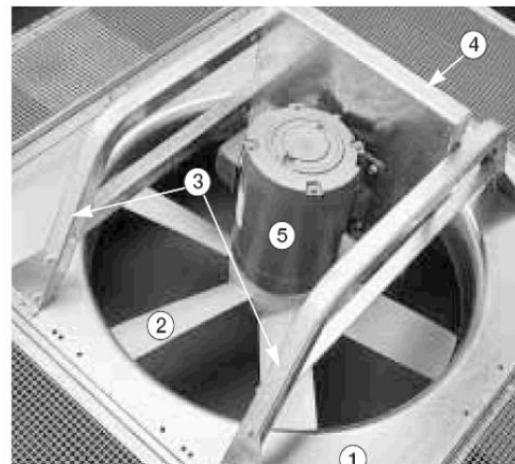
El ventilador se puede definir también como una máquina rotodinámica que sirve para transportar gases, absorbiendo energía mecánica en el eje y devolviéndola al gas proporcionándole movimiento.

2.3.1.1 Partes principales

Las partes de las cuales consta un ventilador varían dependiendo de su tipo, función, capacidad, entre otras, por lo que es muy variado su diseño y partes. A continuación se detallan partes generales de un ventilador axial (Fig. 2.26), el más común y conocido de los ventiladores.



1. Panel del Ventilador
2. Aspas o hélices
3. Marcos Retenedores del Motor (2)
4. Soporte para el Motor y los Rodamientos
5. Motor
6. Polea del Motor
7. Polea del Eje
8. Eje del Ventilador
9. Rodamientos (2)
10. Correa
11. Soporte de los Rodamientos



1. Panel del Ventilador
2. Aspas o hélices
3. Marcos Retenedores del Motor (2)
4. Soporte del Motor
5. Motor

Figura 2.28 Izquierda: ventilador de transmisión por correa. Derecha: ventilador de transmisión directa.

2.3.1.2 Leyes de ventiladores

Los principios de ventilador se aplican a cualquier serie similar de ventiladores, y las variables que se consideran son la capacidad o caudal Q , el tamaño de la hélice D , la densidad del gas δ , la presión p , la velocidad de rotación N , la potencia P , el nivel sonoro PWL y rendimiento η .

Subíndice **a** se refiere a la variable del ventilador bajo consideración, y Subíndice **b** se refiere a la variable del ventilador probado.

Para todos los principios el $(\text{rendimiento})_a = (\text{rendimiento})_b$, al igual que el $(\text{punto de tarado})_a = (\text{punto de tarado})_b$

Tabla 2.1 Leyes de los ventiladores⁸

Nº	Variables dependientes	Variables Independientes
1a	$Caudal_a = Caudal_b \times \left(\frac{Tamaño_a}{Tamaño_b}\right)^3 \times$	$\left(\frac{RPM_a}{RPM_b}\right)^1 \times (1)$
1b	$Caudal_a = Caudal_b \times \left(\frac{Tamaño_a}{Tamaño_b}\right)^2 \times$	$\left(\frac{RPM_a}{RPM_b}\right)^2 \times \left(\frac{\delta_a}{\delta_b}\right)$
1c	$HP_a = HP_b \times \left(\frac{Tamaño_a}{Tamaño_b}\right)^5 \times$	$\left(\frac{RPM_a}{RPM_b}\right)^3 \times \left(\frac{\delta_a}{\delta_b}\right)$
1d	$PWL_a = PWL_b + 70 \log \left(\frac{Tamaño_a}{Tamaño_b}\right) +$	$50 \log \times \left(\frac{RPM_a}{RPM_b}\right)^1 + 20 \log \left(\frac{\delta_a}{\delta_b}\right)$

⁷ Condiciones default de fábrica a las cuales fue diseñado el ventilador, parámetros de diseño y operación. Punto de referencia o ajuste del ventilador

⁸ Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm. Robert c. Rosaler. pág.34.23

2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO

2.3.2.1 Ventiladores centrífugos

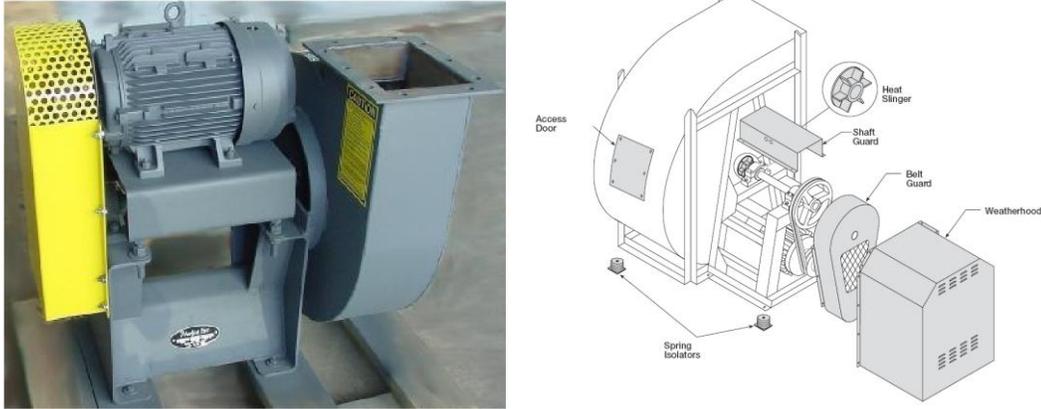


Figura 2.29 Ventilador centrífugo de transmisión por correa⁹

2.3.2.1.1 Descripción

Se forma de un rotor encerrado en una carcasa envolvente de forma espiral; el aire, que entra a través del centro del rotor paralelo al eje del ventilador, es succionado por el rotor y se descarga contra la envolvente por la salida en ángulo recto a la flecha; puede ser de entrada sencilla o de entrada doble.

En un ventilador de entrada doble, el aire entra por ambos lados de la envolvente succionado por un rotor doble o por dos rotores sencillos montados lado a lado. Los rotores se fabrican en una gran variedad de diseños y materiales, pudiéndose clasificar, en general, en aquellos cuyas aspas son radiales, o inclinadas hacia adelante, o inclinadas hacia atrás del sentido de la rotación.

⁹ Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento de ventiladores centrífugos e industriales Greenheck, página 12

2.3.2.1.2 Clasificación

Los ventiladores centrífugos se clasifican por la forma de los álabes o aspas de su impulsor, esto permite cumplir diversos propósitos estructurales, de fabricación, de capacidad, de función, etc. A continuación se muestran los tipos de álabes de forma general (Figura 2.30), así como la geometría y características principales de algunos diseños de álabes que se utilizan en los impulsores de los ventiladores centrífugos. (Figura 2.31).

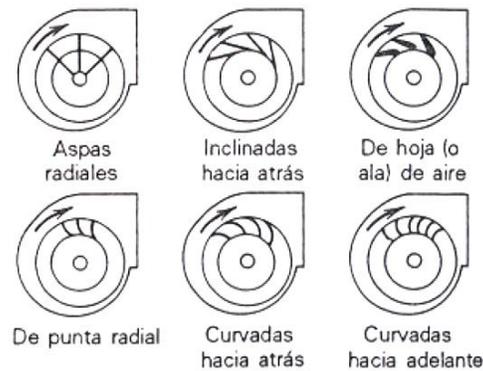


Figura 2.30 Clasificación del tipo de aspas del impulsor

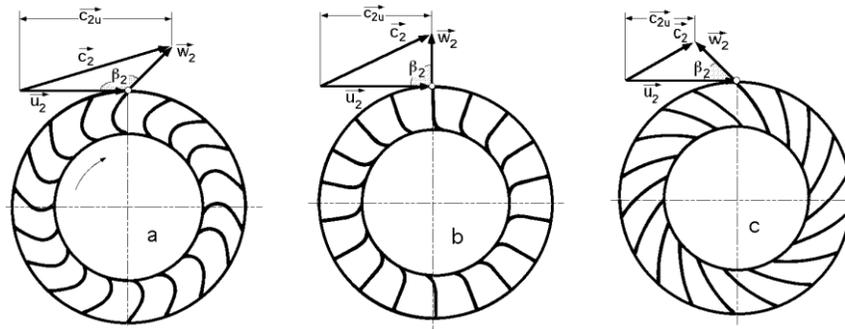


Fig. 2.31 Rodetes y triángulos de salida para Ventiladores centrífugos según la disposición de los álabes de su impulsor. a) Álabes curvados hacia adelante, b) Álabes de salida radial, c) Álabes curvados hacia atrás.¹⁰

¹⁰ Libros sobre Ingeniería Energética-Pedro Fernández Díez (<http://libros.redsauce.net/>)

- Álabes curvados hacia adelante, $\beta_2 > 90^\circ$.- En los ventiladores se utiliza por que generan un nivel bajo de ruido; además tienen otras características como:
 - Gran número de álabes de 48-60
 - Para una misma velocidad determinada manejan un mayor caudal y menores dimensiones que cualquier otro tipo de ventilador
 - Bajo rendimiento, entre 65-75% por lo que actualmente este tipo de ventilador centrífugo se lo tiende a reemplazar por los modernos ventiladores axiales.
- Álabes de salida radial, $\beta_2 = 90^\circ$.- Tienen menor número de álabes que los anteriores; se emplean para impulsar gases contaminados, particulados a elevada temperatura, gracias a la facilidad que presenta para eliminar los depósitos sólidos por la fuerza centrífuga.
- Álabes curvados hacia atrás, $\beta_2 < 90^\circ$.- Es el tipo normal de ángulo de salida en las bombas centrífugas.

Poseen un rendimiento más alto que los anteriores, al usar álabes de chapa de perfil aerodinámico, se llega a alcanzar un rendimiento medio del 90%.

Su presión y gasto másico son inferiores para una misma velocidad de rotación y número de álabes que en el primer tipo. El nivel de ruido es bajo.

A continuación se muestran curvas de rendimiento de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás (Figura 2.32) que como regla general son los más eficaces y estables.

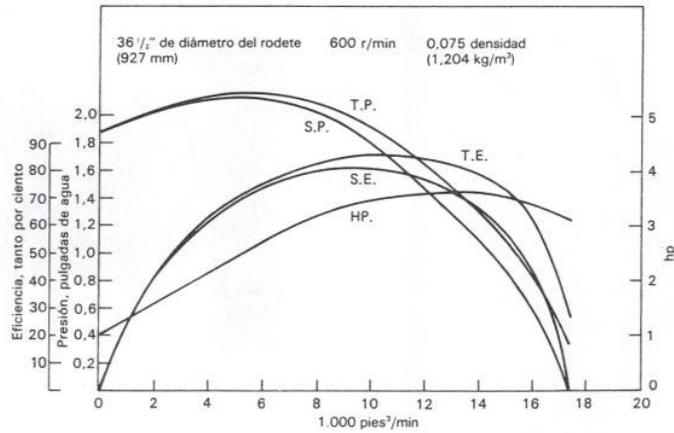


Figura 2.32 Curvas de rendimiento para un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH₂O; SP: presión estática en inH₂O¹¹

A continuación se muestran curvas de rendimiento de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante (Figura. 2.33).

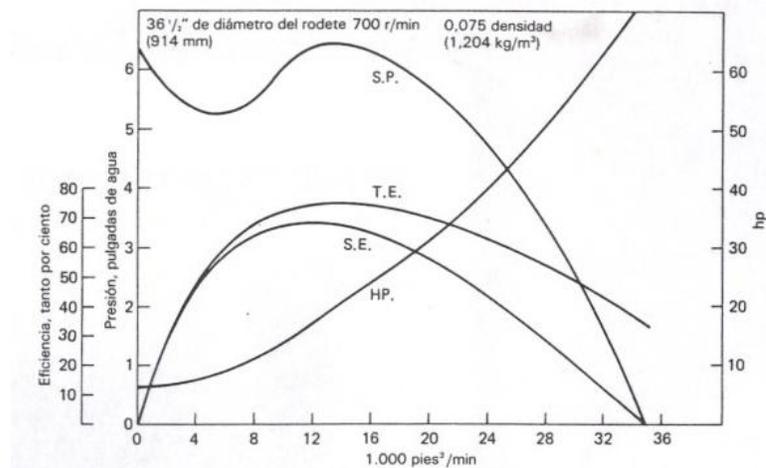


Figura 2.33 Curvas de rendimiento para un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia adelante. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH₂O; SP: presión estática en inH₂O¹³

¹¹ Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm. Robert c. Rosaler. pág.34.11 y 34.13

2.3.2.2 Ventiladores axiales



Figura 2.34 Ventilador axial de transmisión directa

2.3.2.2.1 Descripción

Son los más comunes y más conocidos entre los tipos de ventiladores. Una característica importante es su relación de cubo que es la relación entre el diámetro de la base del álabe o hélice y la punta del álabe, mientras mayor sea esta relación mayor presión dinámica puede generar el impulsor (también aumenta la complejidad de ciertas piezas del ventilador), pero como regla general tienen una relación de cubo de cero. El límite de presión total que puede alcanzar este tipo de ventiladores es de aproximadamente 2.49 KPa, ya que en realidad los ventiladores axiales se usan para presiones estáticas cercanas a cero.

El ventilador axial consiste básicamente en una hélice dentro de una envolvente cilíndrica de forma tubular y pueden ser de accionamiento directo (Figura 2.34) o de accionamiento por correa.

Cuando se añaden álabes-guía, después del rotor que contiene la hélice, el ventilador axial con estas aletas guía permite un mejor control del gas y se reducen o evitan flujos turbulentos. Los álabes-guía, en la succión o en la descarga, o en ambas partes, permiten enderezar el flujo del aire antes y/o después de la unidad de ventilación.

Este tipo de ventilador trabaja en un amplio intervalo de caudales, a presiones estáticas de bajas a medias. Como rasgo característico además la mayoría de ventiladores axiales necesitan una potencia superior con bajos caudales que con altos caudales a una misma velocidad de rotación.

La facilidad de montaje de los ventiladores axiales y el flujo del aire en línea recta los hace ideales para muchas aplicaciones; por encima de 75 a 100 milímetros de agua de presión estática, pero no son muy usados para servicios de ventilación. A continuación se muestra las curvas de rendimiento de un ventilador axial típico (Figura 2.35).

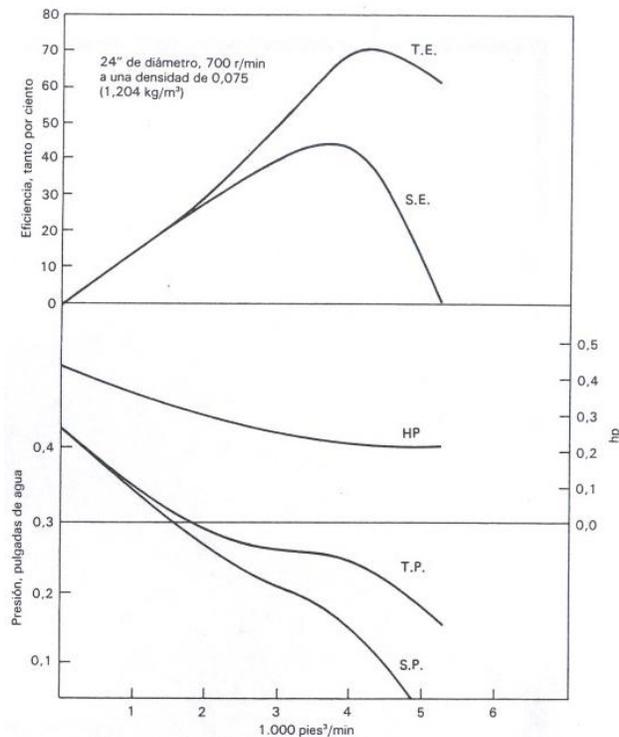


Figura 2.35 Curvas de rendimiento para un ventilador axial. TE: rendimiento global; SE: rendimiento estático; HP: potencia en CV; TP: presión total en inH₂O; SP: presión estática en inH₂O.¹²

¹² Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm. Robert c. Rosaler. pág.34.7

2.3.2.3 Ventiladores mixtos

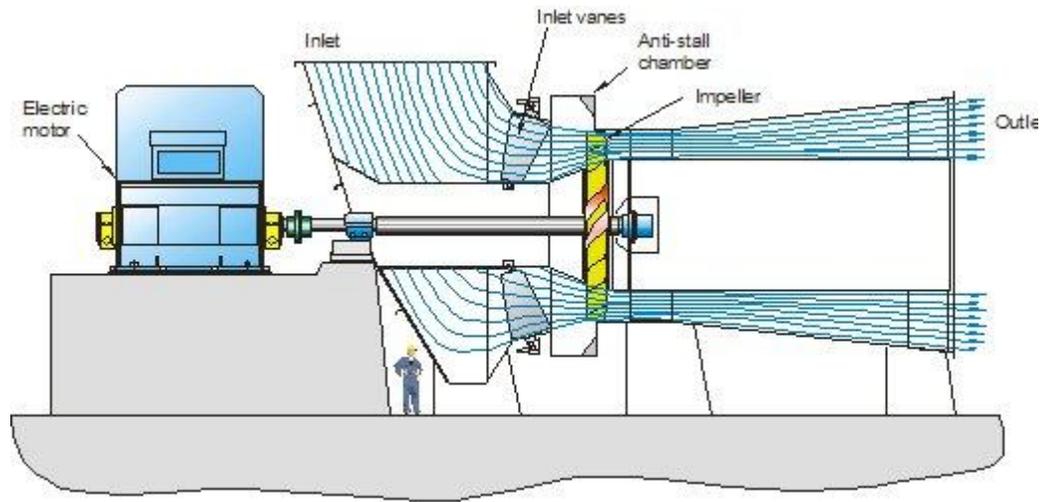


Figura 2.36 Partes de un Ventilador de flujo mixto

2.3.2.3.1 Descripción

Un ventilador de flujo mixto o de impulso axial (Figura 2.36), combina las características de un ventilador axial y un ventilador centrífugo, a pesar de que su diseño se asemeja mayormente a los ventiladores axiales convencionales.

Sus palas o álabes curvados se sueldan a un buje cónico de acero. El flujo del fluido se modifica al cambiar el ángulo de los registros en la zona de admisión de la carcasa, inmediatamente después del impulsor. (Figura 2.37)

La carcasa puede poseer una admisión libre, pero comúnmente se trata de que esté instalado con un codo que permita colocar el motor separado de los conductos (Figura 2.36). La zona de descarga de la carcasa aumenta su sección gradualmente para disminuir la velocidad del flujo del fluido y convertir la energía cinética en presión estática útil.



Figura 2.37 Impulsor en un ventilador de flujo mixto

2.3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA PRESIÓN DESARROLLADA

2.3.3.1 Baja presión

La presión total desarrollada es inferior a 100 mm H₂O. (Ventiladores comunes).



Figura 2.38 Ventilador de baja presión

2.3.3.2 Media presión

La presión total desarrollada es superior a 100 mm H₂O e inferior a 300 mm H₂O (Soplantes).



Figura 2.39 Ventilador de media presión

2.3.3.3 Alta presión

La presión total desarrollada es superior a 300 mm H₂O e inferior a 1000 mm H₂O (turbo axiales).



Figura 2.40 Ventilador de alta presión

2.3.3.4 Muy alta presión

Mayor a 2500 mm H₂O (Turbocompresores).



Figura 2.41 Ventilador de muy alta presión (turbocompresor)

2.3.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FUNCIÓN

2.3.4.1 Ventiladores con envolvente

Comúnmente son de sección tubular, y tienen por objeto desplazar aire dentro de un conducto.

2.3.4.1.1 Impulsores

Este tipo de ventiladores tienen una aspiración directa a un espacio libre, y su boca de descarga conectada a un conducto.

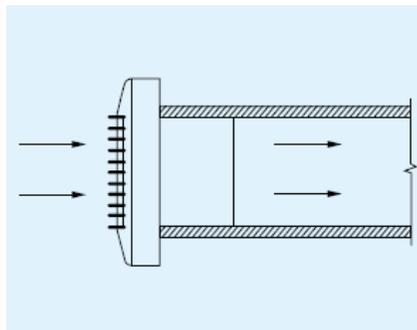


Figura 2.42 Impulsor¹³

¹³ Manual de ventilación total de S&P

2.3.4.1.2 Extractores

Este tipo de ventiladores tienen su boca de aspiración conectada a un conducto y la descarga está hacia un espacio libre.

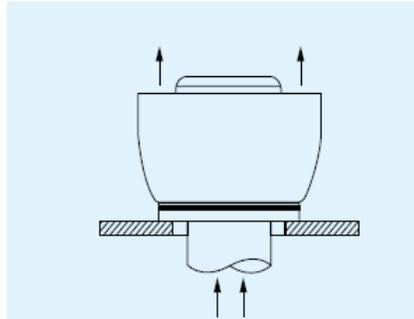


Figura 2.43 Extractor¹²

2.3.4.1.3 Impulsores-extractores

Este tipo de ventiladores tiene su boca de aspiración y de descarga están acopladas a un conducto.

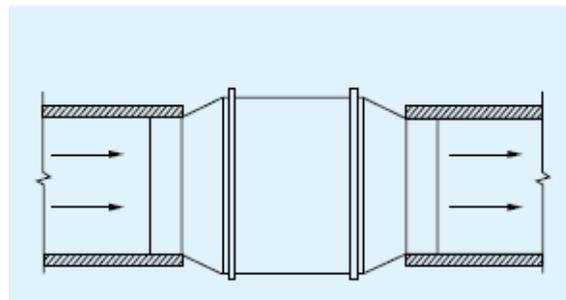


Figura 2.44 Impulsor-Extractor¹²

2.3.4.2 Ventiladores murales

Este tipo de ventiladores se conocen también como Extractores y permiten trasladar el aire entre dos espacios distintos, de un lado de una pared al otro.

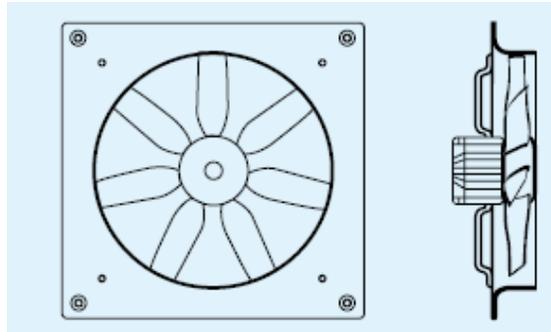


Figura 2.45 Axial Mural¹²

2.3.4.3 Ventiladores de chorro

Este tipo de ventiladores se utilizan cuando se necesita generar aire con velocidad variada sobre una persona o cosa.

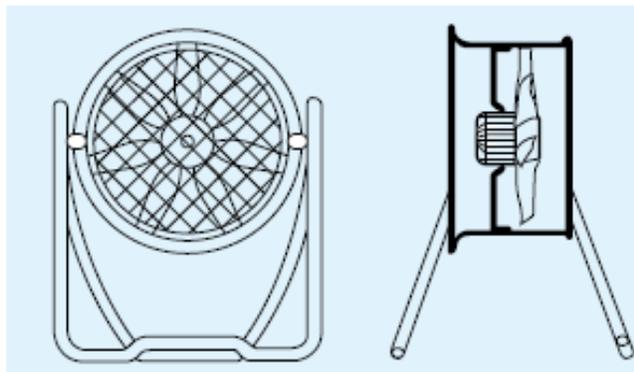


Figura 2.46 De chorro¹²

2.3.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

2.3.5.1 Presión

La energía que transmite un ventilador al aire u otro gas debe ser exactamente igual a la pérdida de energía por el gas al circular por el sistema. Los requerimientos de ventilación y las pérdidas en el sistema se expresan usualmente

en unidades de energía por unidad de volumen de gases circulantes, lo que viene a ser la presión.

En la ingeniería ventilotécnica se distinguen varios tipos de presiones según cómo se puedan medir las mismas o por el tipo de energía con que se puedan asemejar, las presiones que se identifican en los sistemas de ventilación son:

2.3.5.1.1 La presión total p_t

La presión total es equivalente a la suma de la presión estática y presión dinámica de una unidad de volumen de gas, y existe debido a que depende de la densidad, velocidad y grado de compresión del gas.¹⁴ Se la denomina también presión de estancamiento.

2.3.5.1.2 La presión estática p_s

La presión estática es la que se ejerce en todas las direcciones donde se encuentra el fluido, o en la misma dirección del aire, en dirección contraria y en dirección perpendicular sobre las paredes del mismo. Si el aire estuviera en reposo, encerrado en un recipiente, entonces la presión estática sería igual a la presión total. La presión Estática puede ser positiva, si es superior a la atmosférica o bien negativa.¹⁴

2.3.5.1.3 La presión dinámica p_v

Es la presión que acelera el aire desde cero a la velocidad de régimen. Se manifiesta solo en la dirección del aire y es directamente proporcional al cuadrado de su velocidad, por lo que la Presión Dinámica es siempre positiva.¹⁴

¹⁴ Manual práctico de ventilación Soler & Palau - pág.6.

2.3.4.2 Caudal

La capacidad de un ventilador se define como el caudal volumétrico medio en las condiciones de admisión del ventilador. La capacidad de un sistema de ventilación se determina por la presión medida, la cual puede ser la presión dinámica en el conducto, la presión total o la presión estática, asociadas con un orificio o boquilla. Dichas presiones medidas se pueden convertir en un caudal volumétrico considerando la geometría del medio de circulación y la densidad del gas. Las unidades de medida para el caudal volumétrico en la mayoría de los casos es metros cúbicos por segundo (m^3/s) o pies cúbicos por minuto (CFM).

2.3.4.3 Potencia

Representa el valor de alimentación de potencia al freno que requiere el ventilador para poder manejar cierto caudal, así mismo poder generar una variación de presión positiva o negativa y a una velocidad de giro determinada. Las medidas de potencia usadas son los caballos de fuerza (HP) y los kilovatios (Kw).

El motor eléctrico es el dispositivo que se usa acoplado a los diversos tipos de ventiladores para manejo de flujos de gases, ya que es regular en su velocidad y potencia entregada.

2.3.4.4 Velocidad de giro

Se mide en revoluciones por minuto (RPM) y esta depende de la velocidad de diseño del motor eléctrico acoplado cuando es un ventilador de transmisión directa o de la relación de transmisión del diámetro de las poleas cuando es de transmisión por banda o correa.

Esta variable influye directamente en el caudal que se puede manejar, en la presión estática y el nivel de ruido.

2.3.4.5 Nivel sonoro

La magnitud del sonido se mide en decibeles (dB). La potencia del ruido es el nivel generado por el sistema de ventilación, pero lo que nos interesa mayormente es analizar la presión de ruido o de sonido para ver la influencia en el ser humano.

Los ruidos de un ventilador consisten en una serie de tonos discretos superpuestos sobre un componente de banda ancha. La primera, que se podría denominar componente rotacional, puede tener su origen en el proceso de transmisión de energía que también puede conducir al desarrollo de carga (altura). El segundo, que se podría denominar componente vorticial, puede atribuirse a la formación de remolinos turbulentos de una clase u otra que normalmente conducen a pérdidas de carga.

Los datos de prueba sobre el nivel acústico suelen estar basados en mediciones del ruido total emitido de la admisión, descarga y de la caja. El nivel de ruido aumenta drásticamente cuando no existen los cojinetes apropiados o se encuentra en mal estado, otro factor importante es cuando no tiene un balanceo adecuado que se suele hacer electrónicamente en algunas marcas y modelos. Como último factor, no deben existir juegos u holguras para evitar las vibraciones, desgaste no natural y por ende un ruido excesivo.

2.3.5 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

2.3.5.1 Dispositivos de seguridad

Como norma de seguridad muy importante un ventilador nunca puede funcionar a una velocidad mayor a aquella para la cual fue diseñado. El impulsor al operar a su máxima velocidad de seguridad puede fallar por los altos esfuerzos que se producen por una velocidad alta que incluso puede estar cercana a la velocidad crítica del eje y causar un mal funcionamiento por vibración excesiva; la potencia indicada para alimentar el ventilador puede crecer lo suficiente como para sobrecargar y quemar el sistema motriz. Los ventiladores siguen leyes en las

cuales el volumen de fluido movido es directamente proporcional a la velocidad de rotación (N), la presión desarrollada en cambio lo es al cuadrado de N y la potencia requerida al cubo de N .

Los dispositivos de seguridad deben resguardar a los operarios de los elementos rotatorios pero sin interferir en el funcionamiento normal del equipo; también es importante proteger el equipo contra daños accidentales.

2.3.5.1.1 Protecciones metálicas

Estas cubren la admisión o descarga del ventilador, o también se puede rodear completamente al ventilador, al motor y a la transmisión. Aunque estas protecciones metálicas (rejillas tipo malla) dan seguridad de operación, obstruyen el flujo de aire y reducen considerablemente la capacidad del ventilador por eso las perforaciones de la protección metálica debe ser lo suficientemente grande (mayor a 25 mm^2).

2.3.5.1.2 Guardabanda

La transmisión por bandas en V al funcionar genera calor por lo cual el área de la transmisión debe tener adecuada ventilación, permitiendo así la disipación de este calor, no se debe por esto rodear completamente las transmisiones de bandas en V o como alternativa se utiliza guardabandas de malla abierta.

2.3.5.2 Problemas comunes de los ventiladores y sus posibles causas

2.3.5.2.1 Capacidades y presión abajo de las nominales

- Condiciones insuficientes de admisión y/o descarga.
- Filtraciones de aire en el sistema (sin hermeticidad adecuada).
- Rotor defectuoso.

- Sentido incorrecto de rotación.
- Rotor montado al revés en el eje.
- La resistencia total del sistema es más alta que la calculada.
- La velocidad es demasiado baja.
- Las compuertas y aspas radiales de entrada no ajustan adecuadamente.

2.3.5.2.2 Vibraciones y ruido

- Rotor o motor con problemas.
- Pernos o tornillos fijos, rotos o sueltos.
- Flecha deformada plásticamente o desalineada.
- Rotor o motor desequilibrados.
- Zumbido magnético de 120 ciclos debido a la entrada de energía eléctrica.
- El ventilador entrega más de la capacidad nominal.
- Mal alineamiento del rotor o transmisión por bandas en V.
- Base de cimentación inestable.
- Materiales extraños sobre el rotor que causan desequilibrio.
- Compuertas o aletas radiales de entrada flojas.
- Velocidad demasiado alta o el ventilador gira en dirección errónea.
- Vibración transmitida al ventilador desde otro punto o fuente.

2.3.5.2.3 Sobrecarga de la fuente motriz

- Descarga que sobrepasa la capacidad, porque la resistencia existente del sistema es menor a la original nominal.
- Densidad del gas por encima del valor de diseño.
- Empaque demasiado apretado o defectuoso.
- Incorrecto sentido de rotación.
- Velocidad muy alta.
- Flecha deformada.
- Mal alineamiento.

- El rotor pega o roza contra la envolvente.
- Bobinado del motor defectuoso.

2.3.5.3 Requisitos para la extracción de aire

Para toda instalación de ventilación se puede utilizar normas generales, como:

- En lo posible, los ventiladores deben colocarse de tal forma que la descarga esté en la dirección del viento que prevalezca; además la admisión de aire debe colocarse de forma que se aproveche las presiones positivas creadas por los vientos prevalecientes; en dicha situación los ventiladores extractores se deben colocar sin que haya interferencias de aberturas que den directamente al ventilador.
- El *área de succión o admisión*, debe ser mínimo un 50% mayor que el área de descarga del impulsor del ventilador; y la descarga debe colocarse de forma que no sea molesta para los trabajadores que se encuentren cerca. Si en la succión se utilizan filtros, éstos deben instalarse adecuadamente y recibir adecuado mantenimiento para mantener al mínimo la caída de presión por la resistencia que éstos presentan. *La resistencia estática normalmente va de 50 mm H₂O en filtros limpios hasta 100 mm H₂O en filtros sucios*
- Frecuentemente se necesita instalar en los ventiladores tubos externos de refrigeración sobre los motores, cuando hay altas temperaturas ambientales, o usar motores con aislamientos que permitan resistir las condiciones de temperatura donde vaya ubicado el ventilador.
- Cuando el aire es peligroso, por vapores inflamables o por concentración de polvos, la construcción del rotor del ventilador debe ser a prueba de chispas.
- En atmósferas corrosivas, los vapores se recogen por *ventilación específica* y se utilizan motores resistentes a los ácidos, así como revestimientos y materiales especiales que deben emplearse en los sistemas de ventilación.

2.3.5.4 Limpieza de los ventiladores

Para un buen funcionamiento se necesita limpiar cada cierto tiempo las aspas y las envolturas de los ventiladores; la acumulación de elementos en las aspas de una hélice reduce la eficiencia de la unidad y puede llegar a desequilibrar el impulsor. Para proteger los ventiladores y poderlos limpiar fácilmente, existen revestimientos que se aplican a los ventiladores limpios y luego, cuando haya una acumulación considerable, se lavan con agua o algún producto, según el caso. El ventilador centrífugo de aspas curvas hacia adelante en especial acumula pelusas y polvos, y a menos que se las quite, pronto desequilibran las aspas. Mientras se limpia hay que comprobar que las aspas no estén dañadas, y no utilizar herramientas que puedan dañarlas porque son susceptibles a generarse grietas, doblarse o desequilibrarse.

Si se usan rejillas en la succión y en la descarga de un ventilador, no deben estar tapadas o sucias porque la acumulación afectará considerablemente al funcionamiento del ventilador.

Donde exista alta humedad, ácidos o abrasivos, y se note que la envoltura del ventilador y del rotor se han corroído, la unidad se debe limpiar con cepillo de alambre, líquidos desoxidantes o cualquier método para remover el óxido, siempre y cuando no esté muy degradado (sino reemplazar las piezas obligatoriamente), después pintar de tal manera que pueda soportar las condiciones de trabajo. La pintura se debe aplicar con cuidado en las aspas o rotores para asegurar que no afecte el balanceo.

2.3.5.5 Mantenimiento de los motores eléctricos

Los motores eléctricos totalmente cerrados se deben mantener limpios, sin acumulaciones de pinturas, pelusas y suciedades. Además no rociar sobre él materiales en exceso que reducen la transferencia del calor de la carcasa del motor. En los motores eléctricos refrigerados por aire, se deben mantener limpios los ventiladores y los conductos por los cuales pasa el aire.

En motores con un extremo abierto, se debe ver que las entradas o las salidas del aire no estén tapadas en ningún momento.

Los motores en ambientes con vapor o en atmósferas donde se registran fluctuaciones severas de temperatura, deben estar provistos de agujeros o de tubos de drenaje para eliminar los condensados.

Los ventiladores de materiales galvanizados se deben dejar a la acción de las condiciones ambientales durante varias semanas, antes de ser pintados. Los ventiladores de hierro negro o de otros materiales se deben arreglar después de su instalación, si es que se notan puntos despintados o rasguños de pintura. Los ventiladores se deben revisar periódicamente para comprobar que las rejillas estén libres de basuras.

2.4 DESIGNACIONES Y CONFIGURACIONES ESTÁNDAR

2.4.1 ROTACIÓN Y DESCARGA

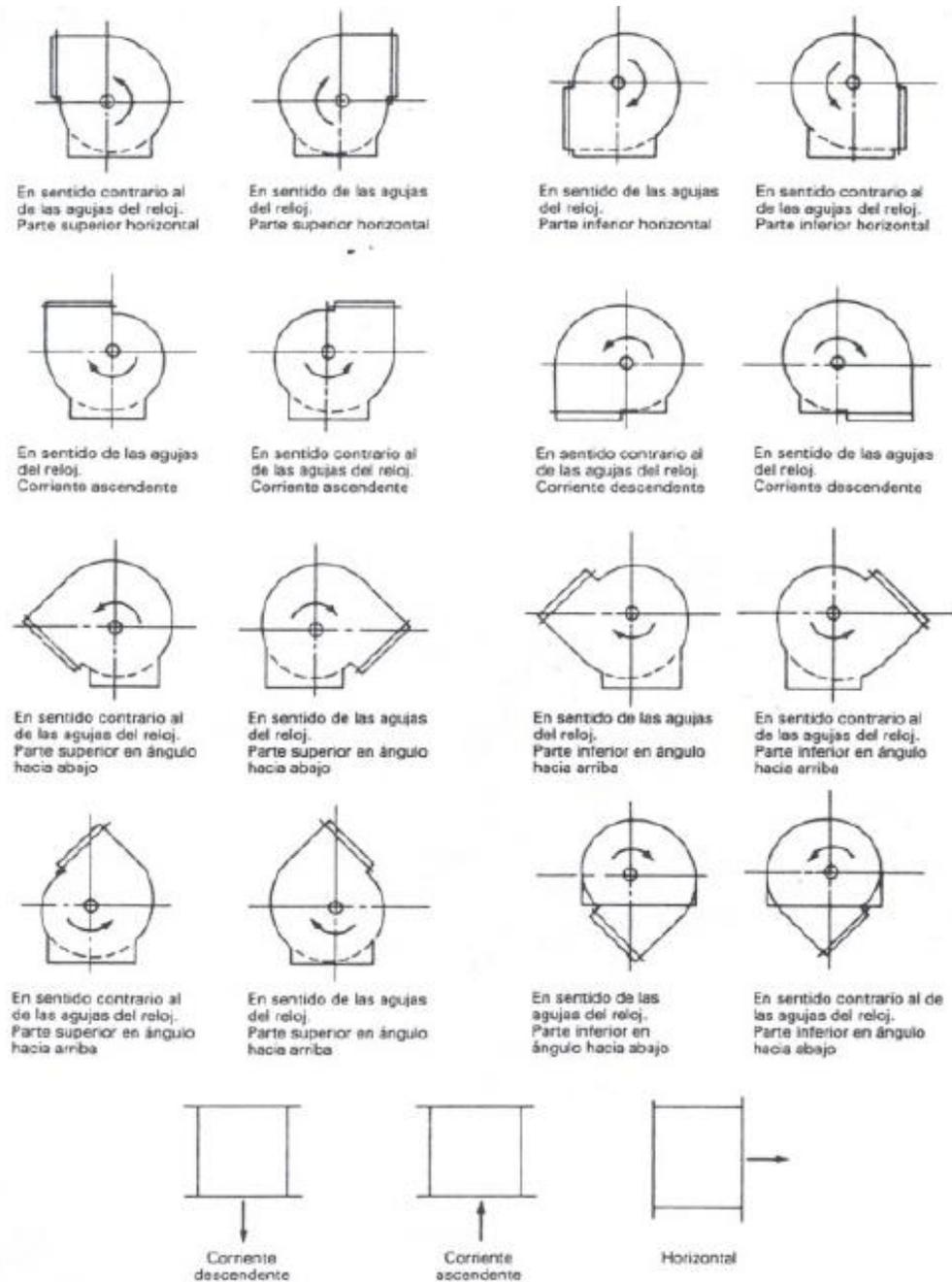


Figura 2.47 Designaciones estándar para rotación y descarga (AMCA)¹⁵

¹⁵ Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm, Robert C. Rosaler. pág.34.28

2.4.2 DISEÑO ESTÁNDAR DE ACCIONAMIENTO

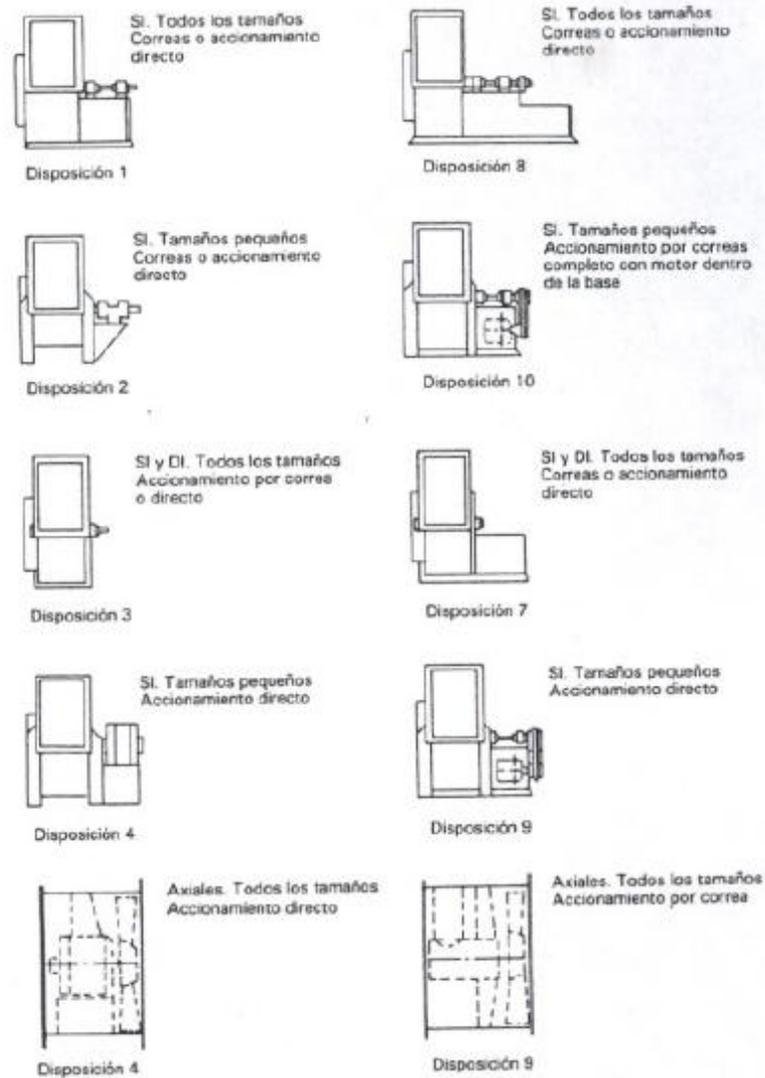


Figura 2.48 Diseños estándar de accionamientos (AMCA)¹⁶

2.4.3 POSICIÓN DE CAJA DE ADMISIÓN

Para especificar la posición de la caja de admisión se utiliza la vista desde el lado motriz para indicar la posición de la abertura de admisión como se muestra en la Figura 2.49.

¹⁶ Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm, Robert C. Rosaler. pág.34.29

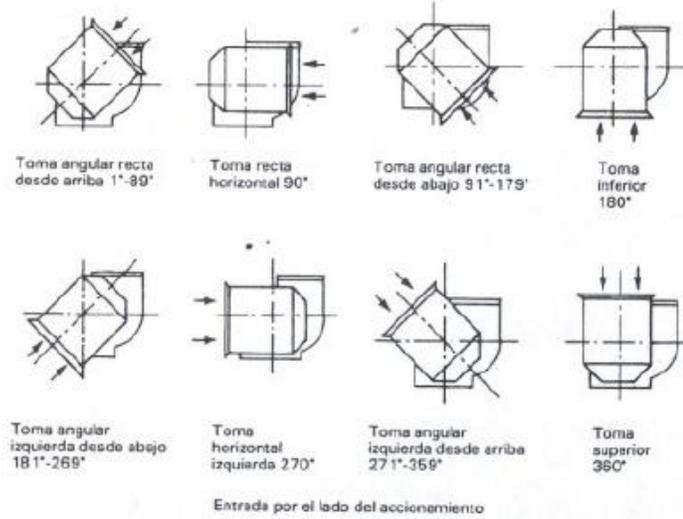


Figura 2.49 Posiciones estándar de la caja de admisión (AMCA)¹⁷

2.4.4 POSICIÓN DEL MOTOR

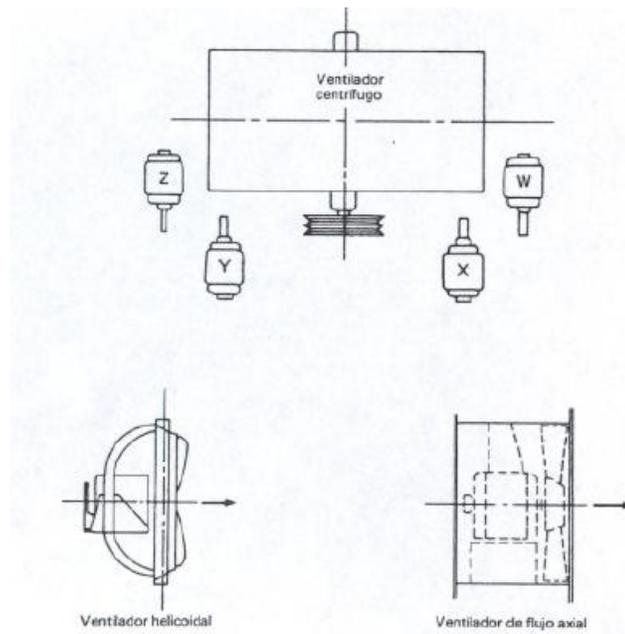


Figura 2.50 Posiciones estándar del motor (AMCA)¹⁶

¹⁷ Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm, Robert C. Rosaler. pág.34.30

2.4.5 INSTALACIÓN

En el método de prueba de la AMCA se prueba con una entrada libre y un ducto recto en la descarga para minimizar las pérdidas y asegurar un recobro estático máximo.

Cualquier otra configuración que se desvíe de este estándar, reduce el funcionamiento del ventilador. La restricción o inestabilidad del flujo que entra puede causar la pre-rotación del aire o carga desigual de la rueda del ventilador, dejando grandes pérdidas en el sistema y aumentando el nivel de sonido. La descarga libre o flujo turbulento en el canal de salida podría dar lugar a pérdidas en la efectividad del sistema. Los ejemplos abajo muestran el método del sistema y las entradas y salidas de las configuraciones diferentes que pueden afectar el funcionamiento del ventilador.⁵

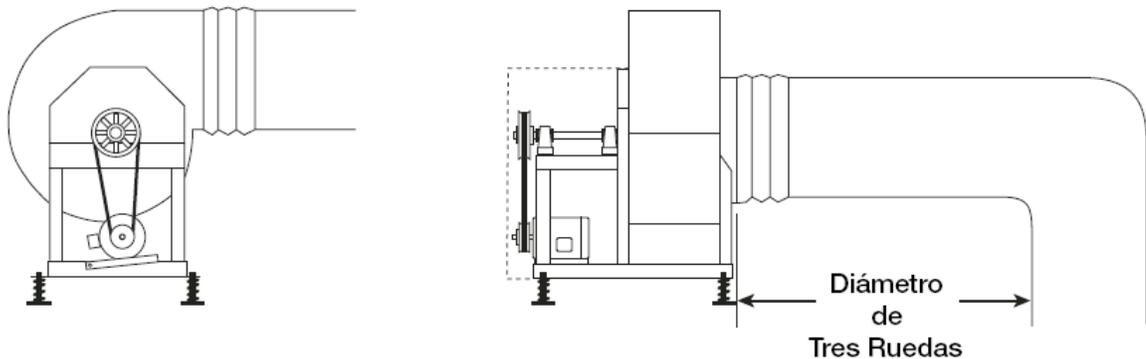


Figura 2.51 Instalaciones comunes

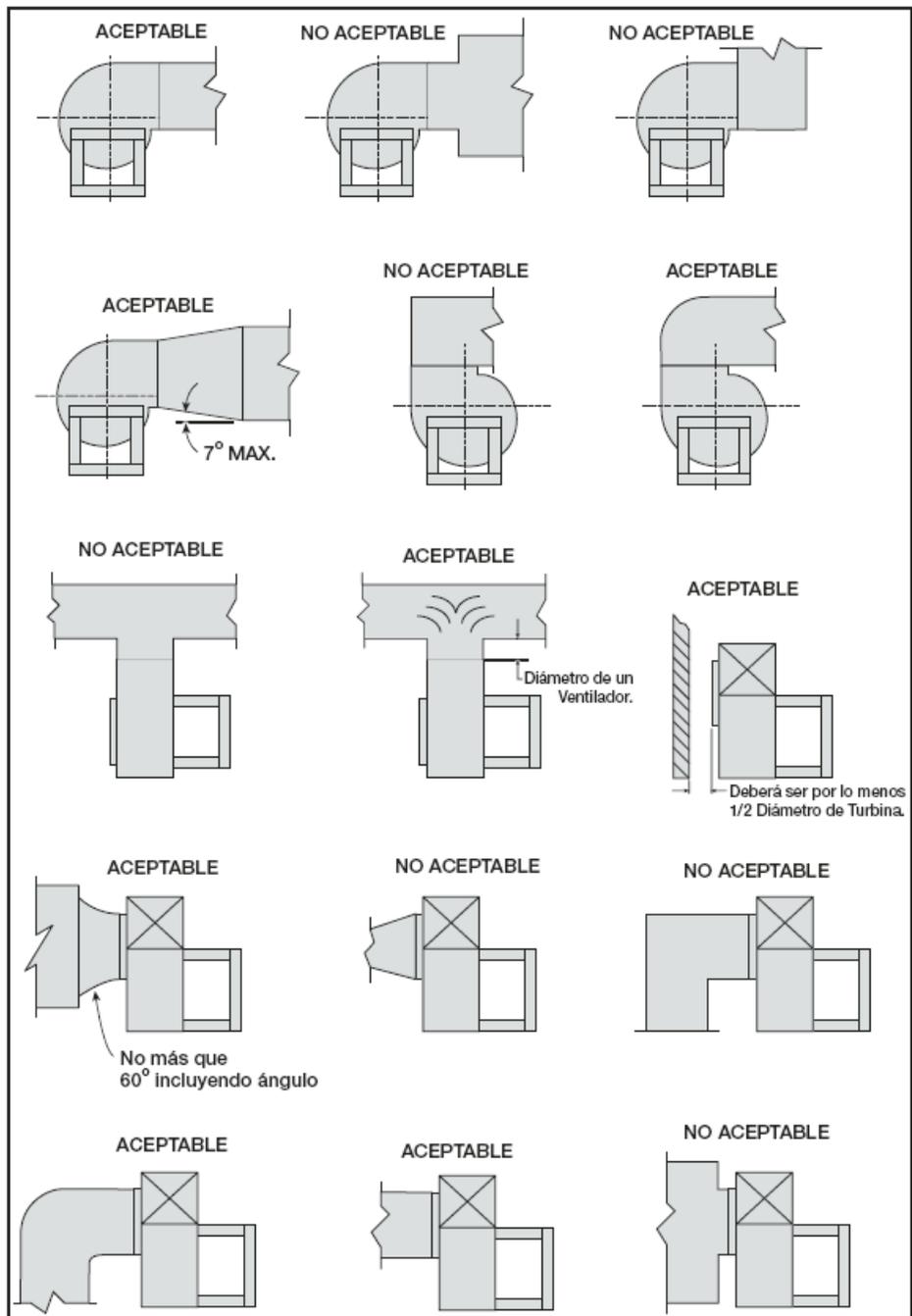


Figura 2.52 Formas de conexiones correctas e incorrectas¹⁸

¹⁸ Catálogo de Greenheck, Ventiladores centrífugos de uso comercial, Julio de 2005 pág. 6,7.

2.5 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2.5.1 CLASIFICACIÓN

Según la función y los parámetros de operación que requiere un ventilador se presentan los siguientes tipos de materiales de construcción:

2.5.1.1 Materiales termoresistentes

La protección de los ventiladores contra las corrientes de gas caliente incluye consideraciones tanto estructurales como de corrosión. Las resistencias a la rotura de los aceros pueden mejorarse algo a temperaturas moderadas pero acaban empeorándose rápidamente. El límite elástico disminuye con la temperatura incluso cuando la resistencia a la rotura parezca inalterada. Los criterios de diseño deben ser la resistencia a la rotura, resistencia elástica, resistencia a la fluencia o a la rotura, dependiendo de la temperatura, naturaleza de la pieza tensionada, así como los requisitos de servicio. El acero bajo en carbono acumula incrustaciones rápidamente a temperaturas superiores a 470°C en condiciones normales. Este rango de operación podría ampliarse mediante un proceso que incluye una metalización con pistola y tratamiento térmico para formar una aleación de acero y aluminio en la superficie. Las pinturas termo-resistentes pueden ofrecer un cierto grado de protección, pero las temperaturas se verán limitadas por el aglutinante utilizado. Varios aceros de baja aleación, aceros inoxidable y aleaciones ricas en níquel ofrecen fuerza y resistencia a la corrosión apropiadas para el aire.

El diseño de ventiladores de alta temperatura debe tener en cuenta asimismo los problemas debidos a la expansión y problemas de cojinetes que se enfrían. En general, los cojinetes deben mantenerse fuera de la corriente de aire en todas las aplicaciones salvo en aquellas que son a la temperatura ambiente. La lubricación con grasa es satisfactoria hasta 93°C en muchos tipos de cojinetes de metal antifricción. Para temperaturas superiores se requiere lubricación con aceite. A más de 175°C, algún tipo de anillo recoge-lubricante o disco refrigerador suele ser

necesario en el eje entre el ventilador y el cojinete. A temperaturas superiores a 425°C, la sub-base del cojinete debe estar físicamente separada de la caja de ventilador para evitar la conducción directa de calor. Los ventiladores y conductos necesitan aislamiento.

2.5.1.2 Materiales resistentes a la corrosión

La selección de un material o revestimiento en particular para proteger al ventilador contra ataques de un gas corrosivo se basa en criterios económicos. Normalmente el ventilador se construye en el material que proporcione la resistencia y formas necesarias del modo más económico. Si la vida de un ventilador está limitada por manejar gases corrosivos, el sobrecoste inicial de un material o revestimiento especial puede estar justificado por la prolongación de la vida. Esta evaluación es fácil de realizar para cualquier combinación de dos materiales si existe una experiencia real de operación o datos de prueba. Uhlig¹⁹ (Tabla 2.2) ha elaborado una lista de agentes corrosivos y materiales con diferentes grados de resistencia. La precisión de cualquier predicción por esta vía es limitada. Es necesario tener en cuenta los efectos de temperatura, concentración localizada, velocidad, impurezas y fabricación, cuando se traducen los resultados de pruebas a los términos de rendimiento real.

Cuando ocurre una corrosión, puede que estén implicados dos tipos de ataques. El ataque directo químico se limita generalmente a temperaturas elevadas o entorno extremadamente corrosivo, o a ambos factores. La rápida incrustación del acero a temperaturas superiores a 525°C y el efecto de ácidos o álcalis²⁰ concentrados son los ejemplos. Estas reacciones se pueden evitar mediante el control de temperatura o concentración de la sustancia corrosiva o mediante la aplicación de revestimientos protectores inertes.

¹⁹ H.H. Uhlig and R.W. Revie, Corrosión y Control de Corrosión, J.W. & Sons, Editors. New York, (1985).

²⁰ Óxidos, hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles.

El ataque electroquímico es mucho más habitual. Los requisitos para una reacción de este tipo es que existan zonas anódica y catódica discretas conectadas mediante un material sólido sumergido en un electrólito. Tales células se producen no sólo por la conexión de dos materiales, sino también por pequeñas variaciones en tensiones, composición superficial, depósitos de metales disimilares y condensación de un electrólito.

Una limpieza frecuente eliminará los depósitos y así mejorará la duración de cualquier material. Se deberá evaluar el efecto sobre la resistencia a la corrosión de la composición de los depósitos de soldadura y las zonas afectadas por calor en la soldadura, así como del alivio de esfuerzos y temperatura superficial.

La formación de productos de corrosión puede servir para retardar o acelerar la reacción. El óxido en el acero suave tiende a acelerar la corrosión, mientras el óxido que se forma en aceros de baja aleación puede proteger al metal contra la corrosión posterior. La película que se forma en la superficie de acero inoxidable, así como la que se forma en el aluminio, tiene un efecto protector en muchos entornos corrosivos.

La protección que ofrecen muchos de los revestimientos metálicos se debe a su acción sacrificial. El zinc sobre productos galvanizados y el recubrimiento anódico sobre materiales de chapa de aluminio o cadmio, protegen contra rayados e incluso contra bordes cortantes. Sin embargo, para evitar acciones sacrificiales innecesarias, se debe evitar la formación de pares galvánicos por unión de metales disimilares.

La protección que ofrecen otros tipos de revestimiento, como plomo, caucho o plásticos, se debe principalmente a su inatacabilidad por agentes corrosivos. Aunque el espesor óptimo varía según el medio corrosivo, los valores indicados en la Tabla 2.2 son adecuados en la mayoría de los casos. La tabla indica asimismo los límites de temperatura y velocidad máxima o de punta.

Los revestimientos de plomo pueden fundirse o fijarse mecánicamente a las superficies de los rotores o cajas de ventilador fabricadas en acero. Su coste limita el uso a las aplicaciones en que no existan otros medios de protección adecuados.

Los recubrimientos con caucho, en los espesores indicados en la Tabla 2.2, son láminas adheridas a las superficies expuestas de acero y vulcanizadas en el sitio. También es posible cubrir piezas de caucho mediante aspersion o inmersión. Varios elastómeros naturales y sintéticos, como neopreno, Saran²¹ y caucho de silicona, pueden ser empleados para temperaturas altas.

Tabla 2.2 Recubrimientos de protección²²

	Espesor	Limitaciones
Refuerzos de plomo	$1/8$ - $1/4$ ''	60 m/s a 94 °C 45 m/s a 204 °C
Recubrimientos de caucho duro	$1/8$ - $3/16$ ''	$1,829 \times 10^6 RN^2$ *, 66 °C máx.
Recubrimientos de caucho blando	$1/8$ - $3/16$ ''	$0,915 \times 10^6 RN^2$ *, 66 °C máx.
Revestimiento de epoxy	5-10 mil	94 °C máx.
Revestimiento de fenólico	5-10 mil	177 °C máx.
Lacas de PVC	5-10 mil	82 °C máx.
Plásticos de PVC	30-100 mil	71 °C máx.

* $RN^2 = \text{radio en pies (m)} \times (\text{r/min})^2$.

Nota: Factores de conversión al sistema métrico: pulgada $\times 2,54 \times 10^{-5} = \text{mm}$; mil $\times 2,54 \times 10^{-7} = \text{mm}$; pies/min $\times 5,08 \times 10^{-3} = \text{m/s}$; $6 \times 10^6 RN^2 [\text{pies} \cdot (\text{r/min})^2] = 1,829 \times 10^6 RN^2 [\text{m} \cdot (\text{r/min})^2]$ $3 \times 10^6 RN^2 [\text{pies} \cdot (\text{r/min})^2] = 0,915 \times 10^6 RN^2 [\text{m} \cdot (\text{r/min})^2]$.

En general, los revestimientos de plásticos se aplican por rociado. Para obtener el espesor óptimo se necesitan varias capas. Fenólicos y plastisoles²³ requieren un secado a temperaturas moderadas (191 a 232°C), pero lacas vinílicas y epóxicas pueden secarse al aire. Para los rodetes de ventilador, sólo se utilizarán tipos de plástico más flexibles. Aun así, en muchos casos es necesario modificar la construcción estándar para eliminar todo espacio y huecos, requiriéndose

²¹ Serie de polímeros a partir de cloruro de vinilideno (especialmente cloruro de polivinilo o PVDC), junto con otros monómeros, con muy baja permeabilidad al vapor de agua y el oxígeno en comparación con otros plásticos.

²² Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado - Nils R. Grimm, Robert C. Rosaler. Pág. 34.32

²³ Es la mezcla de una resina (PVC), de un plastificante y otros aditivos. Es resistente a la abrasión, la corrosión y la electricidad

soldaduras continuas y bordes redondeados así como superficies limpias. Se tomarán medidas similares para los rociados cerámicos y metálicos.

Los plásticos reforzados de fibra de vidrio (FRP), tanto poliéster como epoxi, se utilizan para cajas e impulsores. La porción del eje que se expone al gas se encapsula. Se emplean técnicas tanto de unión manual como moldeado a presión. La fibra de vidrio debe recubrirse de una resina resistente a los productos químicos de un espesor suficiente para protegerla contra el gas cuando éste puede atacar el vidrio, como en el caso de ácido fluorhídrico. También se utiliza el cloruro del polivinilo (PVC) rígido para fabricar impulsores y cajas, aunque limitado a una fracción de velocidades indicadas para equipos en FRP.

Se han utilizado varios metales y aleaciones y aleaciones para fabricar ventiladores resistentes a la corrosión. Las aleaciones a base de aluminio no se ven afectadas por la mayoría de los gases en ausencia de agua a temperatura ambiente o cercana a la misma. Gases de ácidos y SO_2 en presencia de agua tienen algo de efecto corrosivo sobre el aluminio. Todo álcali atacará el aluminio. Asimismo muchos humos y vapores industriales atacan las superficies de aluminio. El cobre a temperatura ambiente o similar no es afectado por gases halógenos secos, pero requiere la absoluta ausencia de humedad, incluso con refrigerantes halogenados. Entornos normales e industriales no suelen causar corrosiones más allá de la formación de una película de óxido protectora.

Aleaciones de cobre-zinc, cobre-níquel, cobre-estaño y cobre-silicona, no son afectadas por la mayoría de los gases secos a temperaturas normales. La presencia de humedad aumenta considerablemente la corrosividad de los halógenos, SO_2 y CO_2 . En general, el H_2S reacciona incluso a baja humedad.

2.5.1.3 Materiales para construcción antichispas

AMCA, en su Standard 99-0401-664, describe tres tipos de construcción antichispas:

- *Tipo A* requiere que toda pieza del ventilador que esté en contacto con el aire o gas manejado sea construida en metal no ferroso.
- *Tipo B* requiere que el ventilador tenga un rodete totalmente no ferroso y un anillo no ferroso alrededor de la abertura por la que pasa el eje.
- *Tipo C* especifica que el ventilador sea construido de tal forma que un desplazamiento de la rueda o eje no permita el rozamiento o choque de dos piezas ferrosas.

En los tres tipos, los cojinetes no deben estar situados en la corriente de aire o gas, y todas las piezas deben estar puestas a tierra.

Donde se especifican piezas no ferrosas, *bronce* y *aluminio* se utilizan habitualmente. El uso de *acero inoxidable*, a pesar de ser ferroso, ha sido permitido en ciertos casos.

2.6 TEORÍA DE VOLÚMENES FINITOS

El método de los volúmenes de control Finitos permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es un método alternativo a los de diferencias finitas y elementos finitos.

Consideremos una malla de discretización del espacio fluido. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control que no se traslapa con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. Para realizar la integración se requiere especificar perfiles de variación de la variable dependiente entre los puntos de la malla, de modo de poder evaluar las integrales resultantes. La principal propiedad del sistema de ecuaciones discretizada resultante, es que la solución obtenida satisface en forma exacta las ecuaciones de conservación consideradas, independientemente del tamaño de la malla.

2.7 CINEMÁTICA DE FLUIDOS

La Cinemática de Fluidos tiene una correspondencia biunívoca con el Primer Principio de la Termodinámica aplicado a sistemas abiertos. En un fluido en movimiento, cada partícula posee una velocidad V que depende de la posición (x,y,z) de dicha partícula y del tiempo t , es decir:

$$V = f(x,y,z,t)$$

y sus proyecciones sobre los tres ejes son función también de dichas variables, siendo representadas por:

$$u = u(x,y,z,t)$$

$$v = v(x,y,z,t)$$

$$w = w(x,y,z,t)$$

2.7.1 ECUACIÓN DE BERNOULLI²⁴

La ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido bajo condiciones variantes y tiene la forma siguiente:

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

En la ecuación de Bernoulli intervienen los parámetros siguientes:

- P : Es la presión estática a la que está sometido el fluido, debida a las moléculas que lo rodean
- ρ : Densidad del fluido.
- v : Velocidad de flujo del fluido.
- g : Valor de la aceleración de la gravedad ($9,798 \frac{m}{s^2}$, a la altura de Latacunga).

²⁴ Robert L. Mott, Mecánica de Fluidos. Prentice Hall.

- Z: Altura sobre un nivel de referencia.

Aplicabilidad

Para llegar a la ecuación de Bernoulli se han de hacer ciertas suposiciones que nos limitan el nivel de aplicabilidad:

- El fluido se mueve en un régimen estacionario, o sea, la velocidad del flujo en un punto no varía con el tiempo.
- Se desprecia la viscosidad del fluido (que es una fuerza de rozamiento interna).
- Se considera que el líquido está bajo la acción del campo gravitatorio únicamente.

2.7.2 CORRECCIÓN DE LA DENSIDAD²⁵

El funcionamiento de un ventilador depende de la densidad del gas que esté manejando. Así, todos los ventiladores están catalogados en una condición estándar definida como: el aire a 70°F , a nivel del mar, con una densidad del gas de 0.075 lb/ft³ a una presión barométrica de 29.92 in Hg. (pulgadas de mercurio).

En cualquier otra condición, los HP de potencia requeridos por el ventilador y su habilidad para desarrollar presión variarán. Por lo tanto, cuando la densidad del gas no es la estándar de 0.075 lb/ft³ , se deben aplicar factores de corrección a los valores de catalogo con el propósito de seleccionar el ventilador correcto, el motor, y la transmisión. Se utilizó la siguiente fórmula de corrección:

$$\rho' = \rho * \frac{P'}{P} * \frac{T}{T'} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde las variables prima (') son a las condiciones buscadas y las otras variables son a condiciones normales.

²⁵ H.C. Metcalse, Química Moderna. Página 204

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA CABINA PARA PINTURA EN POLVO

3.1 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Tabla 3.1 Matriz de criterios

	CRITERIOS	1	2	3	4	5	SUMA	%
1	Bajo costo de la cabina		7	3	7	5	22	22,00
2	Nivel de producción	3		3	5	3	14	14,00
3	Calidad del producto	7	7		7	7	28	28,00
4	Bajo Mantenimiento	3	5	3		5	16	16,00
5	Ergonomía	5	7	3	5		20	20,00
							100	100,00

LEYENDA

9 Mucho más importante

7 Más importante

5 Igual de importante

3 Menos importante

1 Mucho menos

Tabla 3.2 Matriz de alternativas #1

BAJO COSTO DE LA CABINA

	Tipos de cabinas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Cabinas continuas		3	7	7	17	28,3
b	Cabinas Batch	7		7	9	23	38,3
c	Cuartos de pintura	3	3		7	13	21,7
d	Cabinas de alta producción	3	1	3		7	11,7
						60	100,0

Tabla 3.3 Matriz de alternativas #2

NIVEL DE PRODUCCIÓN

	Tipos de cabinas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Cabinas continuas		5	7	1	13	21,7
b	Cabinas Batch	5		7	1	13	21,7
c	Cuartos de pintura	3	3		1	7	11,7
d	Cabinas de alta producción	9	9	9		27	45,0
						60	100,0

Tabla 3.4 Matriz de alternativas #3

CALIDAD DEL PRODUCTO

	Tipos de cabinas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Cabinas continuas		5	3	3	11	18,3
b	Cabinas Batch	5		3	3	11	18,3
c	Cuartos de pintura	7	7		5	19	31,7
d	Cabinas de alta producción	7	7	5		19	31,7
						60	100,0

Tabla 3.5 Matriz de alternativas #4

BAJO MANTENIMIENTO

	Tipos de cabinas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Cabinas continuas		3	7	7	17	28,3
b	Cabinas Batch	7		9	9	25	41,7
c	Cuartos de pintura	3	1		7	11	18,3
d	Cabinas de alta producción	3	1	3		7	11,7
						60	100,0

Tabla 3.6 Matriz de alternativas #5

ERGONOMÍA

	Tipos de cabinas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Cabinas continuas		5	5	3	13	21,7
b	Cabinas Batch	5		5	3	13	21,7
c	Cuartos de pintura	5	5		3	13	21,7
d	Cabinas de alta producción	7	7	7		21	35,0
						60	100,0

LEYENDA

- 9 Cumple mucho más
- 7 Cumple más
- 5 Cumple igual
- 3 Cumple menos
- 1 Cumple mucho menos

Tabla 3.7 Matriz de priorización

Alternativa \ Criterio	Bajo costo 22%	Nivel de producción 14%	Calidad del producto 28%	Bajo manten. 16%	Ergon. 20%	Total	Prio.
Cabinas continuas	28,3	21,7	18,3	28,3	21,7	23,27	3
Cabinas Batch	38,3	21,7	18,3	41,7	21,7	27,60	1
Cuartos de pintura	21,7	11,7	31,7	18,3	21,7	22,53	4
Cabinas de alta producción	11,7	45,0	31,7	11,7	35,0	26,60	2

Conclusión:

De acuerdo a la matriz de priorización la mejor alternativa a seleccionarse es la cabina tipo Batch debido a que se cuenta con una producción media, razón por la cual el factor costo de construcción y mantenimiento es prioritario para la realización de este proyecto. Además la calidad del producto no se verá afectada en ningún aspecto con el actual diseño.

3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA CABINA

3.2.1 NIVEL DE PRODUCCIÓN

El centro de Producción de la E.S.P.E.L cuenta actualmente con el siguiente nivel de producción mensual:

Tabla 3.8 Producción mensual

ITEM	PRODUCTO	PRODUCCIÓN MENSUAL
1	Camas	200
2	Sillas	600
3	Archivadores	50
4	Anaqueles	35
5	Armarios	20
6	Escritorios	25
7	Mesas	50

Como se puede observar, a simple vista el primer parámetro a utilizar para el dimensionamiento de la cabina de pintura serían las sillas, en vista que son los artículos con mayor número de unidades producidas mensualmente, sin embargo esto no es del todo una realidad ya que se debe tener en cuenta las dimensiones del artículo de mayor tamaño.

Teniendo en cuenta este parámetro, el principal artículo producido a tomar en cuenta para el dimensionamiento es el armario. A continuación se presentan las dimensiones de este artículo:

$L= 2,00 \text{ m}$

$P= 0,60 \text{ m}$

$A= 1,00 \text{ m}$

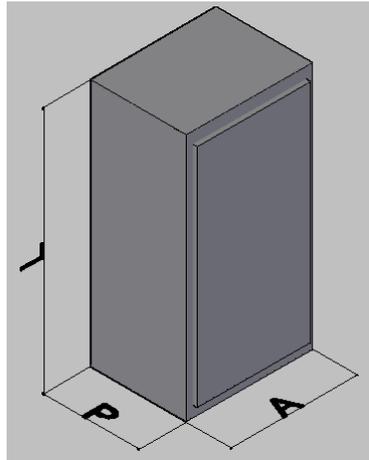


Figura 3.1 Armario tipo

Por tanto, de acuerdo al estudio realizado anteriormente de las necesidades de trabajo, las dimensiones generales de la cabina son las siguientes:

- $L=3500\text{mm}$
- $A=1800\text{mm}$
- $h=2200\text{mm}$

Con estas medidas garantizamos un excelente desenvolvimiento de los trabajadores con un espacio adecuado de maniobrabilidad cuidando la ergonomía y la comodidad del trabajador.

3.2.2 TIPOS DE PRODUCTOS

El centro de producción de la E.S.P.E.L fabrica los siguientes artículos:

- Pupitres
- Camas
- Sillas
- Casilleros
- Archivadores
- Anaqueles
- Armarios
- Escritorios
- Mesas

3.3 ILUMINACIÓN

La iluminación es una característica importante que debe poseer una cabina de pintura. Es necesario un buen sistema de iluminación que proporcione la cantidad y calidad de luz necesaria para un buen desarrollo del trabajo de pintado. Esta calidad de luz garantiza una buena reproducción cromática con un espectro de luz lo más semejante a los patrones de luz día, necesario para una buena percepción del color para la operación de ajuste, ya que la calidad de pintado depende en gran medida de un correcto ajuste del color de acabado. En cuanto a la cantidad de luz, el flujo luminoso debe ser de alrededor de 1000 luxes (un lux es un flujo luminoso de 1 lúmen/m²), nunca inferior a 800 luxes. Dentro de las equivalencias presentadas una luminaria fluorescente emite alrededor de 500 lúmenes/m² (luxes) razón por la cual 2 fluorescentes serían suficientes para la iluminación.

Sin embargo; según el Art. 57, numeral 6 del reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo emitido por el Ministerio de Trabajo y empleo, que trata de la “iluminación artificial recomienda que se utilice focos luminosos como mínimo dobles, debiendo conectarse repartidos entre las fases”.²⁶

²⁶ Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo. Pág 5.

Conclusión:

Por lo tanto es necesario colocar 2 luminarias dobles dentro de la cabina de pintura.

3.4 SELECCIÓN DE MATERIALES

3.4.1 MATERIALES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA

La siguiente tabla nos muestra los materiales escogidos para la construcción de la estructura metálica así también como sus propiedades.

Tabla 3.9 Materiales de construcción de la estructura metálica

PARTE	TIPO	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS
Parantes y Vigas	Perfil en L	Acero al carbono ASTM A-36	El acero A36 es una aleación de acero al carbono de propósito general. Tiene una densidad de 7850 kg/m ³ (0.28 lb/in ³). Límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi).

Se escogió el perfil tipo ángulo debido a su bajo costo, sus propiedades físicas y su buena capacidad estructural por su forma en L.



Figura 3.2 Perfil en L²⁷

3.4.2 MATERIALES DE LAS PAREDES Y SOPORTE

La siguiente tabla nos muestra los materiales escogidos para la construcción de las paredes y soporte así también como sus propiedades.

Tabla 3.10 Materiales de construcción paredes y soporte

PARTE	TIPO	MATERIALES	CARACTERÍSTICAS
Pared posterior, lateral y superior	Planchas de acero e = 0,75 mm	Acero galvanizado	Resistente a la corrosión. Recubrimiento de Zinc. Resistente a la abrasión. Protección integral de los elementos internos. Fácil de pintar.
Soporte de muebles	Tubo cuadrado 20x20x2mm Tubo cuadrado 25x25x20mm	Acero ASTM A-36	El acero A36 es una aleación de acero al carbono de propósito general. Tiene una densidad de 7850 kg/m ³ (0.28 lb/in ³). Límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi), y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi).
Pernos de sujeción	Pernos de 1/4"x 5/8" Pernos de 3/8"x 1 1/4"		
Elementos de sujeción	Arandelas planas y de presión		

²⁷ <http://www.catalogoarquitectura.cl/page/6/>

3.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE LA CABINA EN SAP2000

Datos iniciales:

- Carga máxima permitida: 90 kg para cargas suspendidas en el perfil transversal de soporte de piezas a pintar. La carga está dividida en 3 puntos.

3.5.1 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

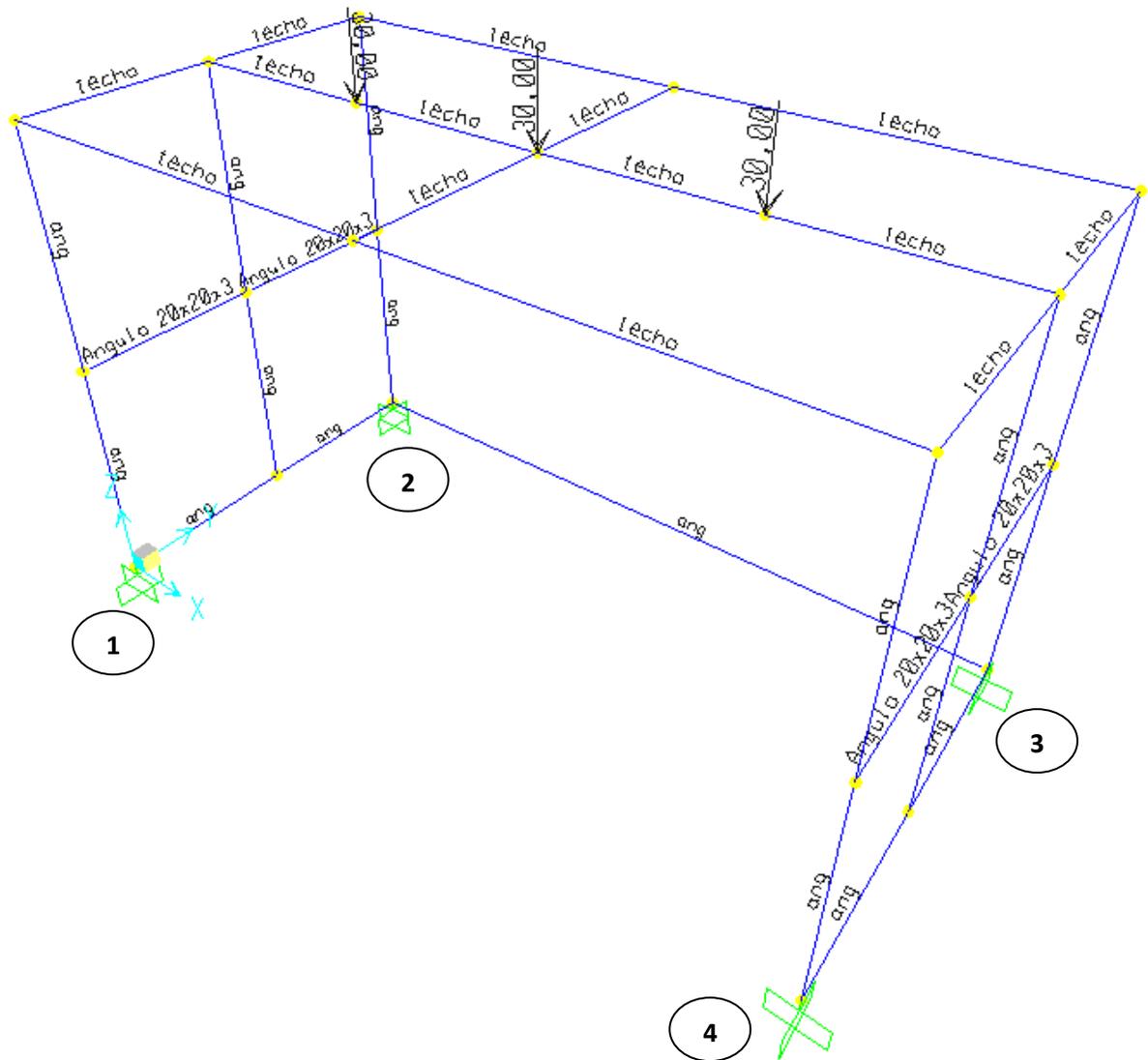


Figura 3.3 Distribución de cargas en la cabina

3.5.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS: ELEMENTO MÁS CRÍTICO

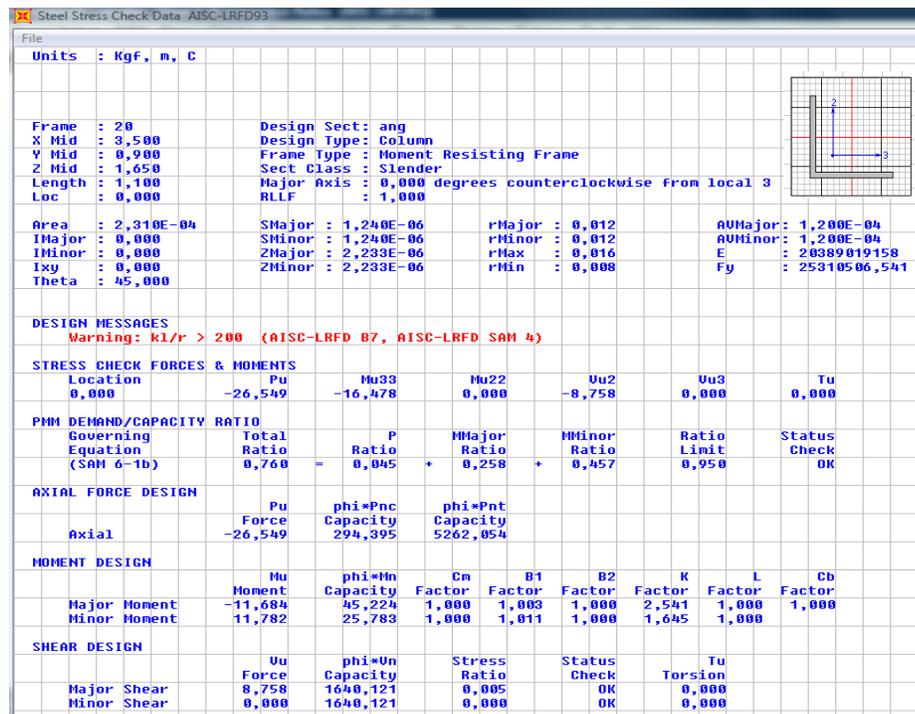


Figura 3.4 Elemento más crítico de la cabina

3.5.2.1 Análisis por flexión

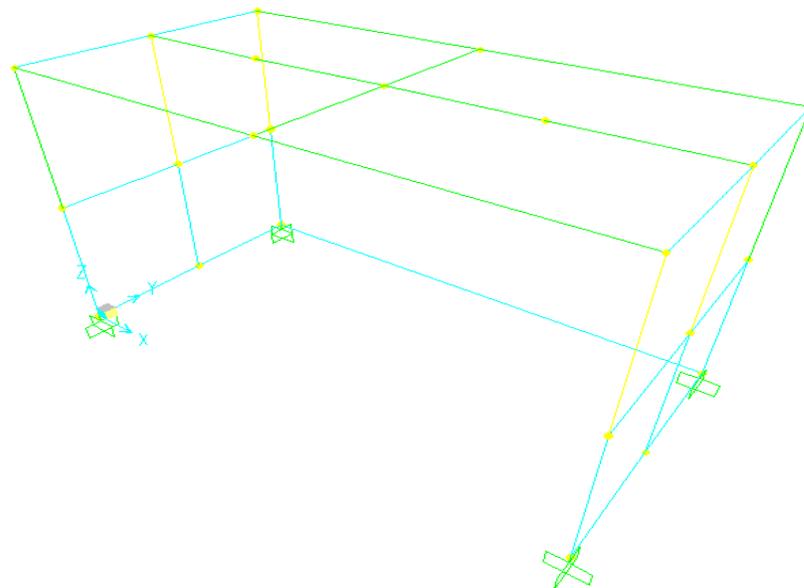


Figura 3.5 Estructura no deformada

Como se puede observar en la Figura 3.6 toda la estructura está sometida a esfuerzos de flexión positivos y negativos, esto nos permite visualizar el comportamiento de la estructura cuando esté sometida a cargas de trabajo y además poder seleccionar la geometría y la disposición de los perfiles adecuada para soportar la carga necesaria.

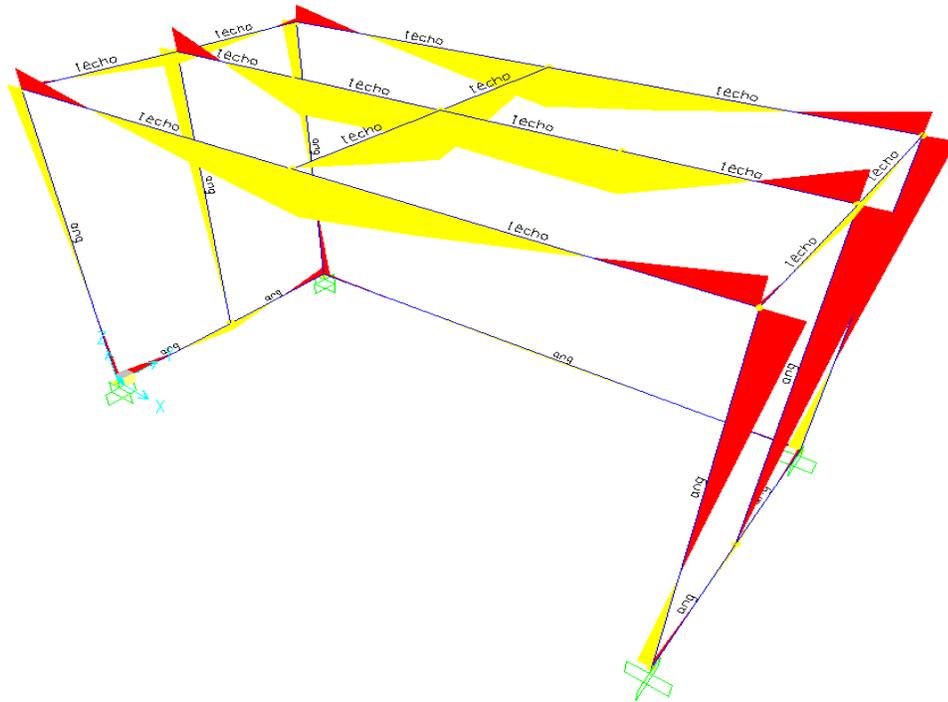


Figura 3.6 Momentos obtenidos gráficamente

La parte más crítica de la estructura es la parte superior (techo) por lo cual en el diseño debe reforzarse esta parte mediante la colocación de un área superior (Perfil más robusto). La segunda parte crítica son 2 parantes que aunque tienen un factor de seguridad bajo es suficiente para este tipo de aplicación ya que no es una estructura de gran responsabilidad.

3.5.3 RESULTADOS OBTENIDOS

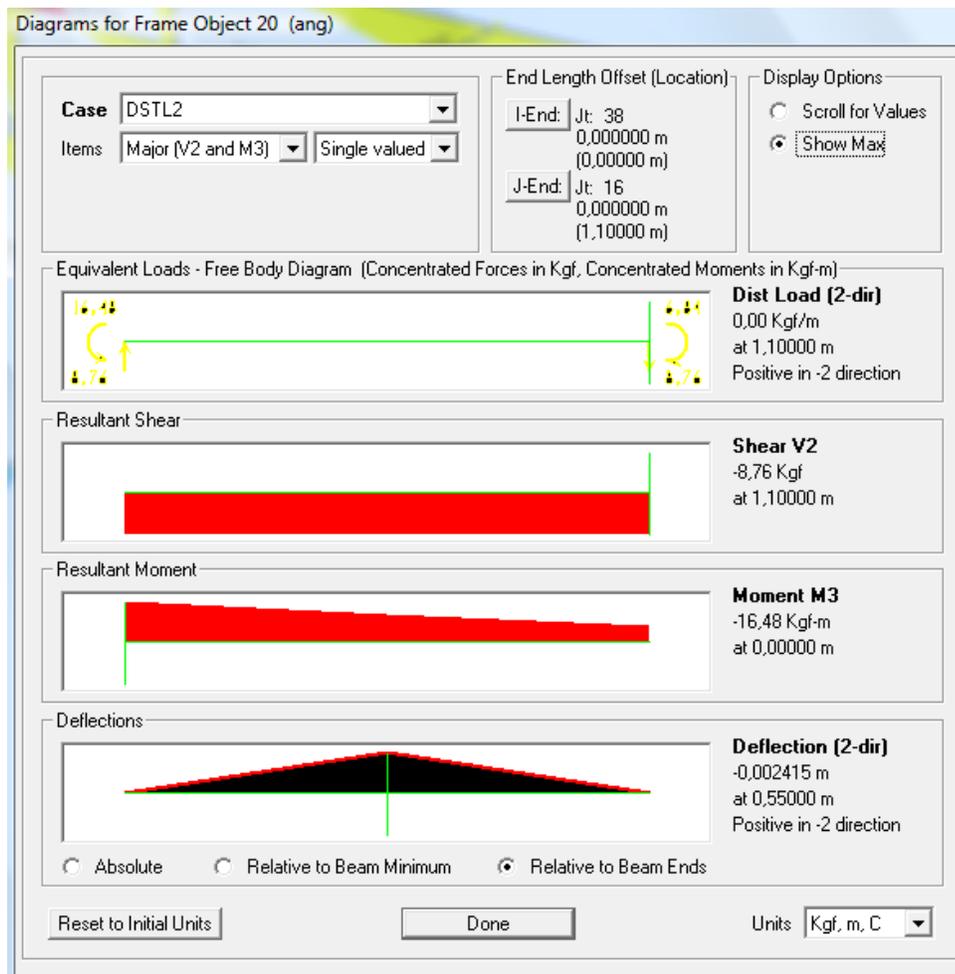


Figura 3.7 Resultados de deflexión, momento y cortante máximo el elemento más crítico de la cabina

Los datos obtenidos del análisis de SAP 2000 son los siguientes:

- Cortante máximo: 8,76 kgf
- Momento máximo: 16,48 kgf-m
- Deflexión : 0,002415 m

Se puede concluir que la estructura no va a sufrir falla debido a los bajos valores de cortante y momentos. Además la deflexión producida es baja ya que las

columnas así como las vigas tienen una sección adecuada, y además tienen soportes entre sí que ayudan a evitar un pandeo excesivo.

3.5.3.1 Reacciones en los apoyos

Apoyo # 1

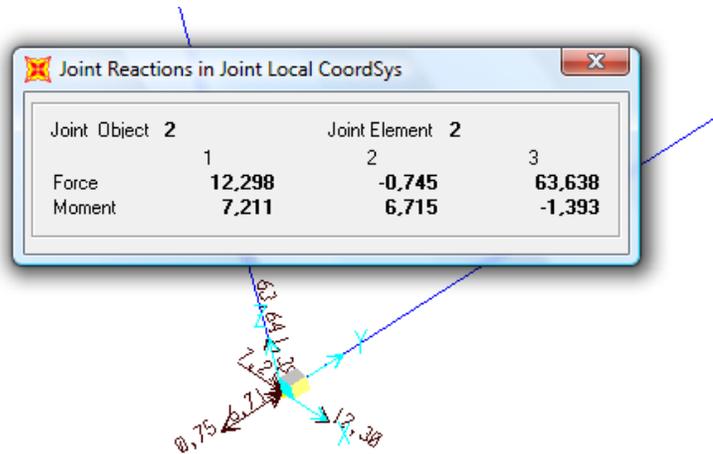


Figura 3.8 Reacción en el apoyo# 1

Apoyo # 2

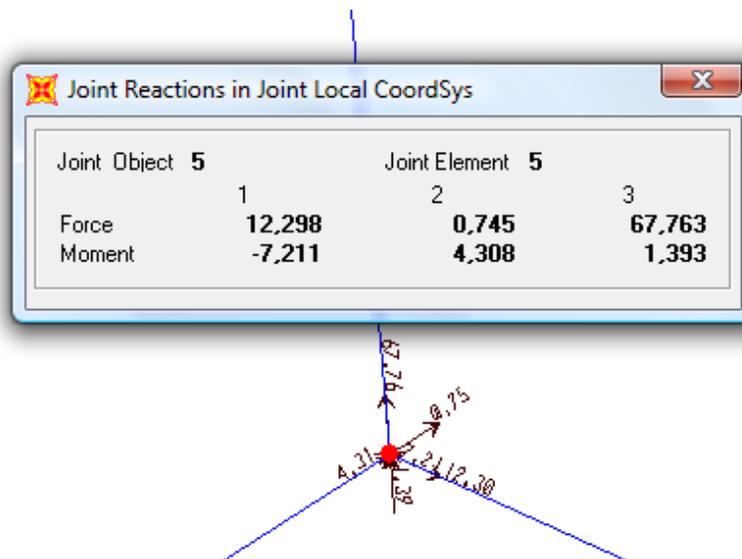


Figura 3.9 Reacción en el apoyo# 2

Apoyo # 3

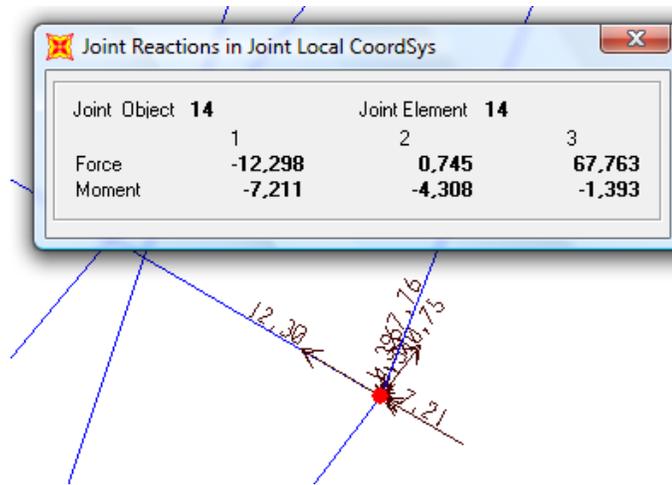


Figura 3.10 Reacción en el apoyo# 3

Apoyo # 4

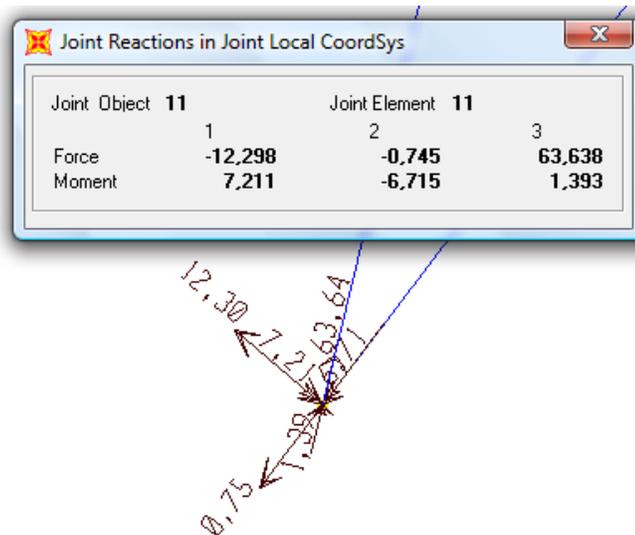


Figura 3.11 Reacción en el apoyo# 4

Como se podía concluir por simple observación antes de cualquier cálculo, las reacciones en los apoyos son bajas y tienen valores casi iguales en todos los

puntos ya que la carga está proporcionalmente distribuida y la estructura es simétrica.

3.5.3.2 Factores de carga de la estructura

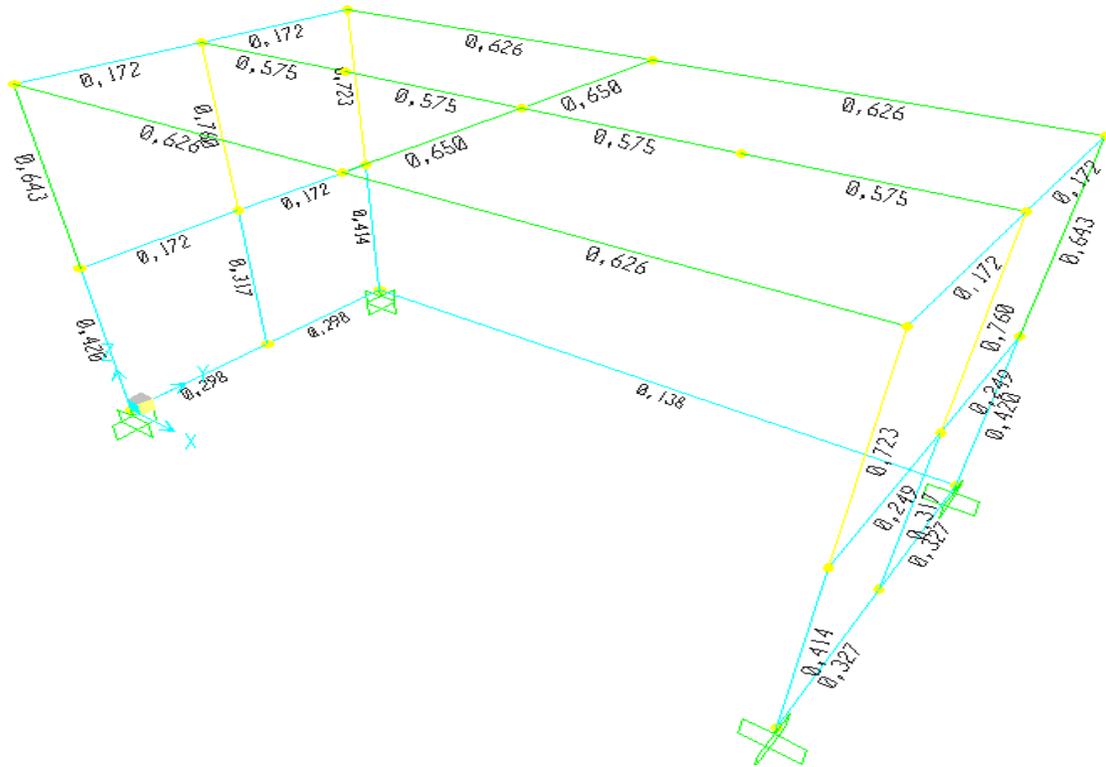


Figura 3.12 Factores de carga de la cabina

Factor de carga más elevado: 0,760 igual a un factor de seguridad mínimo de 1.32

Conclusión:

El factor de seguridad obtenido nos garantiza que la estructura metálica de la cabina va a trabajar de acuerdo a lo estipulado en el diseño sin llegar a sobredimensionar los parámetros de la misma.

Las cargas de diseño deben respetarse para que la estructura responda con un correcto funcionamiento y no exista la posibilidad de falla del material.

3.5.4 CÁLCULO DE LA SOLDADURA EN EL PUNTO MÁS CRÍTICO

$d := 37 \text{ mm}$	Longitud del cordón
$d_{in} := \frac{37}{24.5} = 1.51 \text{ in}$	
$I_u := \frac{d_{in}^3}{3} = 1.148 \text{ in}^3$	Segundo momento del área unitaria (Dos cordones) ²⁸
$\tau := 18000 \text{ psi}$	Esfuerzo cortante permisible con electrodo E6011 ²⁹
$F1 := 30 \text{ kgf}$ $F2 := F1 \cdot 2.2 = 66 \text{ lbf}$	Fuerza Aplicada
$Din := 875 \text{ mm}$	Distancia de la fuerza al centro de gravedad de la soldadura
$D_{inc} := \frac{875}{25.4} = 34.449 \text{ in}$	
$M := F2 \cdot D_{inc} = 2.274 \times 10^3 \text{ lb-in}$	Momento generado
$C1 := \frac{d_{in}}{2} = 0.755 \text{ in}$	Distancia del centro de gravedad al momento aplicado
$h1 := \frac{M \cdot C1}{0.707 I_u \cdot \tau} = 0.118 \text{ in}$	
$h2 := h1 \cdot 25.4 = 2.985 \text{ mm}$	Cordón de soldadura mínimo requerido
<u>Factor de seguridad</u>	
$S_y := 50000 \text{ psi}$	Resistencia a la fluencia
$S_{yy} := 0.577 S_y = 2.885 \times 10^4 \text{ psi}$	Resistencia mínima
$h3 := \frac{5}{32} \text{ in}$	Cordón propuesto Según Norma AWS (4mm) ³⁰
$\tau_2 := \frac{M \cdot C1}{0.707 I_u \cdot h3} = 1.354 \times 10^4 \text{ in}$	

²⁸ Tabla 9-3 Propiedades a la flexión de soldaduras de filete. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:549

²⁹ Tabla 9-7 Esfuerzo cortante permisible en la garganta de soldadura de filete o de muesca de penetración parcial. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:553

³⁰ Norma AWS D1.1 Structural Welding Code 2006, Pág. 69. Tabla 3.4, Especificaciones mínimas de tamaños de soldadura.

Factor de seguridad de la junta

$$n := \frac{S_{yy}}{\tau_2} = 2.131$$

3.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA MUEBLES METÁLICOS

3.6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Cargas totales aplicadas

- 2 Personas de peso promedio: 70 Kg c/u
- 1 Mueble: 70 kg de 3.2 m² de área aproximada (carga distribuida en 5 puntos)

Dimensiones: L=3344mm; A=1750mm; h=353mm

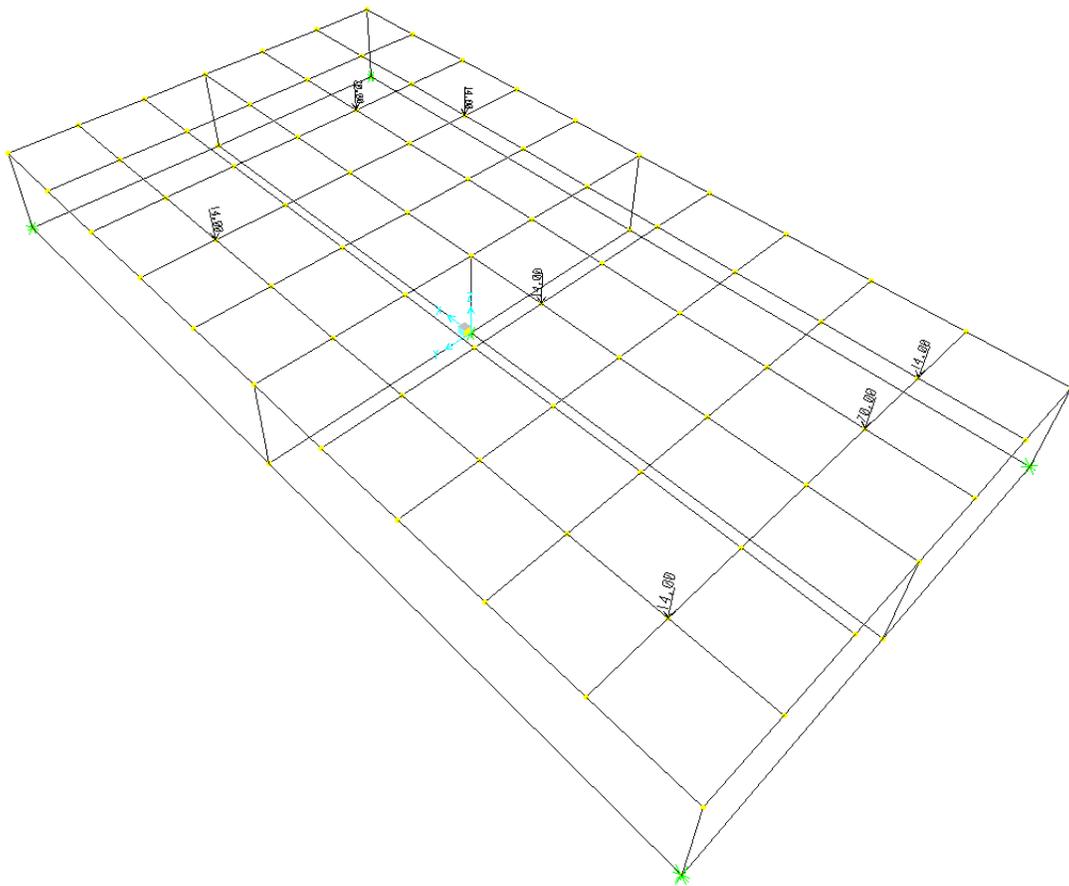


Figura 3.13 Distribución de cargas aplicadas en la base

Las cargas se localizan en puntos estratégicos los cuales a nuestro criterio son los más propicios a presentar falla. Esto se basa en los criterios propios de los diseñadores y puede diferir de acuerdo a la variedad de pensamiento y conocimiento. Sin embargo el modelo de cargas actual presentado es el más favorable para el sistema de trabajo.

3.6.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL ELEMENTO MÁS CRÍTICO Y DIAGRAMA DE MOMENTOS

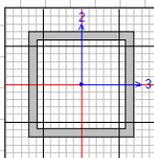
AISC-LRFD93 STEEL SECTION CHECK								
File								
AISC-LRFD93 STEEL SECTION CHECK								
Combo : DSTL2								
Units : Kgf, m, C								
								
Frame : 1	Design Sect: rejilla							
X Mid : -1,650	Design Type: Column							
Y Mid : -0,075	Frame Type : Moment Resisting Frame							
Z Mid : 0,175	Sect Class : Compact							
Length : 0,350	Major Axis : 0,000 degrees counterclockwise from local 3							
Loc : 0,350	RLLF : 1,000							
Area : 1,840E-04	SMajor : 1,308E-06	rMajor : 0,009	AUMajor : 1,000E-04					
IMajor : 0,000	SMinor : 1,308E-06	rMinor : 0,009	AUMinor : 1,000E-04					
IMinor : 0,000	ZMajor : 1,591E-06	E : 20389019158						
Ixy : 0,000	ZMinor : 1,591E-06	Fy : 25310506,541						
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS								
Location	Pu	Mu33	Mu22	Uu2	Uu3	Tu		
0,350	-70,099	9,939	12,677	-40,713	-52,233	0,011		
PMH DEMAND/CAPACITY RATIO								
Governing Equation (H1-1b)	Total Ratio	P Ratio	MMajor Ratio	MMinor Ratio	Ratio Limit	Status Check		
	0,641	= 0,017	+ 0,274	+ 0,350	0,950	OK		
AXIAL FORCE DESIGN								
	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity					
Axial	-70,099	2076,282	4191,420					
MOMENT DESIGN								
	Mu Moment	phi*Mn Capacity	Cn Factor	B1 Factor	B2 Factor	K Factor	L Factor	Cb Factor
Major Moment	9,939	36,242	0,427	1,000	1,000	2,981	1,000	2,161
Minor Moment	12,677	36,242	0,423	1,000	1,000	2,263	1,000	
SHEAR DESIGN								
	Uu Force	phi*Un Capacity	Stress Ratio	Status Check	Tu Torsion			
Major Shear	40,713	1366,767	0,030	OK	0,000			
Minor Shear	52,233	1366,767	0,038	OK	0,000			

Figura 3.14 Elemento más crítico de la base

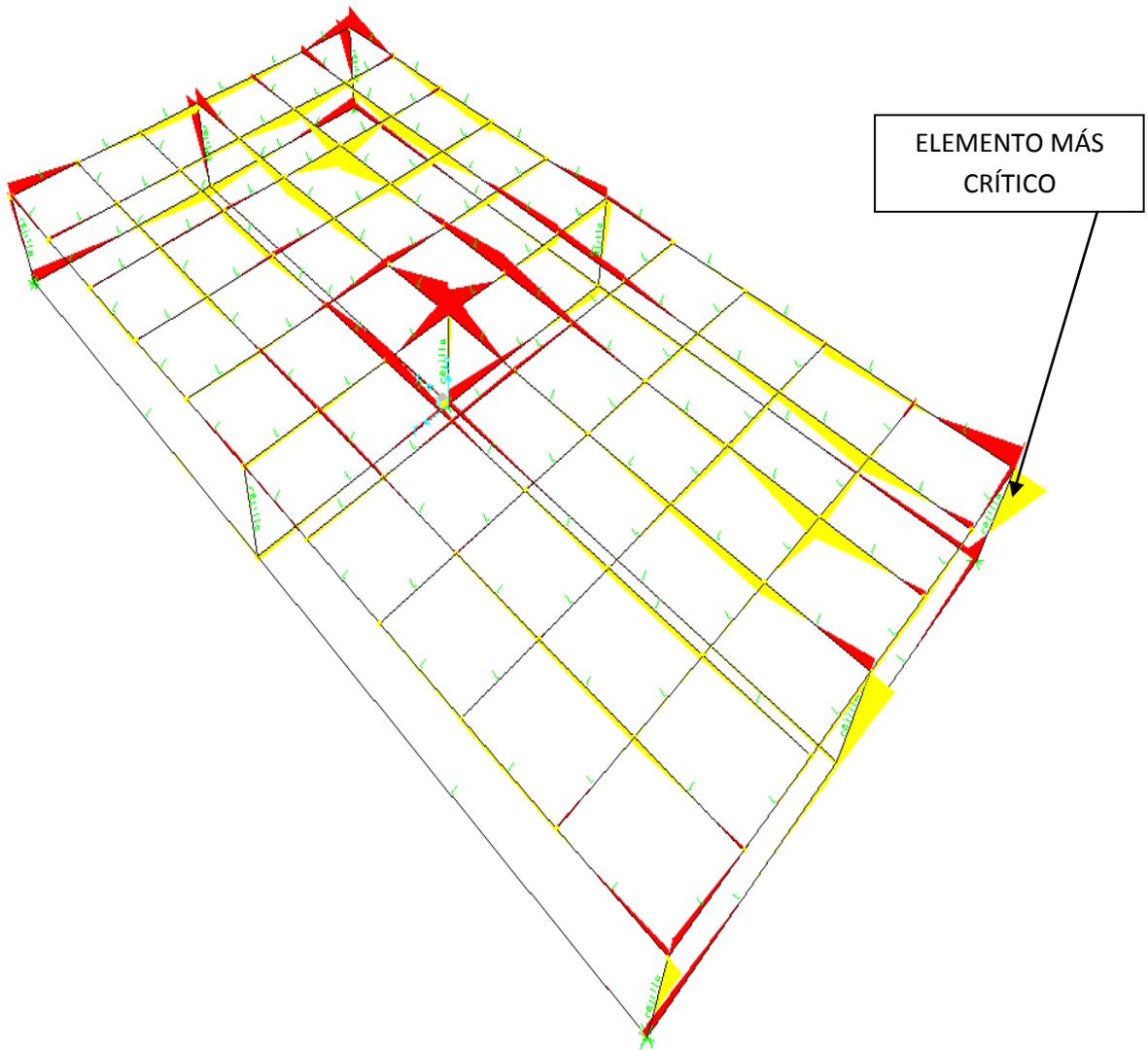


Figura 3.15 Momentos obtenidos gráficamente

Como se puede observar el momento más crítico está ubicado en el elemento que sirve como columna, esto se debe a que estos tubos reciben toda la carga de la estructura y es allí donde se debe reforzar el material con un área transversal más elevada, esto elevará la inercia y el modulo de sección.

3.6.3 RESULTADOS OBTENIDOS

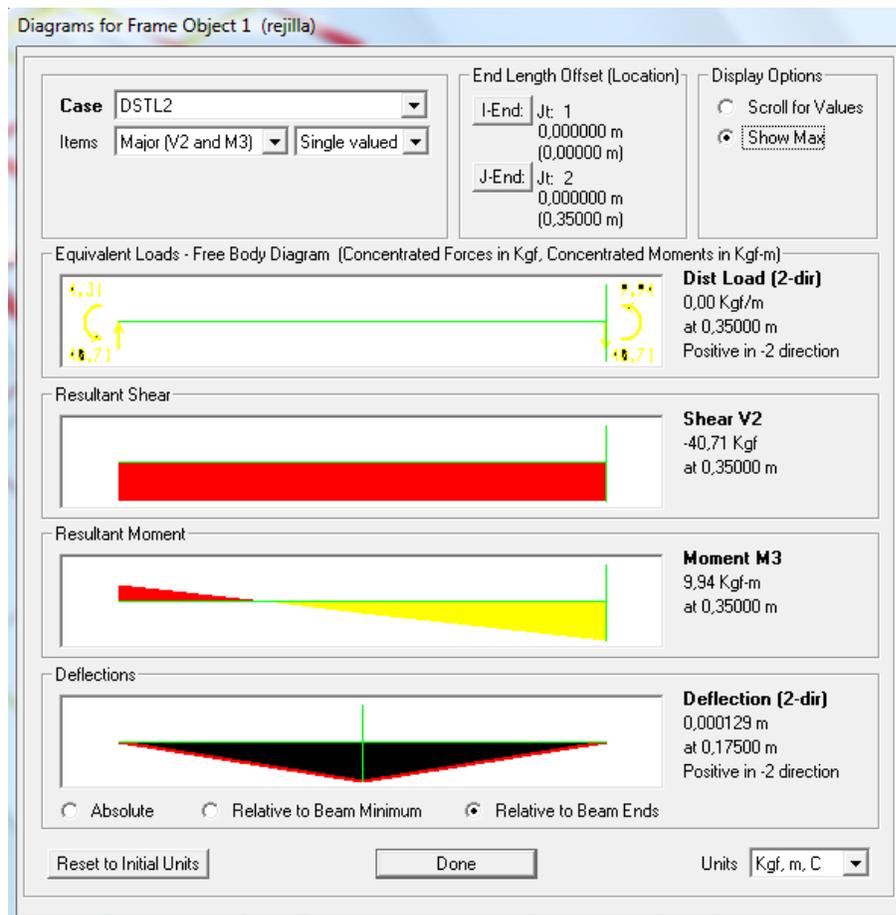


Figura 3.16 Resultados de deflexión, momento y cortante máximo el elemento más crítico de la base

Los datos obtenidos del análisis de SAP 2000 son los siguientes:

- Cortante máximo: 40,71 kgf
- Momento máximo: 9,94 kgf-m
- Deflexión: 0,000129 m

3.6.3.1 Factores de carga

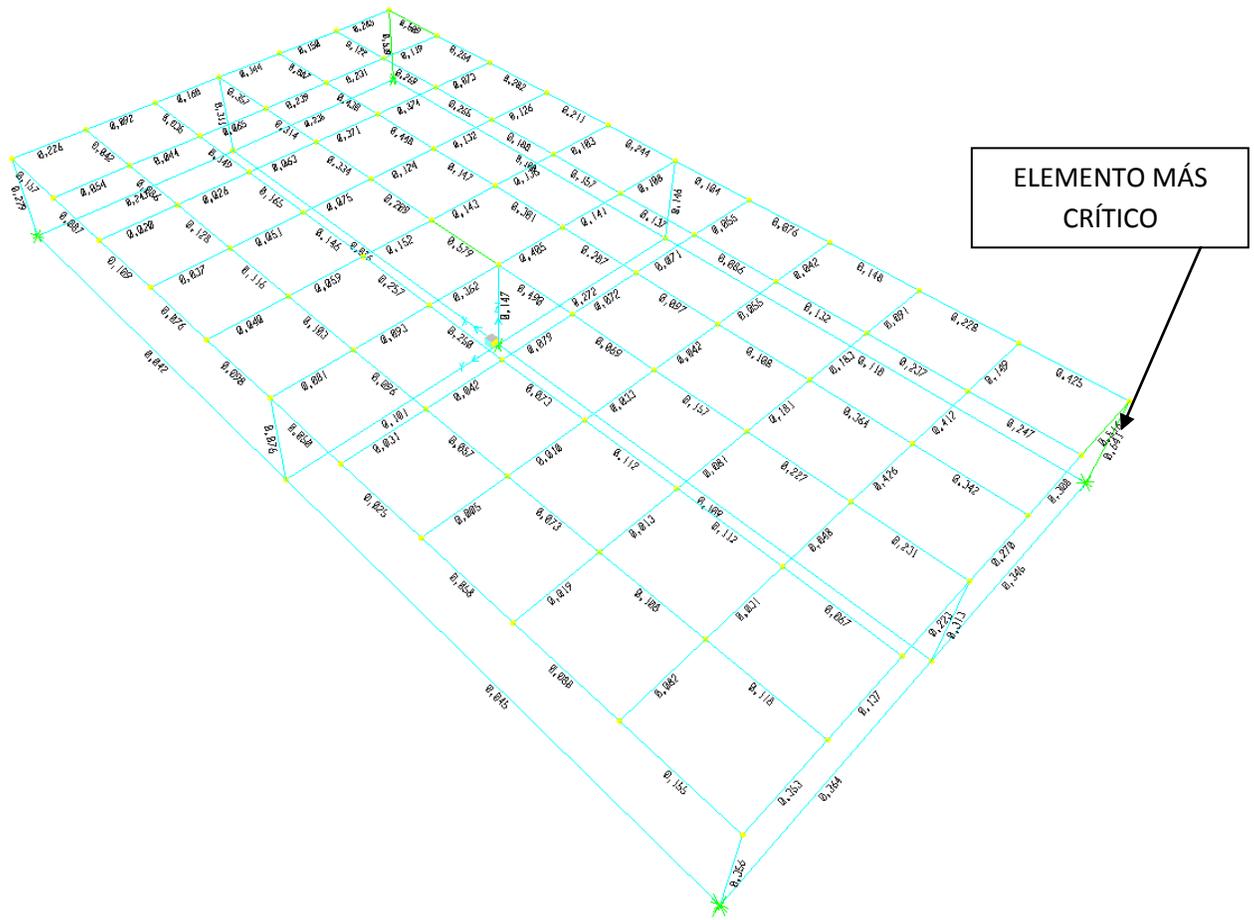


Figura 3.17 Factores de carga de la base

Factor de carga más crítico: 0,641 igual a un factor de seguridad mínimo de 1.56

Conclusión:

Con este factor de seguridad obtenido podemos garantizar el eficiente trabajo de la estructura sometida a las cargas de diseño. No existe riesgo de falla si se cumplen los parámetros del diseño inicial.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE EXTRACCIÓN

4.1 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Tabla 4.1 Matriz de criterios

	CRITERIOS	1	2	3	4	SUMA	%
1	Bajo costo de adquisición del sistema de recolección		5	1	5	11	18,33
2	Eficiencia de recuperación (A un mismo costo del sistema)	5		5	5	15	25,00
3	Facilidad de cambios de color	9	5		3	17	28,33
4	Bajo costo de Mantenimiento	5	5	7		17	28,33
						60	100,00

LEYENDA	
9	Mucho más importante
7	Más importante
5	Igual de importante

3	Menos importante
	Mucho menos
1	importante

Tabla 4.2 Matriz de alternativas #1

BAJO COSTO DE LA ADQUISICIÓN DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN

	Tipos de sistemas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Sistema filtración por mangas		3	1	9	13	21,7
b	Sistema filtración por ciclón	7		3	7	17	28,3
c	Sistema filtración cuarto de succión + filtros	9	7		7	23	38,3
d	Sistema filtración mixto (ciclón mangas)	1	3	3		7	11,7
						60	100,0

Tabla 4.3 Matriz de alternativas #2

EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN (A UN MISMO COSTO DEL SISTEMA³¹)

	Tipos de sistemas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Sistema filtración por mangas		3	3	3	9	15,0
b	Sistema filtración por ciclón	7		3	3	13	21,7
c	Sistema filtración cuarto de succión +filtros	7	7		3	17	28,3
d	Sistema filtración mixto (ciclón mangas)	7	7	7		21	35,0
						60	100,0

³¹ Con todos los sistemas se puede conseguir la misma eficiencia pero el costo, facilidad de construcción y disponibilidad del sistema en nuestro mercado varía considerablemente.

Tabla 4.4 Matriz de alternativas #3

FACILIDAD DE CAMBIOS DE COLOR³²

	Tipos de sistemas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Sistema filtración por mangas		3	1	3	7	11,7
b	Sistema filtración por ciclón	7		3	5	15	25,0
c	Sistema filtración cuarto de succión +filtros	9	7		7	23	38,3
d	Sistema filtración mixto (ciclón mangas)	7	5	3		15	25,0
						60	100,0

Tabla 4.5 Matriz de alternativas #4

BAJO COSTO DE MANTENIMIENTO³³

	Tipos de sistemas	a	b	c	d	SUMA	%
a	Sistema filtración por mangas		3	3	7	13	21,7
b	Sistema filtración por ciclón	7		3	7	17	28,3
c	Sistema filtración cuarto de succión +filtros	7	7		9	23	38,3
d	Sistema filtración mixto (ciclón mangas)	3	3	1		7	11,7
						60	100,0

³² La facilidad de cambios de color está en función al capital disponible para el proyecto ya que con sistemas de alta tecnología se puede conseguir rápidos cambios de color pero con un alto costo.

³³ En el mantenimiento está incluido el costo de filtros repuesto y accesorios

LEYENDA	
9	Cumple mucho más
7	Cumple más
5	Cumple igual
3	Cumple menos
1	Cumple mucho menos

Tabla 4.6 Matriz de priorización

Alternativa \ Criterio	Bajo costo 18,33%	Eficiencia de recup. 25%	Facilidad cam. c. 28,33%	Bajo mtto. 28,33%	Total	Prioridad
Sistema filtración por mangas	21,7	15,0	11,7	21,7	17,16	4
Sistema filtración por ciclón	28,3	21,7	25,0	28,3	25,72	2
Sistema filtración cuarto de succión +filtros	38,3	28,3	38,3	38,3	35,83	1
Sistema filtración mixto (ciclón mangas)	11,7	35,0	25,0	11,7	21,28	3

Conclusión:

De acuerdo a la matriz de priorización la mejor alternativa a seleccionarse es el sistema de extracción y recuperación tipo cuarto de succión y filtros debido a que se puede conseguir una alta eficiencia de recuperación de la pintura electrostática a un bajo costo. Los materiales para la construcción son de fácil adquisición en el mercado. Además se priorizó la necesidad de los cambios de color por lo cual este sistema fue seleccionado.

4.2 DINÁMICA DEL FLUIDO

En esta sección se analizará, mediante la mecánica de fluidos, el comportamiento de las partículas de polvo de pintura electrostática en el aire en movimiento, así como también el comportamiento del aire dentro de la cabina de pintura para conseguir el máximo porcentaje de recolección. Este porcentaje dependerá de la velocidad de captación que se consiga dentro de la cabina, mismo valor que se justificará a continuación:

- Paint Technology Handbook:

Recomienda en el capítulo 8 de cabinas de rociado, pág.157, que la velocidad típica de cara en una cabina de pintura es de 100 a 120 ft/min (0,508 - 0,61 m/s) para operaciones manuales y 50 a 80 ft/min (0,254 - 0,406 m/s) para operaciones automáticas.

Los ventiladores deben ser dimensionados más grandes para permitir la carga de pintura en los filtros durante la producción. A medida que los filtros se cargan con pintura la velocidad de cara disminuye y la cabina no es capaz de absorber todas las partículas de pintura que no se adhieren al mueble.³⁴

- Departamento de trabajo de los Estados Unidos
Norma OSHA (Occupational Safety & Health Administration)

³⁴ Paint Technology Handbook. Rodger Talbert.

En el numeral 1926.66 (b) (5) (i) se recomienda que en un sistema de rociado de pintura la velocidad promedio de la cara abierta de la cabina no debe ser menor a 0.508 m/s (100 ft/min). Para aplicaciones de pintura electrostática la velocidad no debe ser menor a 0,305 m/s (60 ft/min), o más dependiendo del volumen del material a pintar.³⁵

- Tool USA: Es una empresa manufacturera distribuidora de equipos de pintura y de otros tipos.

Todavía se utiliza en ciertos códigos la velocidad de 100 ft/min, aunque en la actualidad si el proceso de pintado lo permite se puede utilizar una velocidad mínima de 0,305 m/s (60 ft/min).³⁶

- KMI Systems Inc.: Es una empresa de soluciones de diseño en ingeniería. Está empresa recomienda que el diseño de la velocidad del aire en la abertura (cara frontal) deber ser alrededor de 0,635 m/s (125 ft/min) y no debe superar los 0,762 m/s (150 ft/min).³⁷

- Canadian Manufacturing: Es una empresa que se dedica a fabricación, diseño en ingeniería trabajo de metales, plásticos y procesos de pintado, entre otros.

Normalmente si existen una o más aberturas en una cabina de pintura en polvo el flujo de aire varía entre 100 y 120 ft/min (0,508-0,610 m/s). En ciertas aplicaciones especiales la velocidad de cara puede ser tan alta como 150 ft/min (0,762 m/s) o tan baja como 70 ft/min (0,356 m/s).³⁸

- Modeam Industries: Empresa dedicada a sistemas de recubrimiento de pintura en polvo.

³⁵ www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=10657

³⁶ <http://toolsusablog.com/2009/07/01/how-much-air-flow-does-my-spray-paint-booth-require/>

³⁷ www.kmisystemsinc.com/custom-coating/powder-coat/default.html

³⁸ www.canadianmanufacturing.com/plastics-coatings/sustainability/designing-a-powder-spray-booth-6334

En los EEUU se especifica un mínimo promedio de velocidad de aire de 60 ft/min a través de aberturas de una cabina de pintura electrostática. Se especifica un promedio ya que la velocidad de aire a través de la cara no es uniforme.

Sin embargo aunque velocidad de 60 ft/min (0,305 m/s) es permitida, en base a la experiencia de esta empresa la velocidad debe ser mayor. Un criterio normal de diseño es 125 ft/min (0,635 m/s). También la forma de las aberturas afecta el flujo de aire en la cabina, una cabina con aberturas altas y estrechas requerirá mayores velocidades promedio.

Establecer una velocidad más alta que el valor mínimo recomendado es una buena práctica ya que nos provee seguridad adicional que el polvo no va a depositarse en la cabina.³⁹

4.2.1 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO Y CÁLCULO DEL CAUDAL

Presión Atmosférica ⁴⁰

$$P_{atm} = 71900 \text{ Pa}$$

Altura del sitio de trabajo

$$h = 2850 \text{ msnm}^5$$

Temperatura

$$T = 12 - 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Media anual}^{41}$$

Densidad del aire

$$\rho = 0,875 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

³⁹ <http://modeanindustries.com/resources/powder-coating-safety/>

⁴⁰ Yunus A. Cengel, Transferencia de calor y masa. 3ra ed. Tabla A-17, Pág.863.

⁴¹ www.latacunga.gov.ec "Ilustre Municipio de Latacunga", www.inahmi.gov.ec

Densidad del aire en condiciones de Latacunga con 13°C de temperatura y 0.71 atm de presión atmosférica

Corrección de densidad

$$\rho_a := 1.225 \left(\frac{0.71}{1} \right) \left(\frac{15 + 273.15}{13 + 273.15} \right) = 0.87583 \quad \text{Kg/m}^3$$

Volumen de aire contenido en la cabina

$$L1 := 3.4 \quad \text{m} \quad \text{Largo}$$

$$A1 := 1.8 \text{ m} \quad \text{Ancho}$$

$$Ha1 := 2.2 \text{ m} \quad \text{Altura}$$

$$V1 := L1 \cdot A1 \cdot Ha1 = 13.86 \quad \text{m}^3$$

$$V_{\text{neto}} := V1 - \frac{8154006.007}{1000^3} = 13.85185 \quad \text{m}^3 \quad \text{menos el volumen de la base}$$

Volumen de Autodesk Inventor

Vneto aproximado a V1

Cálculo de caudal por Velocidad de cara (velocidad dentro de la cabina)

$$V_{\text{face}} := 0.57 \quad \text{m/s} \quad \text{Rango: } 0.508 - 0.635 \text{ m/s} \quad (100 - 125 \text{ ft/min})$$

$$Q_{\text{ext}} := V_{\text{face}} \cdot L1 \cdot (Ha1 - 0.4) = 3.6036 \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{Sólo considero el volumen útil sin la zona de la base}$$

$$Q_{\text{ext}1} := Q_{\text{ext}} \cdot \frac{60}{.3048^3} = 7635.59598 \quad \text{CFM} \quad \text{Volumen de trabajo de la cabina}^{42}$$

$$Q_{\text{mín}} := 0.508 \cdot \frac{60}{.3048} \cdot \frac{L1 \cdot (Ha1 - 0.4)}{.3048^2} = 6781.26356 \quad \text{CFM}$$

$$Q_{\text{máx}} := 0.635 \cdot \frac{60}{.3048} \cdot \frac{L1 \cdot (Ha1 - 0.4)}{.3048^2} = 8476.57945 \quad \text{CFM}$$

$$Q_f := 7812 \quad \text{CFM} \quad \text{según catálogo de ventiladores centrífugos S\&P de Megafrio}$$

$$Q_{\text{ext}} := \frac{Q_f}{60} \cdot .3048^3 = 3.68685 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

⁴² Volumen aproximado de aire de la cabina (sin considerar irregularidades internas, ni la base, ni la pieza de trabajo)

4.2.2 CÁLCULO DE VELOCIDADES Y PRESIONES EN LOS PUNTOS PRINCIPALES

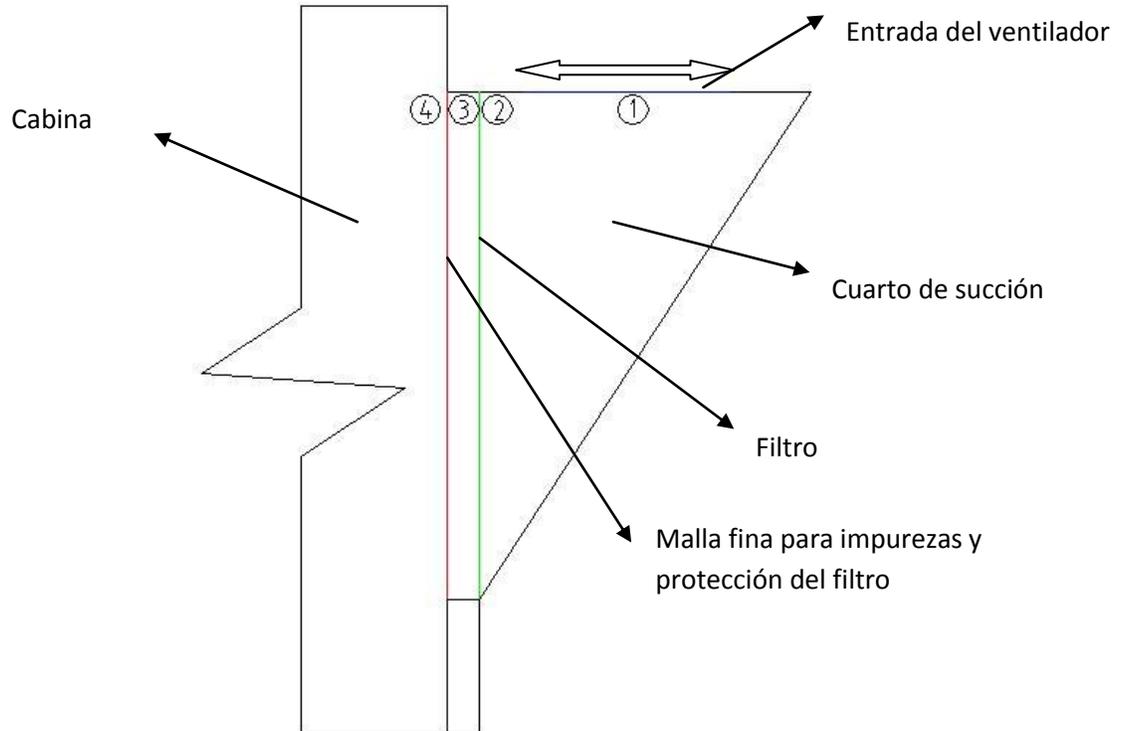


Figura 4.1 Puntos principales del análisis de velocidades

PUNTO 4

$$A_{sc} := L_1 \cdot (H_{a1} - 0.4) = 6.3$$

m² Área de la sección transversal de la cabina perpendicular al flujo

$$V_{p4} := \frac{Q_{ext}}{A_{sc}} = 0.58521$$

m/s Velocidad en el punto 4

$$P_{din4} := \frac{\rho_a \cdot V_{p4}^2}{2} = 0.14998$$

Pa Presión dinámica (Mecánica de Fluidos de Mott pág. 522)

$$P_{din4} := C$$

inH₂O (se asume 0 por ser muy baja)

$$P_{e4} := C$$

inH₂O Presión estática en el punto 4

$$P_{t4} := P_{din4} + P_{e4} = 0$$

inH₂O Presión total en el punto 4

PUNTO 3

$H_{pf} := 1.4$ m Altura del panel de filtros

$A_{nf} := 2.8$ m Ancho del panel de filtros

$A_{pf} := A_{nf} \cdot H_{pf} = 4.2$ m² Área del panel de filtros

$V_{p3} := \frac{Q_{ext}}{A_{pf}} = 0.87782$ m/s Velocidad sin pérdida de presión en el punto 3

$P_{e3} := 0 + P_{e4} = 0$ inH₂O Presión estática en el punto 3

$P_{din3} := \frac{\rho_a \cdot V_{p3}^2}{2} = 0.33744$ Pa Presión dinámica (Mecánica de Fluidos de Mott pág. 522)
 Caída de presión igual a cero ya que es una malla fina sólo para impurezas y protección para el filtro final.

$P_{din3} := 0 + P_{din4} = 0$ inH₂O (se asume 0 por ser muy baja)

$P_{t3} := P_{din3} + P_{e3} = 0$ inH₂O Presión total en el punto 3

PUNTO 2

$g_L := 9.791$ m/s² gravedad a 2800 m.s.n.m.

$V_{p2} := \frac{Q_{ext}}{A_{pf}} = 0.87782$ m/s Velocidad sin pérdida de presión en el punto 2

$P_{e2} := 0.9 + P_{e3} = 0.9$ inH₂O=348.7Pa Presión estática en el punto 2

Caída de presión crítica en el filtro final (Se asume). Antes de 1 inH₂O se debe realizar la extracción del polvo de pintura.

$V_{p2} := \sqrt{2 \cdot g_L \left(\frac{V_{p2}^2}{2 \cdot g_L} - \frac{-0.3487}{\rho_a \cdot g_L} \right)} = 1.25174$ m/s Velocidad en el punto 2 (Teorema de Bernoulli)

$P_{din2} := \frac{\rho_a \cdot V_{p2}^2}{2} = 0.68614$ Pa Presión dinámica (Mecánica de Fluidos de Mott pág. 522)

$P_{din2} := P_{din2} \cdot 0.004015 + P_{din3} = 0.00275$ inH₂O

$P_{t2} := P_{din2} + P_{e2} = 0.90275$ inH₂O Presión total en el punto 2

PUNTO 1

$$\phi_{ev} := 63 \text{ mm} \quad \text{Diámetro de la boca de entrada del ventilador}$$

$$A_{ev} := \pi \frac{\left(\frac{\phi_{ev}}{1000}\right)^2}{4} = 0.31172 \text{ m}^2 \quad \text{Área de entrada del ventilador}$$

$$V_{p1} := \frac{Q_{ext}}{A_{ev}} = 11.82728 \text{ m/s} \quad \text{Velocidad sin caída de presión de entrada del ventilador}$$

$$P_{e1} := 0 + P_{e2} = 0.9 \text{ inH}_2\text{O} = 348.7 \text{ Pa} \quad \text{Presión estática en el punto 1}$$

No existe ya que no hay resistencia alguna

$$V_{p1} := \sqrt{2 \cdot gL \left(\frac{V_{p1}^2}{2 \cdot gL} - \frac{-0.3487}{\rho_a \cdot gL} \right)} = 11.8609 \text{ m/s} \quad \text{Velocidad en el punto 1 (Teorema de Bernoulli)}$$

$$P_{din1} := \frac{\rho_a \cdot V_{p1}^2}{2} = 61.60618 \text{ Pa} \quad \text{Presión dinámica (Mecánica de Fluidos de Mott pág. 522)}$$

$$P_{din1} := P_{din1} \cdot 0.004015 + P_{din2} = 0.2501 \text{ inH}_2\text{O}$$

$$P_{t1} := P_{din1} + P_{e1} = 1.1501 \text{ inH}_2\text{O} \quad \text{Presión total en el punto 1}$$

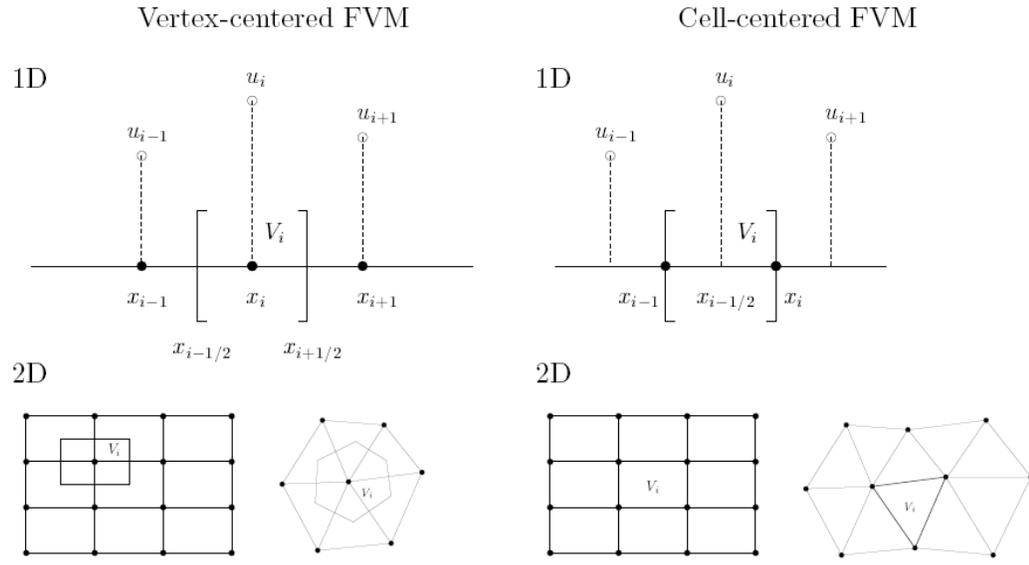
$$P_{et} := P_{e1} = 0.9 \text{ inH}_2\text{O}$$

4.2.3 ANÁLISIS POR VOLÚMENES FINITOS

El método de volúmenes finitos (FVM) es una versión más actual y refinada del método de diferencias finitas y se ha extendido su uso en gran manera en la dinámica de fluidos computacional. La técnica de volúmenes finitos del vértice centrado es muy similar al método lineal de elementos finitos.⁴³

⁴³ Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. Lewis_Nithiarasu

Definition of control volumes



Different grids / control volumes can be used for different variables (v, p, \dots)

Figura 4.2 Definición de los volúmenes de control

El método de volúmenes finitos es un método numérico que para discretizar las ecuaciones de un problema, subdivide el dominio del problema en celdas y escribe las ecuaciones en forma de integrales en estas celdas.⁴⁴ Al representar y evaluar las ecuaciones diferenciales parciales en forma de ecuaciones algebraicas, los valores son calculados en lugares discretos en una geometría mallada. Un volumen finito se refiere a un pequeño volumen bordeando cada nodo en una malla. En este método las integrales de volumen en una ecuación diferencial parcial que contienen un término de divergencia son convertidas en integrales de superficie, usando el teorema de divergencia. Estos términos entonces son evaluados como flujos en las superficies de cada volumen finito. En este método conservador se considera que el flujo que entra en un volumen dado es idéntico al flujo de salida del volumen adyacente.

⁴⁴ The FV FD FE Methods as Numerical Methods for Physical Field Problems. Mattiussi

En la tabla siguiente se presentan varias ventajas y desventajas del método.

Tabla 4.7 Ventajas y desventajas del método de volúmenes finitos

Método de Volúmenes Finitos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es fácilmente formulado para permitir mallas no estructuradas • Tiene un uso de memoria bajo y mayor velocidad de respuesta en los cálculos computacionales con relación a otros métodos. • Permite resolver gran variedad de tipos de flujos como flujos de alta velocidad, flujos turbulentos, procesos de combustión, entre otros. • Tiene una gran difusión ya que el 80% aproximadamente de los programas comerciales de dinámica de fluidos computacional (CFD) aplican este método. • El balance básico de volumen de control de este método no limita la forma de la celda, la masa, el momento, la energía conservada incluso en mallas de baja calidad o burdas. • Posee solucionadores iterativos bien desarrollados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se presenta difusión falsa (ver Figura 4.3) cuando se utilizan expresiones numéricas simples y mallas burdas.

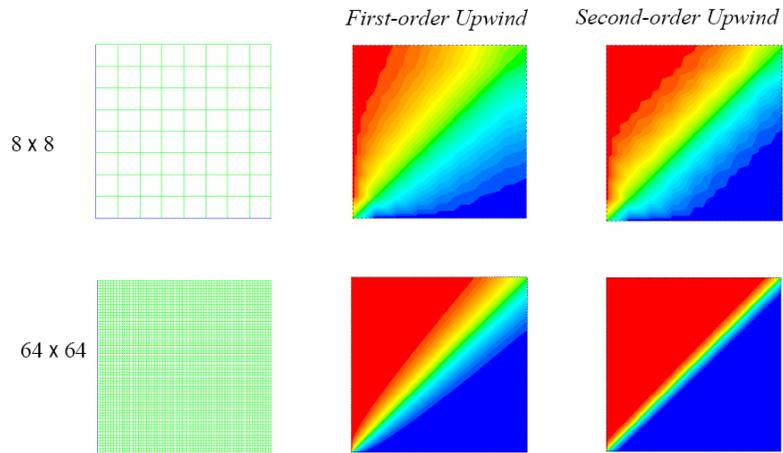


Figura 4.3 Precisión y Falsa Difusión⁴⁵

4.2.3.1 Metodología de resolución

La metodología básica del método de volúmenes finitos es la siguiente:

1. Dividir el dominio en volúmenes de control.

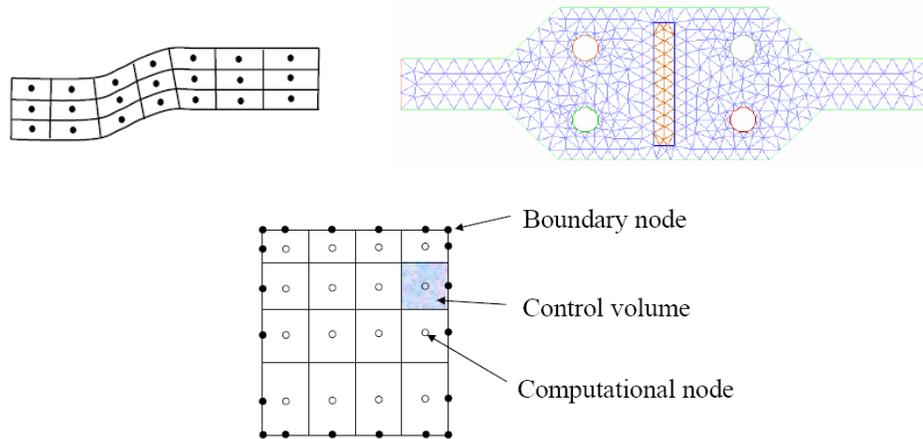


Figura 4.4 Dominios divididos¹⁶

2. Integrar la ecuación diferencial sobre el volumen de control y aplicar el teorema de divergencia.

⁴⁵ Lecture 5 - Solution Methods: Applied Computational Fluid Dynamics del Instructor: André Bakker © Fluent Inc.

3. Para evaluar los términos derivativos, se necesitan los valores de las caras de los volúmenes de control, por lo que hay que asumir acerca de como varía el valor.
4. El resultado es un grupo de ecuaciones algebraicas lineales, una por cada volumen de control.
5. Se resuelve simultáneamente o iterativamente.

El flujo neto a través de la frontera de un volumen de control es la suma de las integrales sobre las cuatro caras del volumen de control en 2D o 6 caras en 3D. Los volúmenes de control no se superponen.

El valor del integrando no está disponible en las caras del volumen de control por lo que se determina mediante interpolación. La figura siguiente explica el proceso.

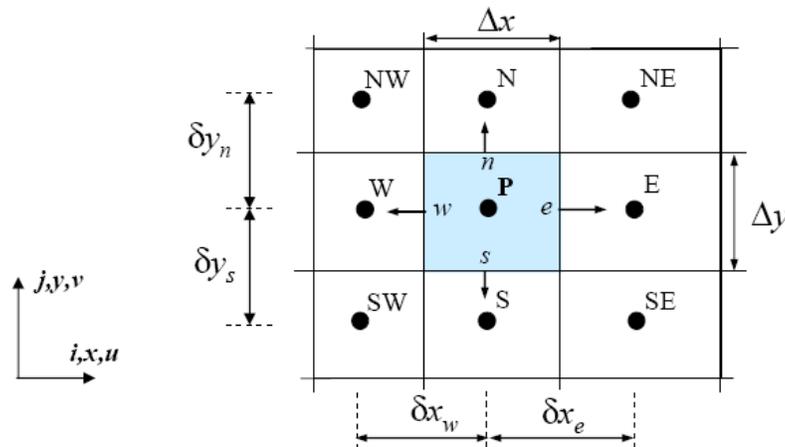


Figura 4.5 Flujo neto en la frontera de un volumen de control³

4.2.3.2 Ecuación general escalar de transporte⁴⁶

La ecuación genérica escalar de transporte es una ecuación diferencial parcial que describe un fenómeno de transporte como la transferencia de calor, la

⁴⁶ Theory Guide of ANSYS FLUENT

transferencia de masa, la dinámica de fluidos (transferencia de momento), etc. Una forma general de la ecuación es:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot f(t, x, \phi, \nabla \phi) = g(t, x, \phi) \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Donde f es conocido como flujo y g es llamada la fuente.

ANSYS FLUENT utiliza un técnica basada en volúmenes de control para convertir una ecuación escalar general de transporte en una ecuación algebraica que puede ser resuelta numéricamente. Esta técnica de volumen de control consiste en integrar la ecuación de transporte en cada volumen de control, lo que nos lleva a una ecuación discreta que expresa la ley de conservación en base a dicho volumen de control.

La discretización de las ecuaciones principales puede ser ilustrada más fácilmente al considerar la ecuación variable (unsteady) de la conservación para transporte de una cantidad escalar Φ . Esto es demostrado por la ecuación siguiente escrita en forma de integral para un volumen de control arbitrario V como sigue:

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad \text{Ec. (4.2)}$$

donde

- ρ = Densidad
- \vec{v} = Vector velocidad (= $u\hat{i} + v\hat{j}$ en 2D)
- \vec{A} = Vector de área
- Γ_ϕ = Coeficiente de difusión para Φ

$$\nabla\phi = \text{Gradiente de } \Phi (= \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) \hat{i} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) \hat{j} \text{ en 2D)}$$

$$S_\phi = \text{Fuente de } \Phi \text{ por unidad de volumen}$$

La ecuación anterior se aplica a cada volumen de control, o celda del dominio computacional. La celda triangular de dos dimensiones mostrada en la figura inferior es un ejemplo de un volumen de control. La discretización de la ecuación anterior en una celda dada es:

$$\frac{\partial\rho\phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{caras}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{caras}}} \Gamma_\phi \nabla\phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad \text{Ec. (4.3)}$$

donde

$$N_{\text{caras}} = \text{Número de caras que encierran una celda}$$

$$\phi_f = \text{Valor de } \Phi \text{ a través de la cara } \mathbf{f}$$

$$\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \text{Flujo másico a través de la cara}$$

$$\vec{A}_f = \text{Área de la cara } \mathbf{f}, |A| (= |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|) \text{ en 2D}$$

$$\nabla\phi_f = \text{Gradiente de } \Phi \text{ en la cara } \mathbf{f}$$

$$V = \text{Volumen de la celda}$$

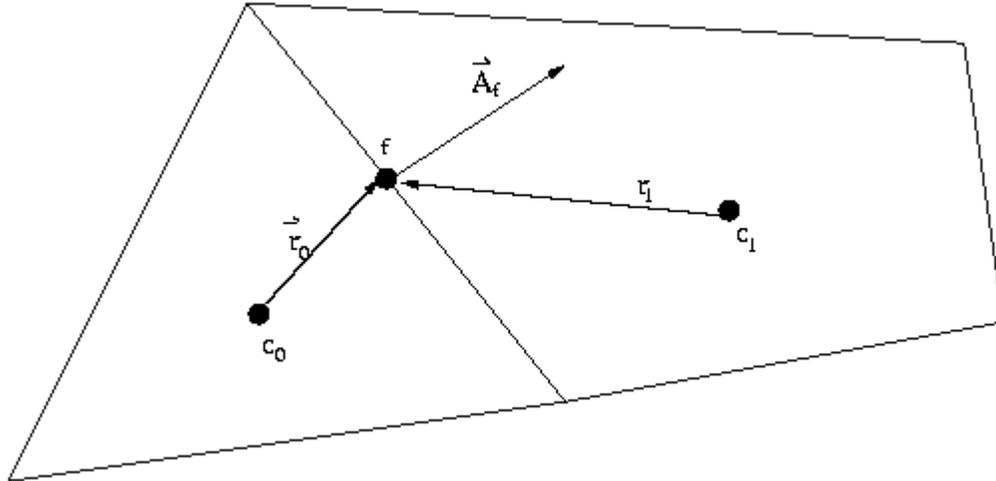


Figura 4.6 Volumen de Control usado para ilustrar la Discretización de una ecuación escalar de transporte

Las ecuaciones resueltas por ANSYS FLUENT toman la misma forma general como la dada anteriormente y se puede aplicar a mallas no estructuradas de tres dimensiones compuestas de poliedros arbitrarios.

4.2.3.3 Proceso de solución de ANSYS FLUENT con el solucionador basado en la presión (Pressure-Based Solver)¹⁷

Se consideran ecuaciones en un estado constante de continuidad y momento en forma integral como sigue:

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{Ec. (4.4)}$$

$$\oint \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \mathbf{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Donde \mathbf{I} es la matriz identidad, $\underline{\underline{\tau}}$ es el tensor de esfuerzo, y \vec{F} es el vector fuerza.

El solucionador basado en la presión usa un algoritmo donde las ecuaciones son resueltas secuencialmente, cada variable ($u, v, w, p, T, k, \epsilon, \text{etc}$) resuelta una después de otra. Debido a que las ecuaciones que gobiernan el modelo no son lineales y acopladas, los saltos en la solución deben ser llevados iterativamente para obtener una solución numérica convergida.

Cada iteración consiste en los pasos enumerados a continuación:

1. Actualizar las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, calor específico, etc.) incluida la viscosidad turbulenta (difusividad) basadas en la solución actual.
2. Resolver las ecuaciones de momento, una después de otra, usando los valores recientemente actualizados de la presión y los flujos máscicos de cara.
3. Resolver la ecuación de corrección de la presión usando los valores recientes obtenidos del campo de velocidad y de flujo máscico.
4. Corregir los flujos máscicos de cara, presión, y campo de velocidad usando la corrección de presión obtenida en el paso 3.
5. Resolver las ecuaciones para escalares adicionales, si hay alguno, tales como cantidades de turbulencia, energía, especies, intensidad de radiación usando los valores actuales de las variables solución.
6. Actualizar los términos de origen de las iteraciones debido a diferentes fases si las hay.
7. Confirmar la convergencia de las ecuaciones.

Estos pasos continúan hasta que el criterio de convergencia establecido sea encontrado. El siguiente diagrama de flujo refleja el proceso.

Pressure-Based Segregated Algorithm

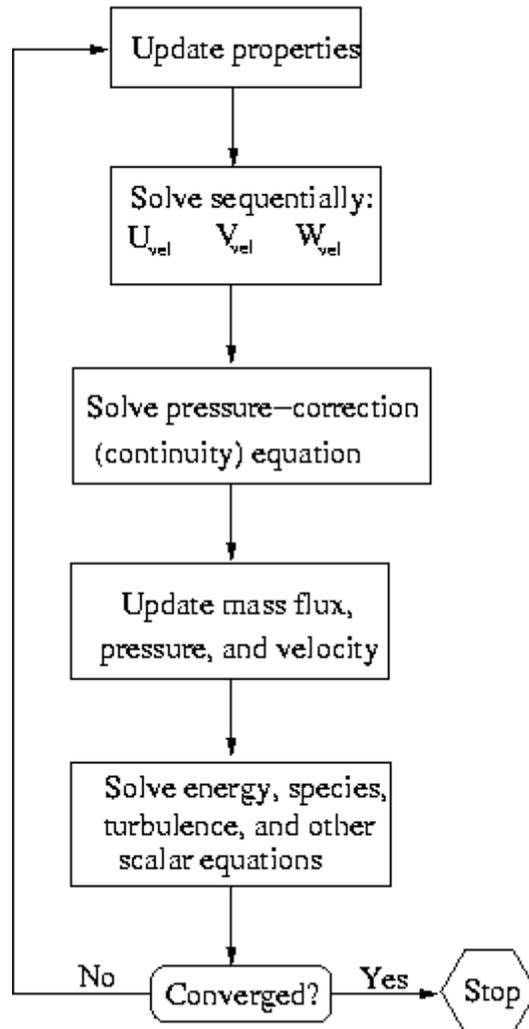


Figura 4.7 Diagrama del Pressure-Based Solver¹⁷

4.2.4 TURBULENCIA

Un flujo turbulento está caracterizado por fluctuaciones de la velocidad en todas las direcciones y tiene un infinito número de grados de libertad. Resolver las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo turbulento es imposible porque las ecuaciones son elípticas, no lineales, acopladas (presión-velocidad, temperatura-velocidad), el flujo es tridimensional, caótico, difusivo, disipador e intermitente. La característica más importante de un flujo turbulento es el número infinito de

escalas o grados de libertad por lo que una resolución numérica completa del flujo requiere la construcción de una malla con un número de nodos que es proporcional a $Re^{9/4}$.

Para resolver el problema una de las soluciones es reducir el número de escalas de infinito a 1 o 2, al usar la descomposición de Reynolds. Esta descomposición llevará a un sistema de ecuaciones que gobiernen el campo promedio del flujo. Las nuevas ecuaciones serán exactas para este campo no para el campo exacto del flujo turbulento. Un campo promedio del flujo significa que cualquier propiedad se vuelve constante en el tiempo. El resultado de usar la descomposición de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes es conocido como RANS o Reynolds Averaged Navier Stokes Equations.

4.2.4.1 Modelo estándar de turbulencia $k - \epsilon$ ¹⁷

Los más simples de los “modelos completos” de turbulencia son los modelos de 2 ecuaciones en los que la solución de dos ecuaciones de transporte separadas permiten determinar la velocidad de turbulencia y la escalas de longitud independientemente. El modelo estándar $k - \epsilon$ usado en ANSYS FLUENT es una herramienta muy útil en la ingeniería práctica desde que fue propuesto por Launder y Spalding. Sus ventajas como su robustez, economía (uso de memoria, tiempo=\$), y su precisión razonable para un amplio rango de flujos turbulentos, le han dado un puesto en el análisis de flujos industriales y las simulaciones de transferencia de calor. Este es un modelo semi-empírico, y la derivación de las ecuaciones del modelo se basa en las consideraciones fenomenológicas y empíricas.

Al conocerse las fortalezas y debilidades del método estándar, se han realizados mejoras para mejorar el rendimiento. Dos de esas variantes disponibles en ANSYS FLUENT son el RNG $k - \epsilon$ model y Realizable $k - \epsilon$ model.

El modelo $k - \epsilon$ estándar se basa en ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ϵ). El modelo de la ecuación de transporte para k es deducido de una ecuación exacta, mientras que el modelo de la ecuación de transporte para ϵ fue obtenido usando razonamiento físico.

En la deducción de este modelo se asume que el flujo es completamente turbulento, y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

La energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ϵ) son obtenidos de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad \text{Ec. (4.6)}$$

y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad \text{Ec. (4.7)}$$

G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes representativos de velocidad. G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad o sustentación hidráulica. Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en una turbulencia compresible a la razón de disipación promedio. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ y $C_{3\epsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ϵ son los números de Prandtl turbulentos para $k - \epsilon$ respectivamente. S_k y S_ϵ son términos definidos por el usuario.

La viscosidad turbulenta (Eddy viscosity) μ_t , se calcula combinando k y ϵ como sigue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \text{ Ec. (4.8)}$$

donde C_μ es una constante

Las constantes $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , y σ_ϵ tienen los valores experimentales default siguientes:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3^{47}$$

Estos valores fueron determinados por experimentos con aire y agua para flujos turbulentos fundamentales cortantes incluidos flujos cortantes homogéneos. Estos fueron encontrados para trabajar bastante bien con un amplio rango de flujos limitados por paredes y flujos libres de cortante.

4.2.5 ANÁLISIS COMPUTACIONAL

Es análisis computacional se lo llevará a cabo por el método de volúmenes finitos que sirve para representar y evaluar ecuaciones diferenciales parciales como ecuaciones algebraicas. Similar al método de diferencias finitas, los valores se calculan en los lugares discretos en una geometría endentada. El “volumen finito” se refiere al volumen pequeño que rodea cada nodo en un acoplamiento. En el método de volúmenes finitos, las integrales del volumen en una ecuación diferencial parcial que contienen la divergencia, el término se convierte a integrales superficiales, al usar teorema de la divergencia. Estos términos entonces se evalúan como flujos en las superficies de cada volumen finito. Porque el flujo que incorpora un volumen dado es idéntico a éste que sale del volumen adyacente, estos métodos son conservadores. Otra ventaja del método de volúmenes finitos es que está formulada fácilmente para permitir acoplamientos no

⁴⁷ B. E. Launder and D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.

estructurados. El método se utiliza en muchos paquetes de software computacional.

Los volúmenes finitos se desarrollaron recientemente con la ayuda de la invención tecnológica de computadores digitales, fue en ese momento donde los cálculos muy extensos y repetitivos, que demanda este método, podrían realizarse y de esta manera podrían ser viables.

Por lo tanto podemos dilucidar que el análisis del flujo de aire y el comportamiento del mismo se llevará a cabo mediante un ordenador por la complejidad sumamente alta de los cálculos. De igual manera se procederán a realizar las simulaciones del flujo de aire y partículas con la ayuda de un computador.

4.2.5.1 Selección de software óptimo

La selección del software óptimo se basó en los siguientes criterios:

- Disponibilidad en el mercado
- Velocidad de cálculo
- Precisión del cálculo
- Accesibilidad de manejo
- Confiabilidad de respuestas

Por lo tanto tomando en cuenta estos criterios se han seleccionado 2 programas útiles y que cumplen con las condiciones anteriores. Estos programas son:

- ANSYS Fluent V12.1
- Flowizard V2.0.4

El principal programa de apoyo es ANSYS Fluent V12.1, este paquete muy completo nos servirá para el cálculo, y nos proporcionará una simulación adecuada acerca del problema del movimiento del fluido (aire, aire + polvo de pintura) dentro de la cabina de pintura.

Además nos proporcionará un visión de cuál es el comportamiento del polvo de pintura dentro de la cabina.

El segundo programa se utilizará de forma comparativa para cotejar los datos provistos por ANSYS Fluent V12.1, y de esta manera asegurarse que las simulaciones están dentro de un margen de exactitud y confiabilidad.

4.2.5.2 Cálculo computacional

A continuación se muestra el cálculo computacional mediante el uso del software ANSYS Fluent V12.1. Primeramente se presentan los pasos a seguir para realizar la simulación, a continuación las figuras presentadas muestran el proceso de iteraciones, el mallado, contornos de velocidad, presión estática y otros datos que nos servirán de apoyo al momento de analizar los resultados obtenidos.

4.2.5.2.1 Pasos para la solución con parámetros de simulación de Ansys Fluent 12.1 basados en los tutoriales de Solver settings del software

Cálculo de velocidades

1. Pestaña General

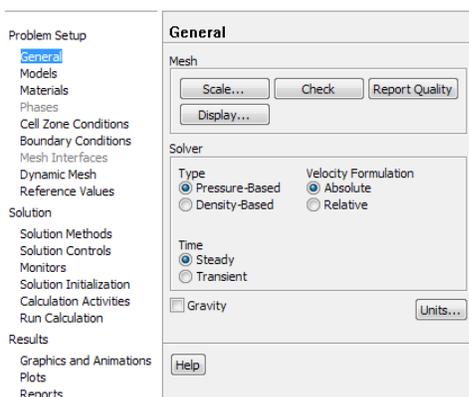


Figura 4.8 Cuadro de diálogo General

- Se escoge el Pressure-Based solver que es aplicable para un amplio rango de regímenes de flujo, desde fluidos incompresibles de baja velocidad a fluido compresibles de alta velocidad. Este solucionador requiere menos memoria que el Density-Based solver y permite flexibilidad en el procedimiento de solución.
- Es un flujo estable (Steady) ya que no varía con el tiempo.
- La gravedad no se considera ya que la densidad del fluido es baja y no afecta a los resultados.

2. Pestaña Models

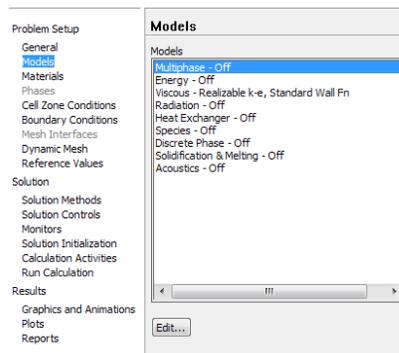


Figura 4.9 Cuadro de diálogo Models

- Se escoge un modelo viscoso turbulento k-e, que es un modelo muy aceptable y sencillo para analizar la turbulencia en la entrada de la boca del ventilador ya que existe una transición de flujo laminar a turbulento es importante identificarla.

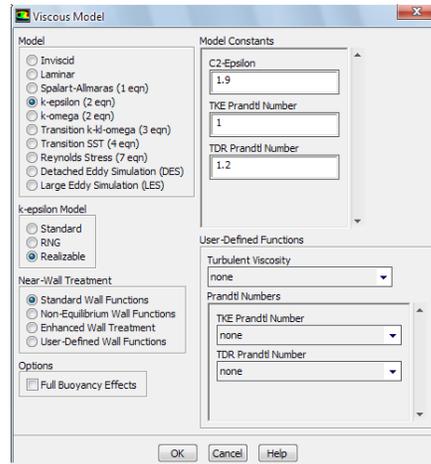


Figura 4.10 Cuadro de diálogo Viscous Model

3. Pestaña Materials

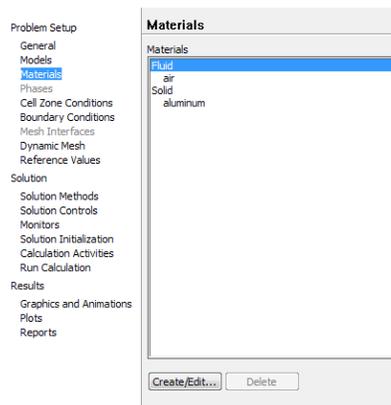


Figura 4.11 Cuadro de diálogo Materials

- Defino las propiedades del aire a las condiciones de la ciudad de Latacunga (densidad y viscosidad)

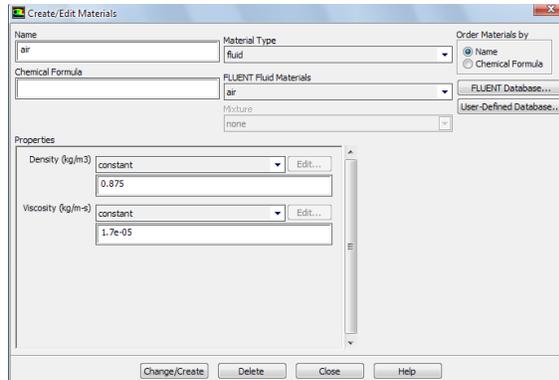


Figura 4.12 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials

4. Pestaña Cell Zone Conditions

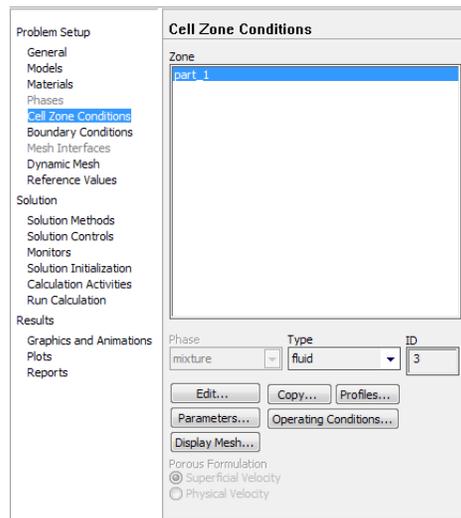


Figura 4.13 Cuadro de diálogo Cell Zone Conditions

- Defino las condiciones de operación de la ciudad de Latacunga en la ventana Operating Conditions.

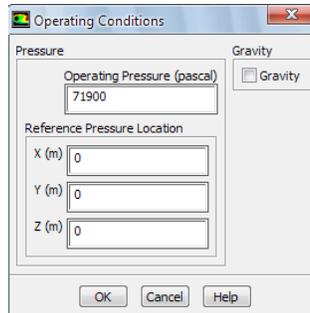


Figura 4.14 Cuadro de diálogo Operating Conditions

5. Pestaña Boundary Conditions

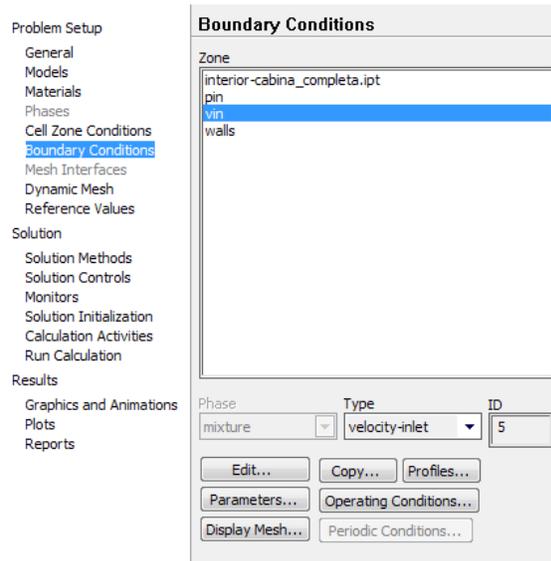


Figura 4.15 Cuadro de diálogo Boundary Conditions

- Defino las características de la frontera vin con una velocidad de -11.83m/s (calculada con el caudal del ventilador seleccionado y su correspondiente diámetro de boca de entrada del aire), la cual es negativa ya que el fluido sale de la frontera vin.

La Intensidad de turbulencia default y diámetro hidráulico de la boca del ventilador.

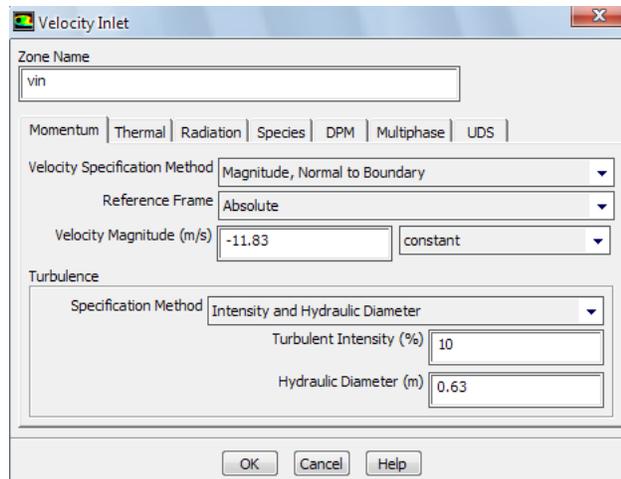


Figura 4.16 Cuadro de diálogo Velocity Inlet

- Defino las características de la frontera pin donde la presión manométrica es igual a cero ya que el aire es tomado a presión atmosférica. La Intensidad de turbulencia default y diámetro hidráulico de la cara de entrada de la cabina

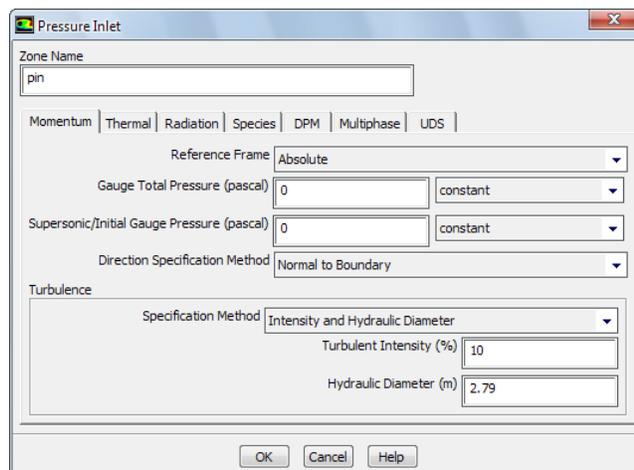


Figura 4.17 Cuadro de diálogo Pressure Inlet

6. Pestaña Solution Methods

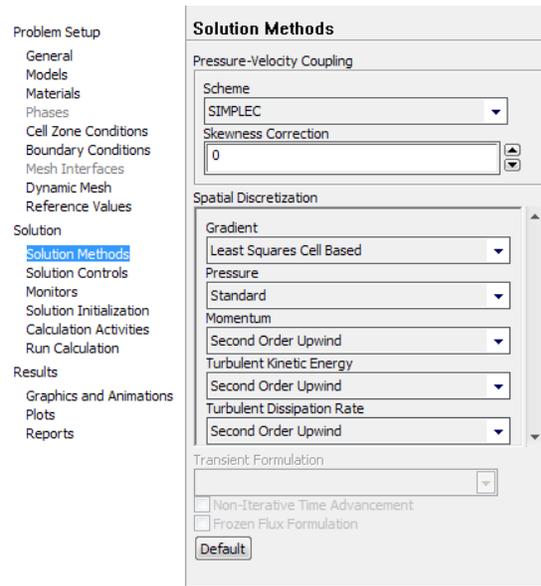


Figura 4.18 Cuadro de diálogo Solution Methods

- Escojo de las 4 opciones el algoritmo (Scheme) SIMPLEC que ayuda a conseguir una rápida convergencia.
- Escojo el Gradiente Least Square Cell Based que es el default y que es recomendado para mallas con elementos tipo poliedros y que tiene una alta precisión.
- Escojo para la ecuación de Momentum: Second Order Upwind como recomendación del programa para poder tener una solución con una precisión adecuada.
- Para el cálculo de turbulencia escojo igualmente Second Order Upwind.

7. Pestaña Solution Controls

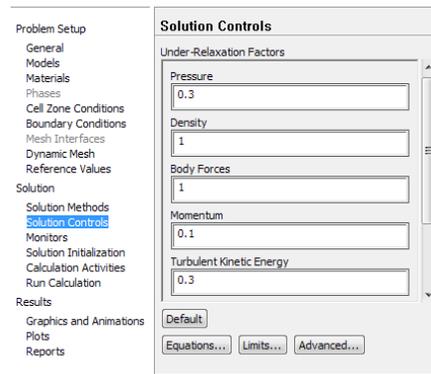


Figura 4.19 Cuadro de diálogo Solution Controls

- Todos los factores quedan con valor default (Under-relaxation factors) y después de que llegan los residuales hasta 10^{-3} , se disminuyen para hallar una convergencia menor (como se muestra en la captura)

8. Pestaña Monitors

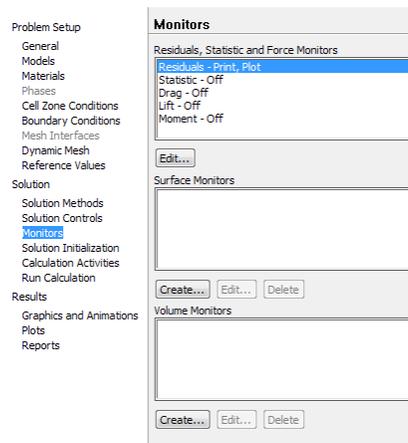


Figura 4.20 Cuadro de diálogo Monitors

- Se deja la convergencia menor de 0.001 para todos los parámetros y después de disminuir los factores de momento y turbulencia se

disminuye la convergencia hasta aproximadamente 10^{-4} , dependiendo el caso.

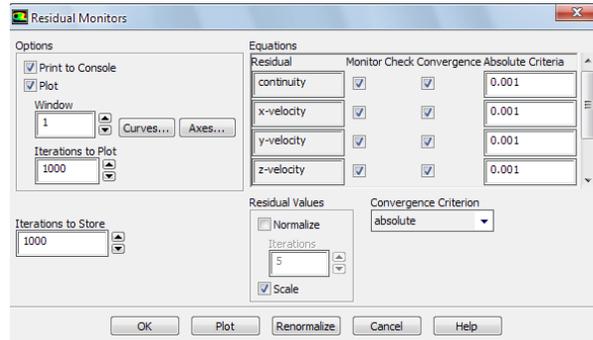


Figura 4.21 Cuadro de diálogo Residual Monitors

9. Pestaña Solution Initialization

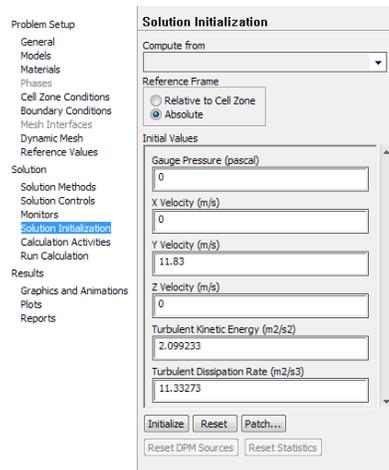


Figura 4.22 Cuadro de diálogo Solution Initialization

- Se inicializan todas las variables para poder iniciar el cálculo.

10. Pestaña Run Calculation

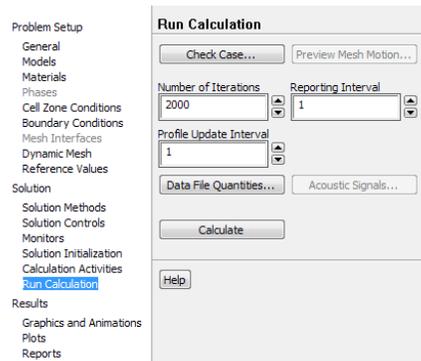


Figura 4.23 Cuadro de diálogo Run Calculation

- Se establece un número de iteraciones adecuado para que el cálculo no se detenga antes de llegar a la convergencia establecida en el cuadro de diálogo Residual monitors, en base a la experiencia de manejo del programa se ingresa 2000 iteraciones para este caso.

11. Pestaña Graphics and Animations

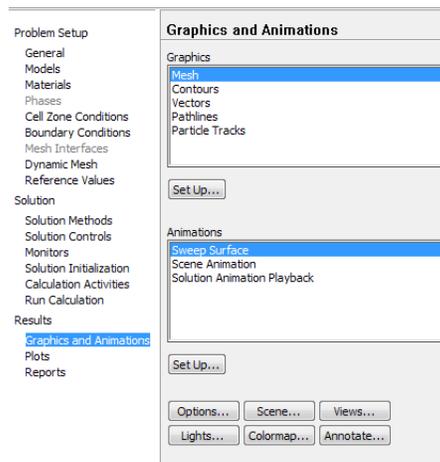


Figura 4.24 Cuadro de diálogo Graphics and Animations

- Se presentan los resultados gráficos de contornos y vectores. Se activa la malla, y se escoge presentar resultados de magnitud de velocidad, presión dinámica, estática y total, turbulencia y otros datos necesarios.

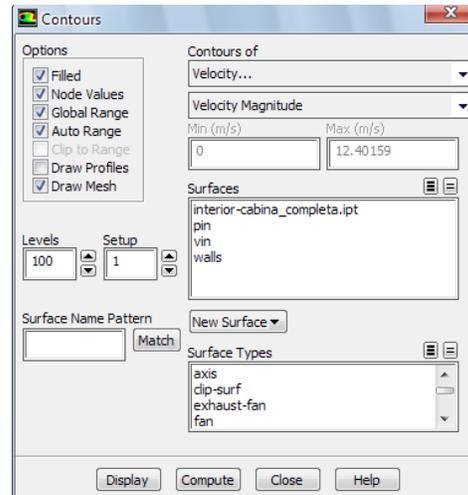
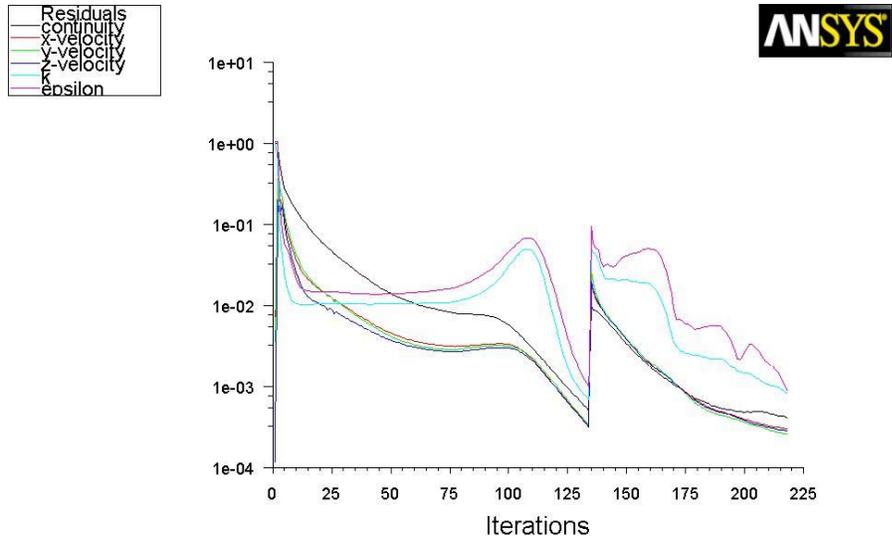


Figura 4.25 Cuadro de diálogo Contours

4.2.5.2.2 Resultados del análisis de la dinámica del fluido con Ansys Fluent

Cabina de pintura y cuarto de succión (Sistema completo) con el mueble de mayores dimensiones (2m*1m*0.6m) producido en el Centro de Producción.

- Primer caso: Malla con 7212 elementos



Scaled Residuals

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, rke)

Figura 4.26 Residuales con 7212 elementos

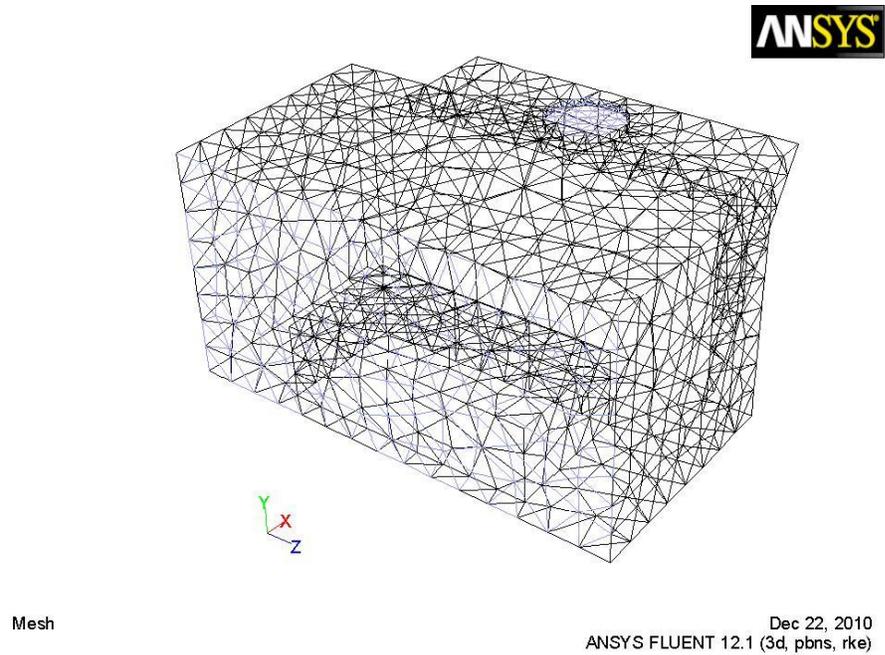
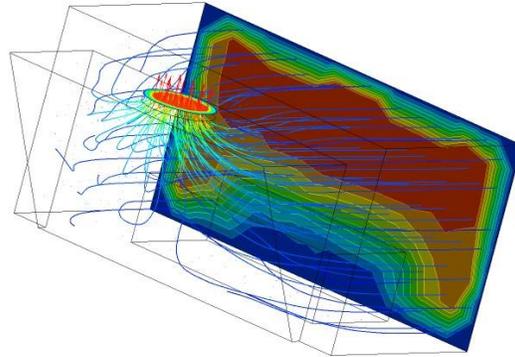


Figura 4.27 Malla de 7212 elementos

Velocity
Streamline 1
1.183e+001
8.873e+000
5.915e+000
2.958e+000
0.000e+000
[m s⁻¹]

ANSYS
v12.1



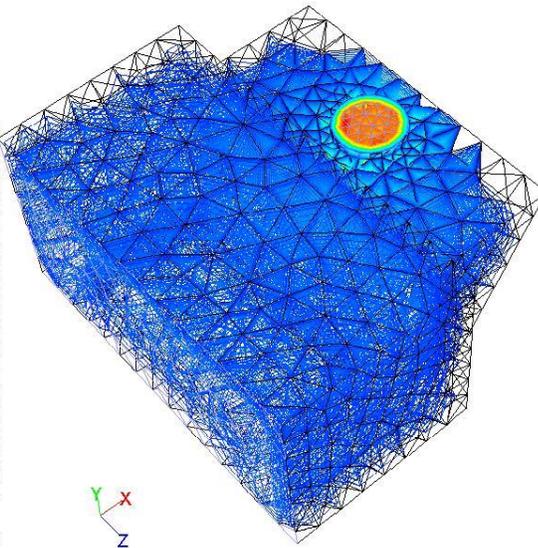
0 0.250 0.500 0.750 1.000 (m)



Figura 4.28 Recorrido de las líneas de velocidad con 7212 elementos

1.24e+01
1.19e+01
1.15e+01
1.12e+01
1.08e+01
1.04e+01
1.00e+01
9.67e+00
9.30e+00
8.93e+00
8.56e+00
8.19e+00
7.81e+00
7.44e+00
7.07e+00
6.70e+00
6.32e+00
5.95e+00
5.58e+00
5.21e+00
4.84e+00
4.46e+00
4.09e+00
3.72e+00
3.35e+00
2.98e+00
2.60e+00
2.23e+00
1.86e+00
1.49e+00
1.12e+00
7.44e-01
3.72e-01
0.00e+00

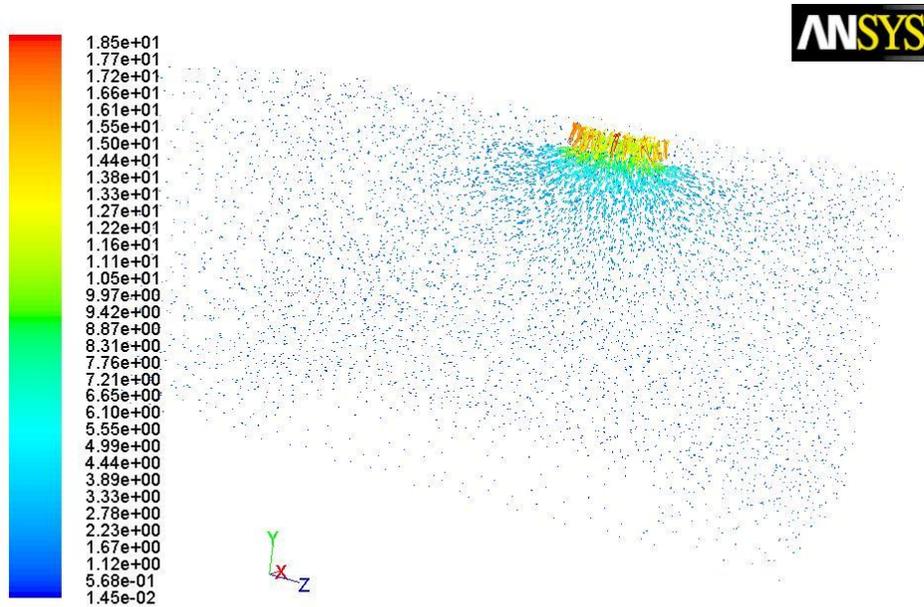
ANSYS



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, rke)

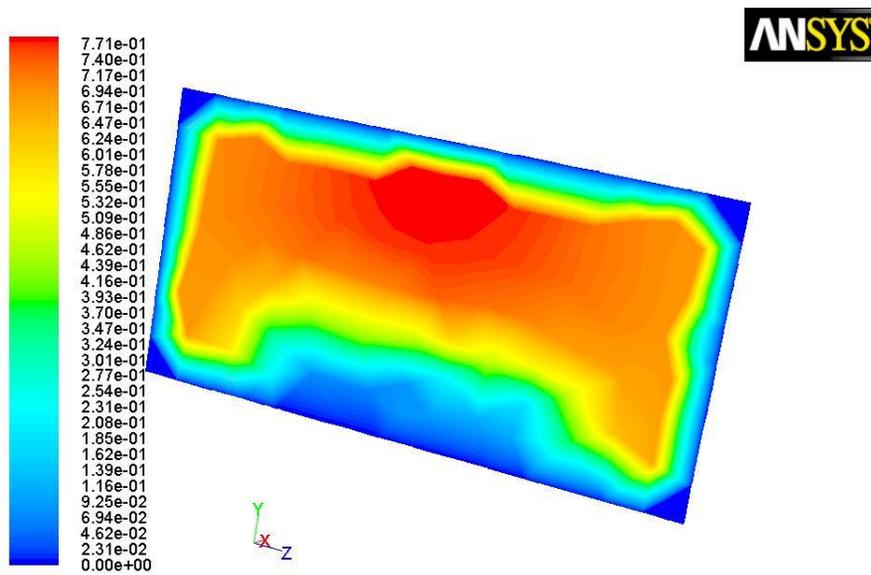
Figura 4.29 Contornos de velocidad con 7212 elementos



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, rke)

Figura 4.30 Vectores de velocidad con 7212 elementos

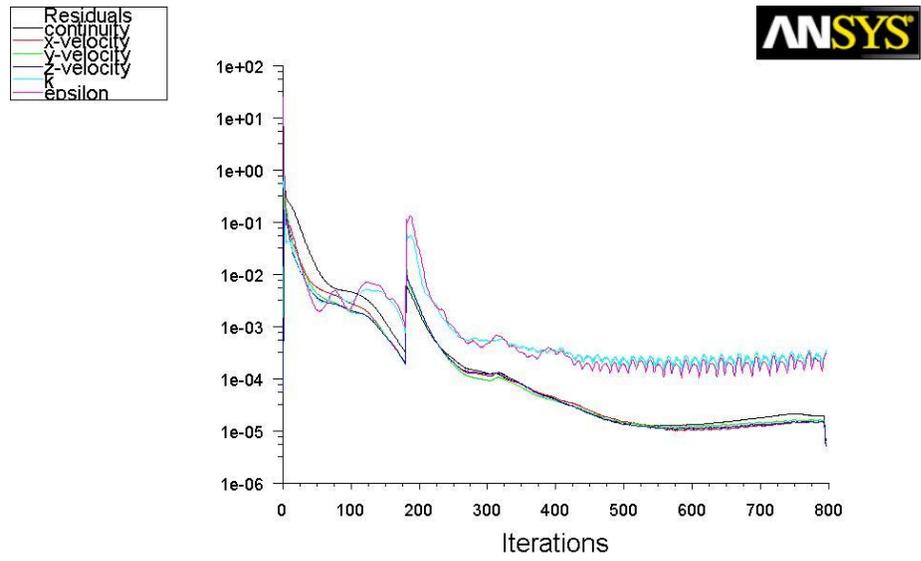


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, rke)

Figura 4.31 Contornos de velocidad en la cara frontal con 7212 elementos

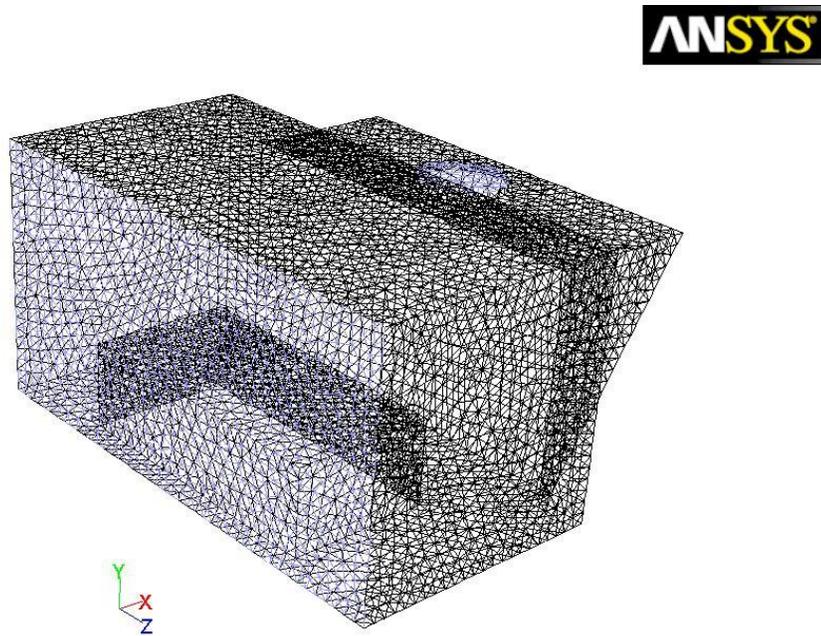
- Segundo caso: Malla con 64883 elementos



Scaled Residuals

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.32 Residuales con 64883 elementos



Mesh

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.33 Malla de 64883 elementos

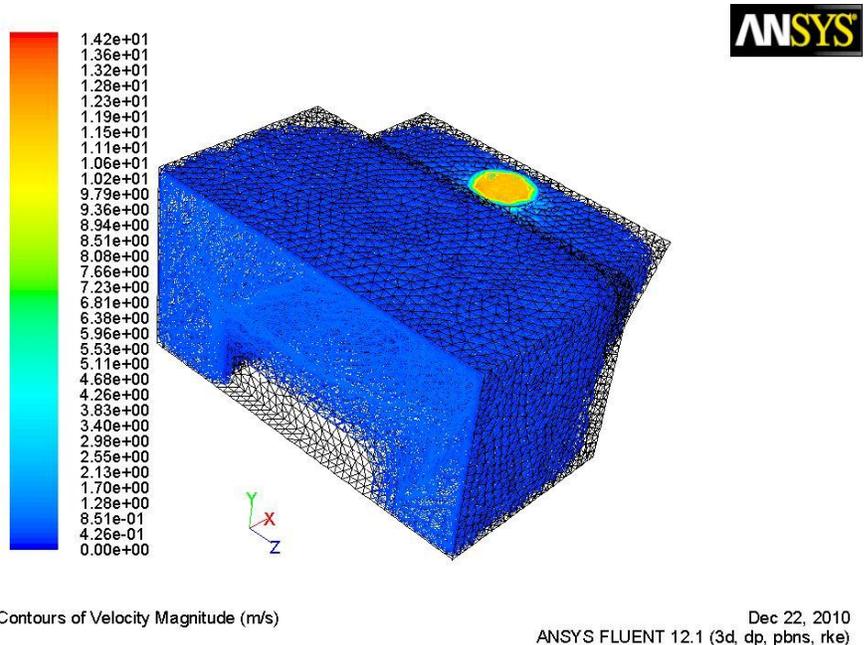


Figura 4.34 Contornos de velocidad con 64883 elementos

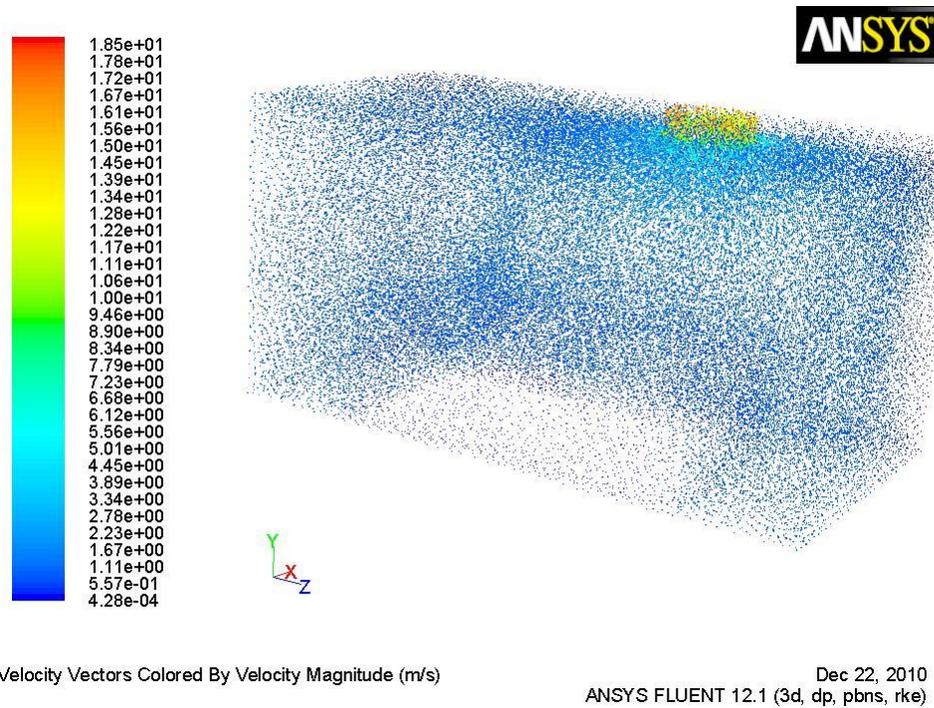


Figura 4.35 Vectores de velocidad con 64883 elementos

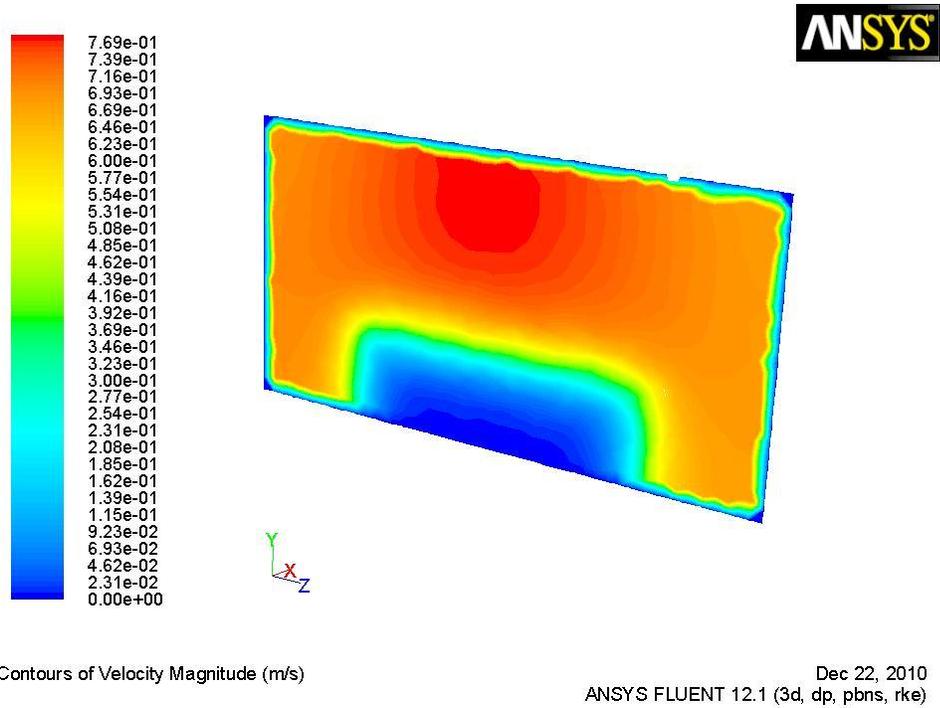


Figura 4.36 Contornos de velocidad de la cara frontal con 64883 elementos

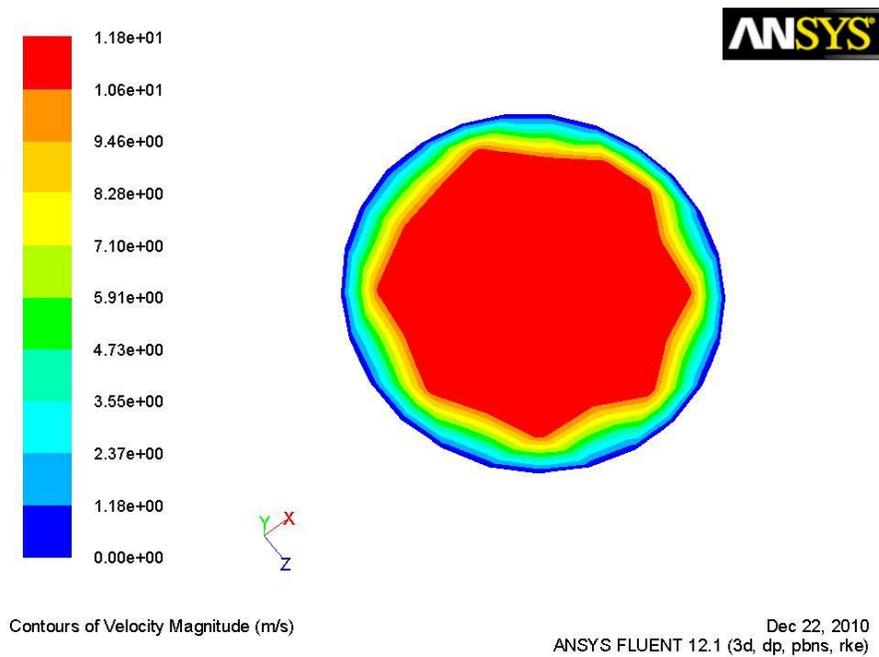
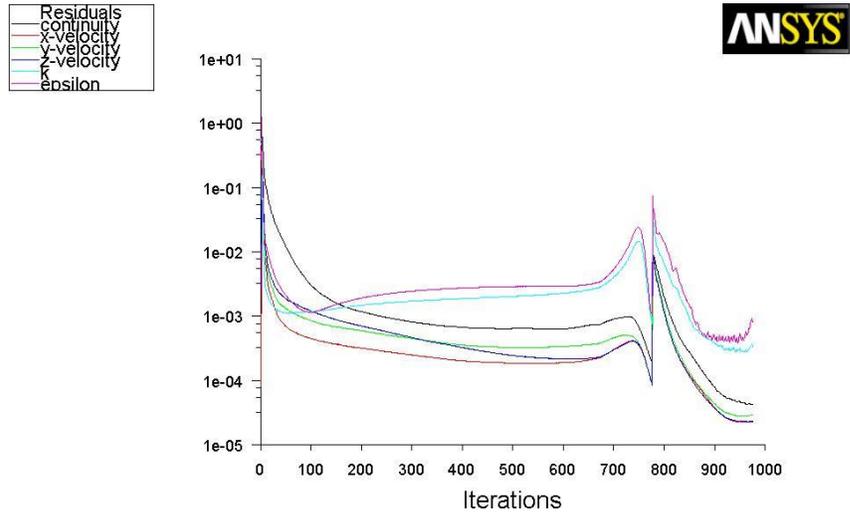


Figura 4.37 Contornos de velocidad en la boca de succión con 64883 elementos

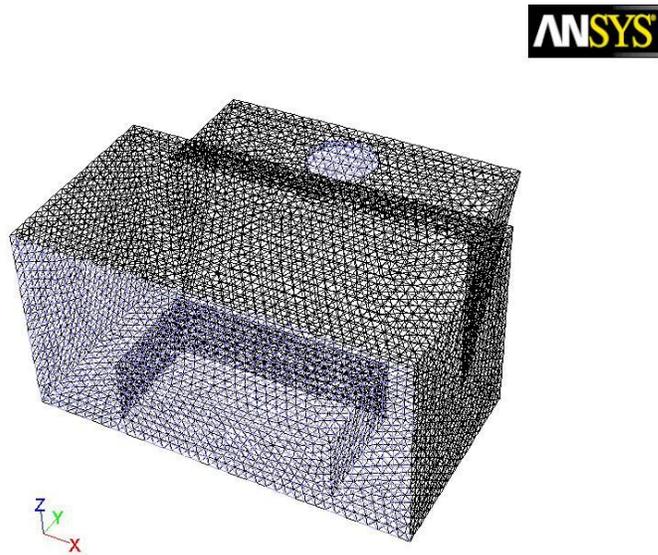
- Tercer caso: Malla con 111699 elementos (Mallado con el software GAMBIT)



Scaled Residuals

Dec 23, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

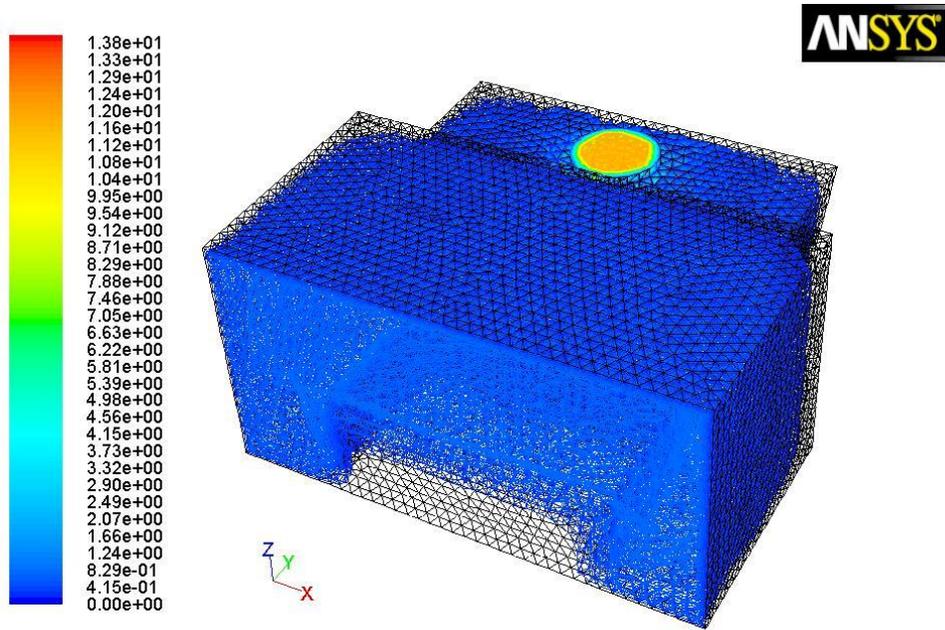
Figura 4.38 Residuales con 111699 elementos



Mesh

Dec 23, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

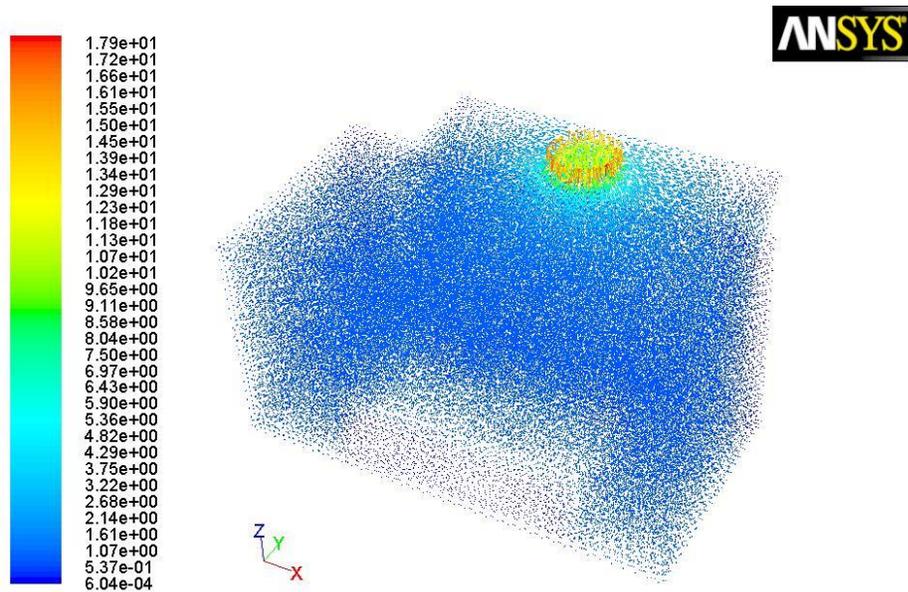
Figura 4.39 Malla de 111699 elementos



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 23, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

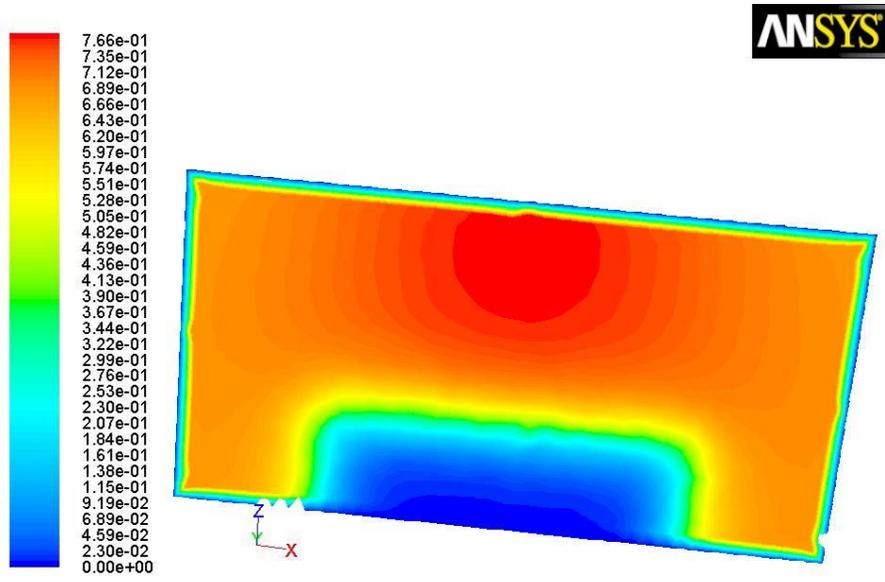
Figura 4.40 Contornos de velocidad con 111699 elementos



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 23, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.41 Vectores de velocidad con 111699 elementos

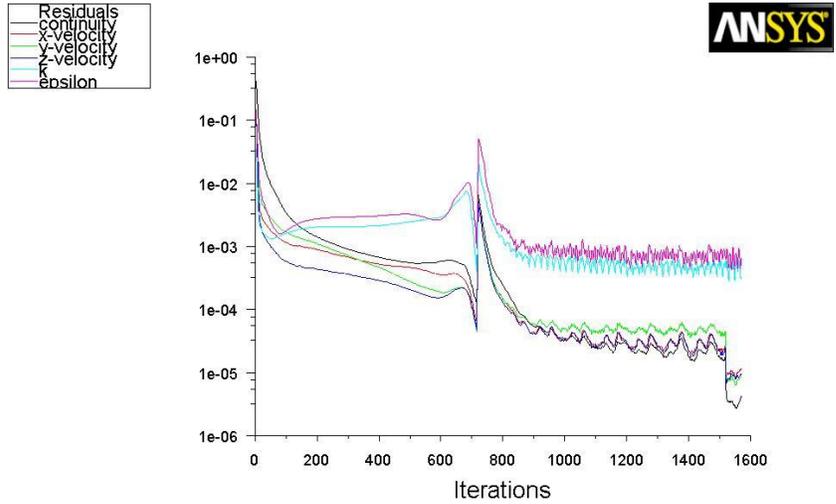


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 23, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.42 Contornos de velocidad de la cara frontal con 111699 elementos

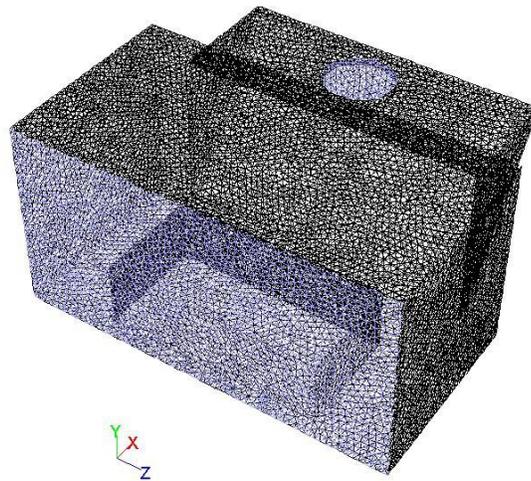
- Cuarto caso: Malla con 186550 elementos



Scaled Residuals

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

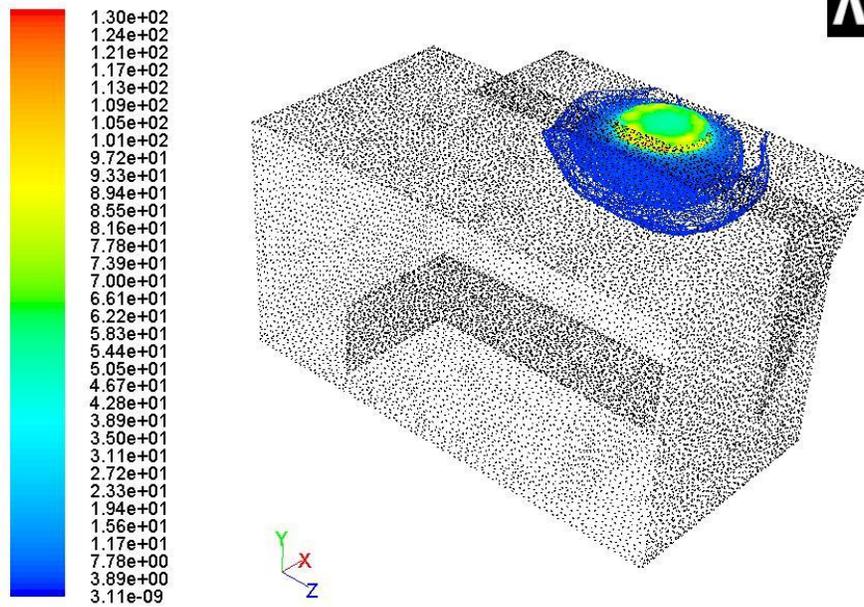
Figura 4.43 Residuales con 186550 elementos



Mesh

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

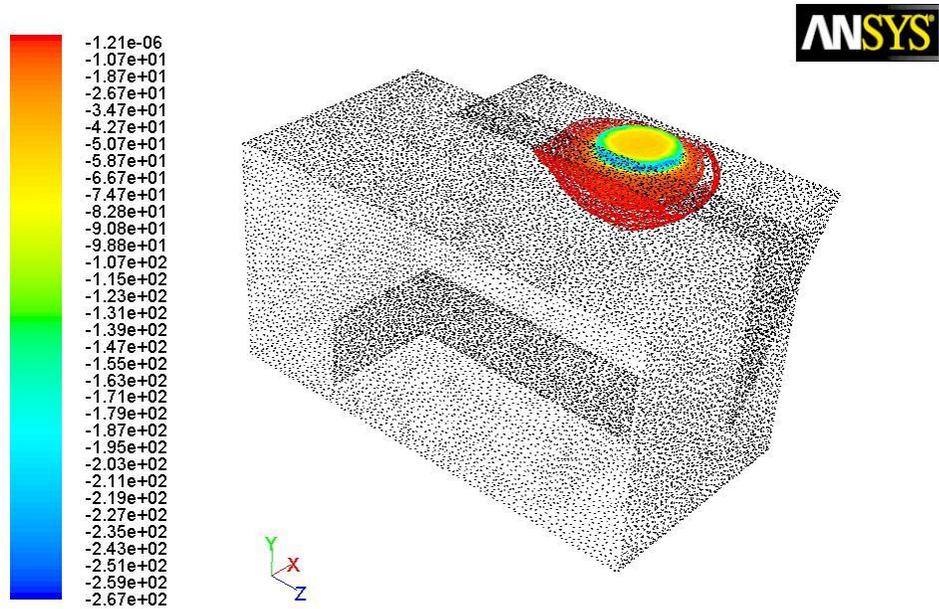
Figura 4.44 Malla de 186550 elementos



Contours of Dynamic Pressure (pascal)

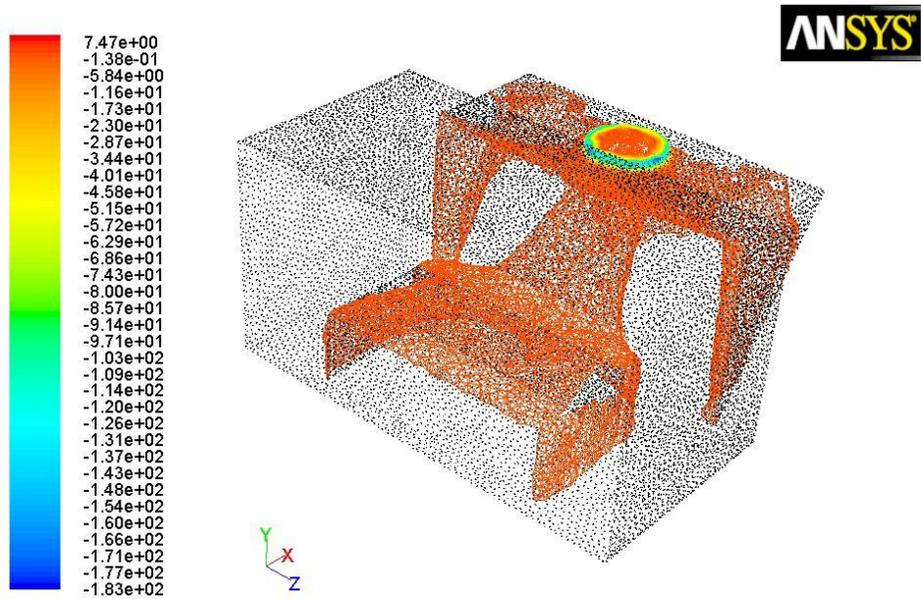
Jan 05, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.45 Contornos de presión dinámica con 186550 elementos



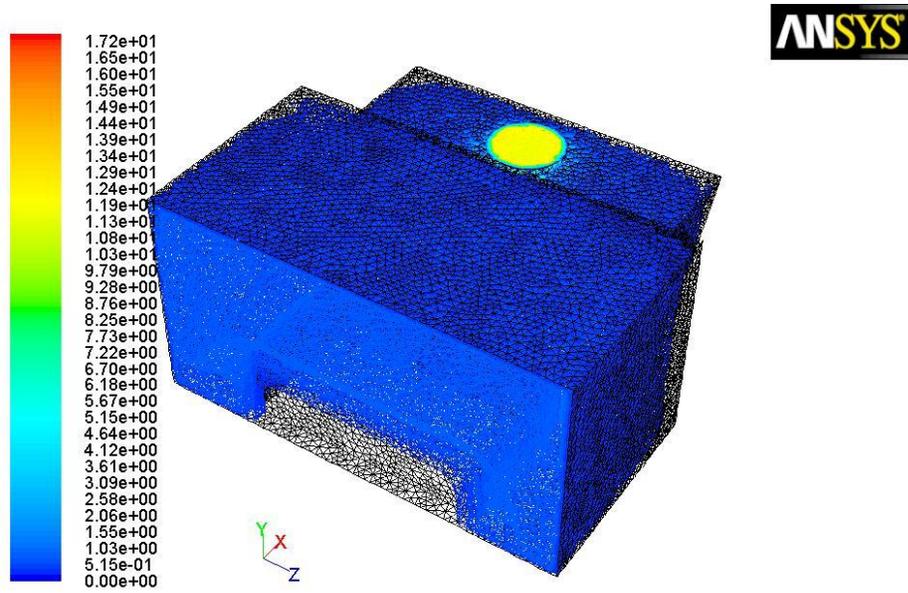
Jan 05, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.46 Contornos de presión estática con 186550 elementos



Jan 05, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

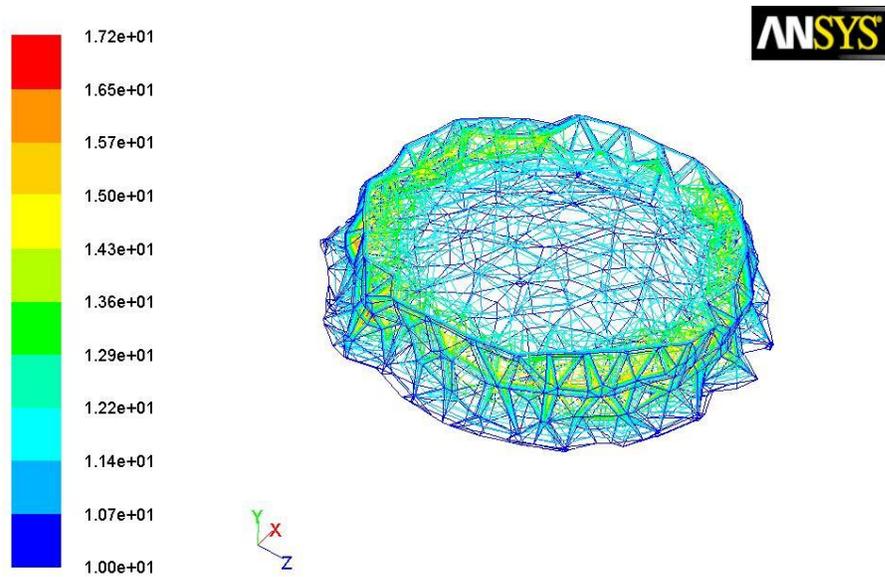
Figura 4.47 Contornos de presión total con 186550 elementos



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.48 Contornos de velocidad con 186550 elementos



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.49 Contornos de velocidad en la boca de succión con 186550 elementos (rango 1)

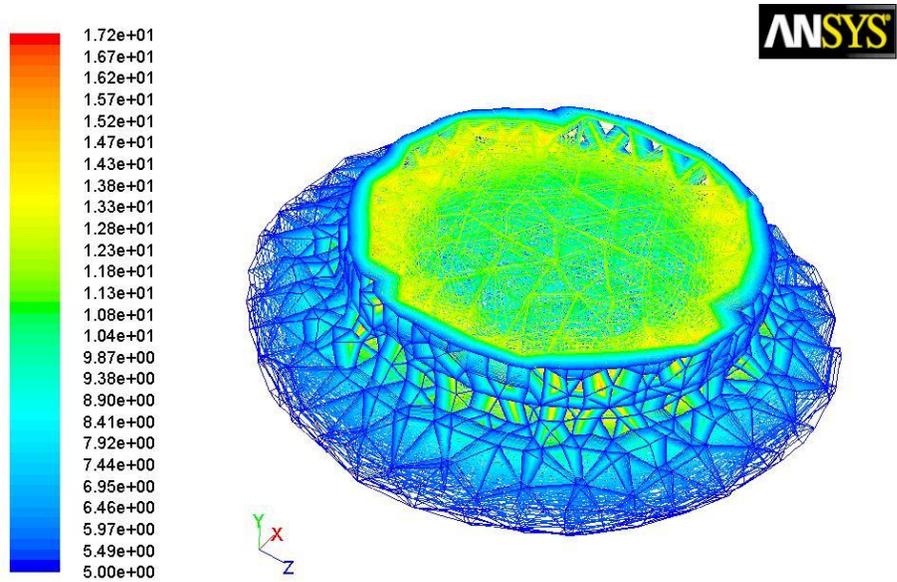


Figura 4.50 Contornos de velocidad en la boca de succión con 186550 elementos (rango 2)

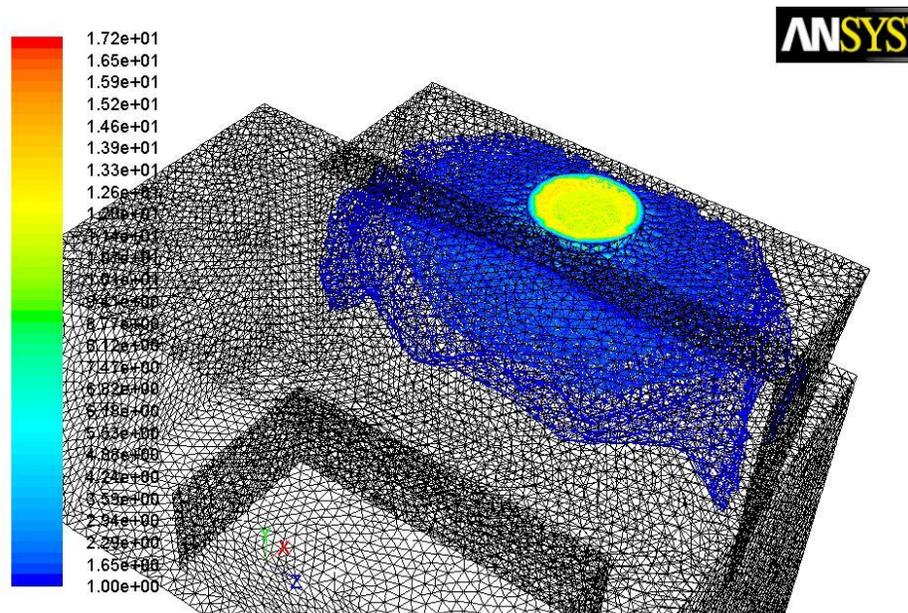
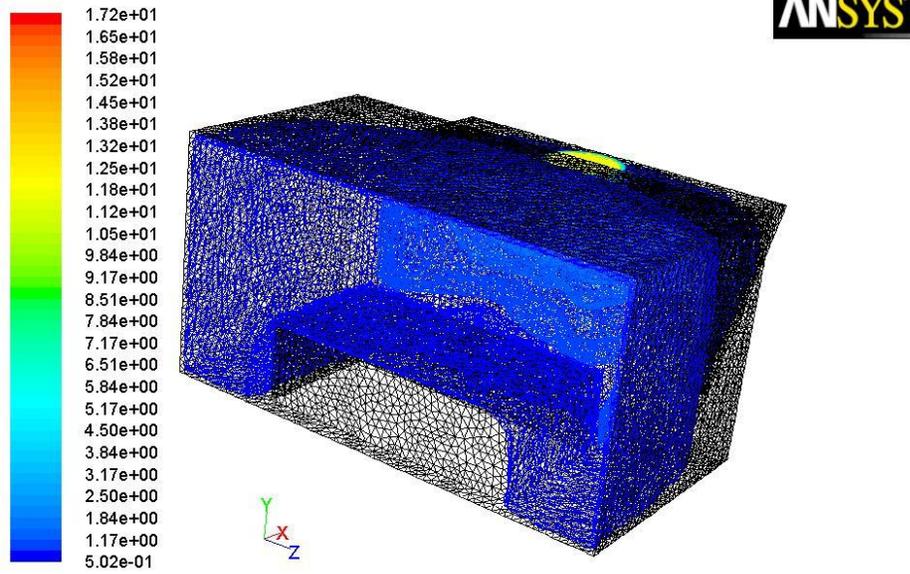


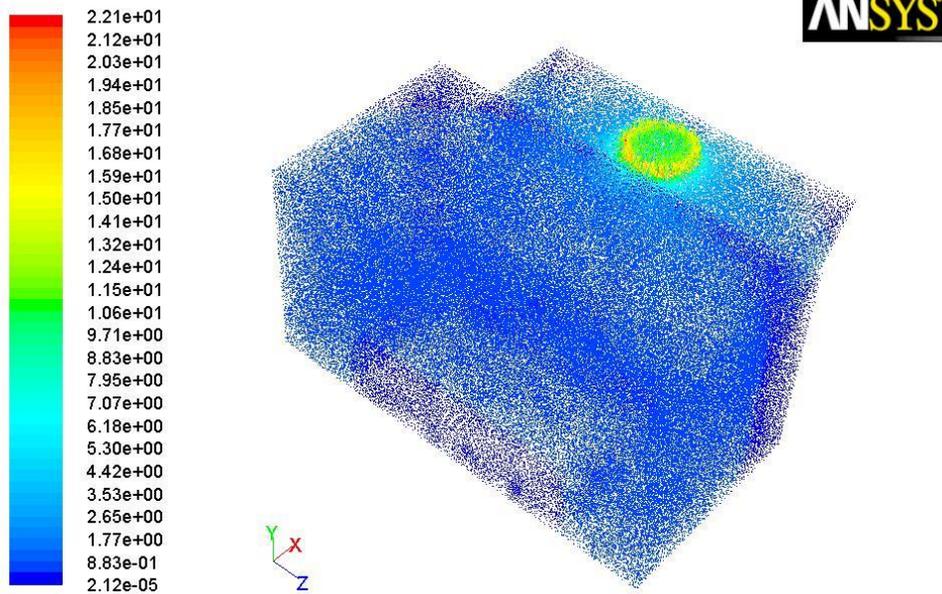
Figura 4.51 Contornos de velocidad con 186550 elementos (rango 1)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.52 Contornos de velocidad con 186550 elementos (rango 2)



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 22, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.53 Vectores de velocidad con 186550 elementos

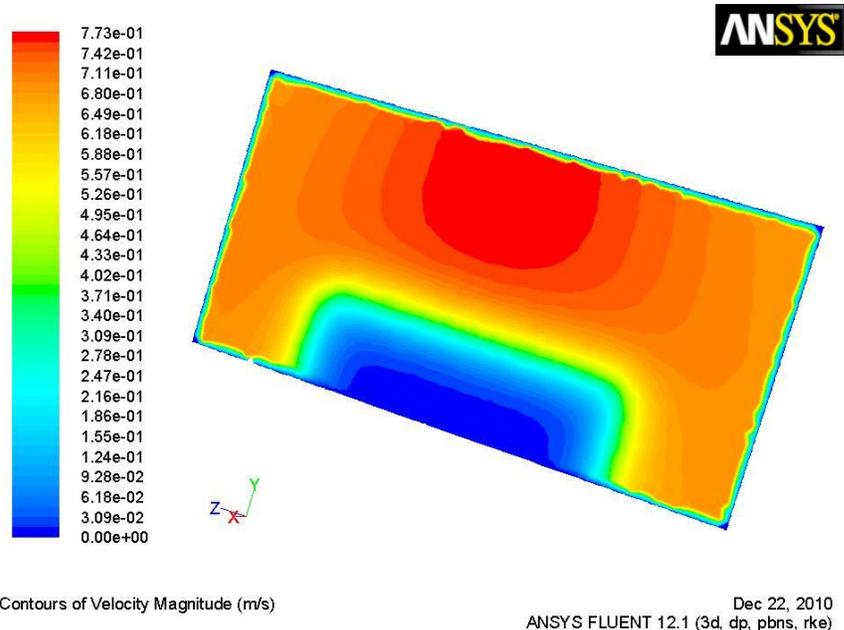


Figura 4.54 Contornos de velocidad en la cara frontal con 186550 elementos

- Quinto caso: Malla con 249004 elementos

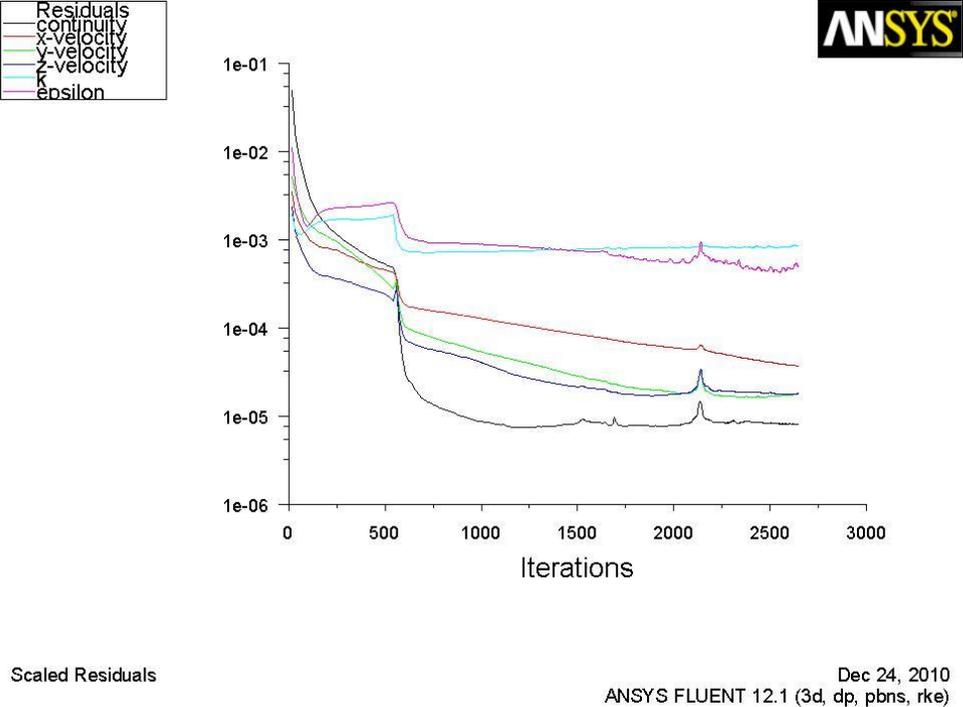
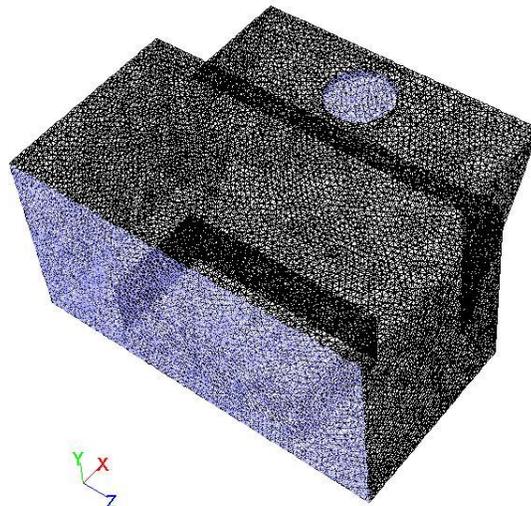


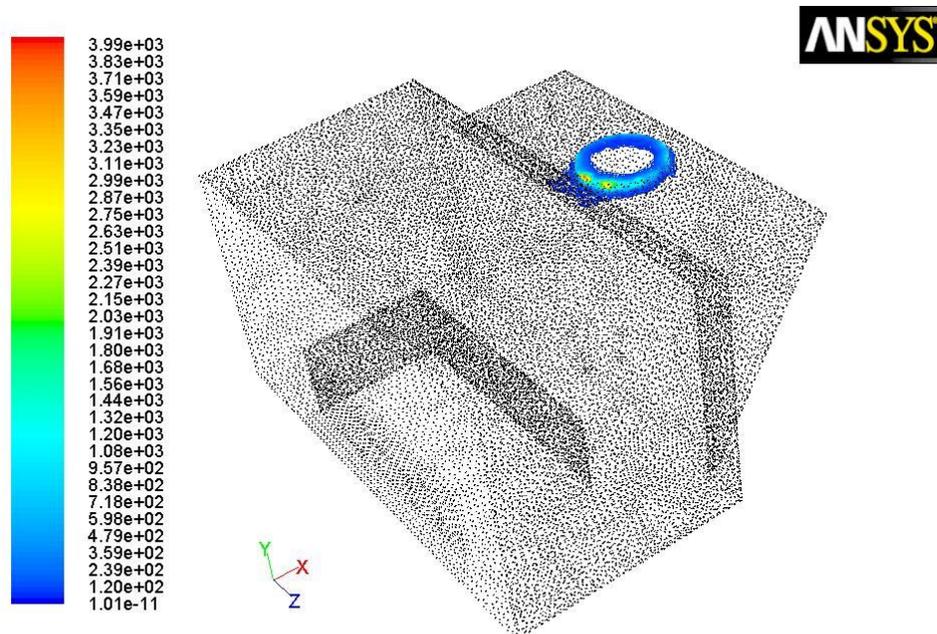
Figura 4.55 Residuales con 249004 elementos



Mesh

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.56 Malla de 249004 elementos



Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3)

Jan 04, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.57 Contornos de razón de disipación de turbulencia con 249004 elementos

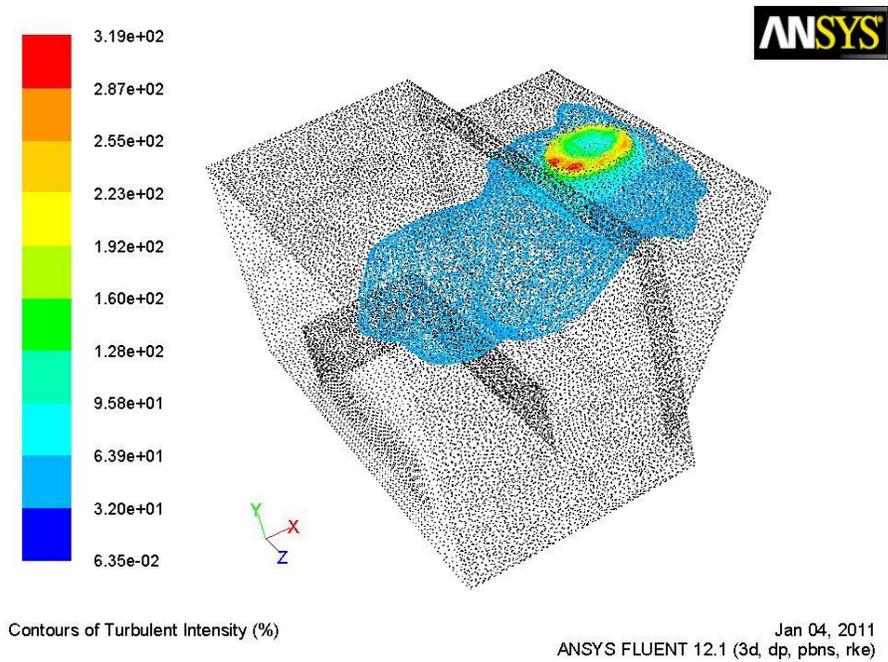


Figura 4.58 Contornos de intensidad de turbulencia con 249004 elementos

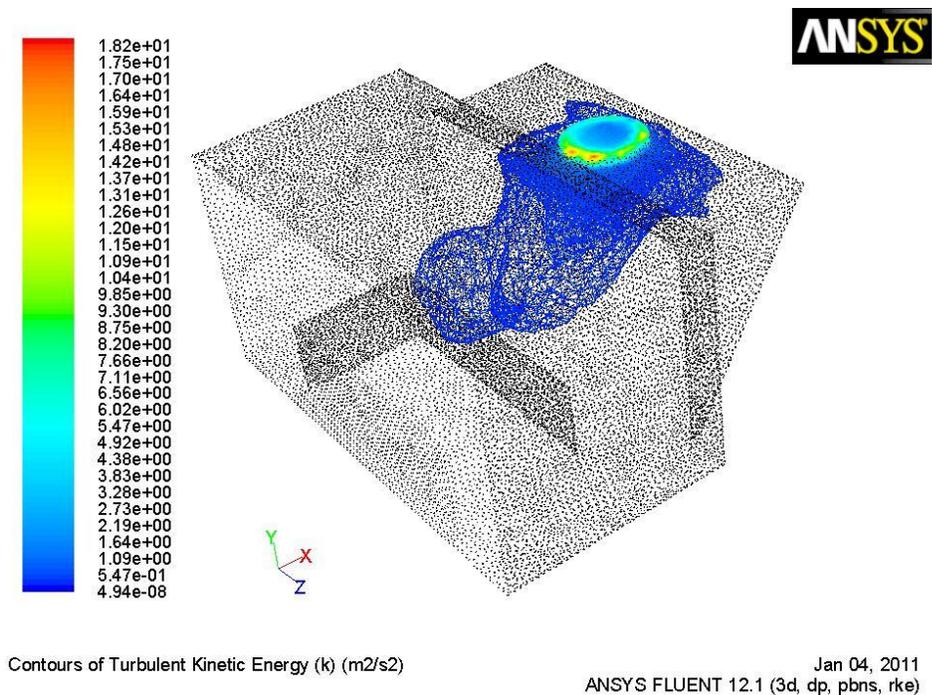
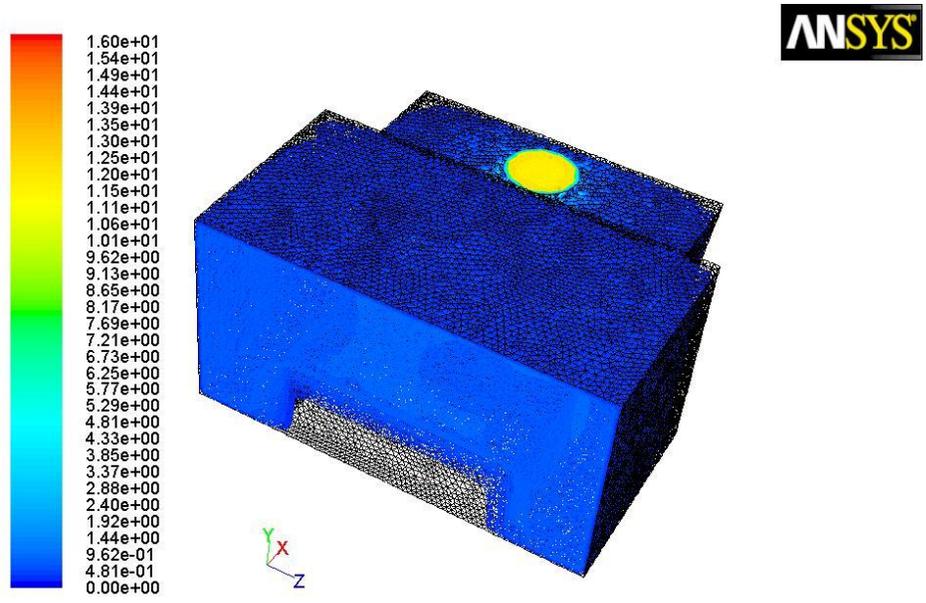


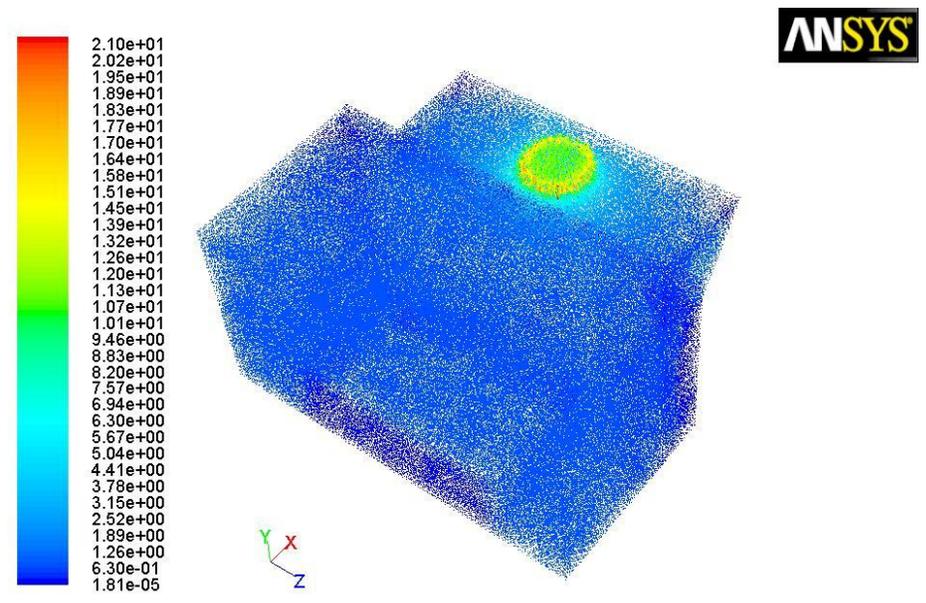
Figura 4.59 Contornos de energía cinética de la turbulencia con 249004 elementos



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

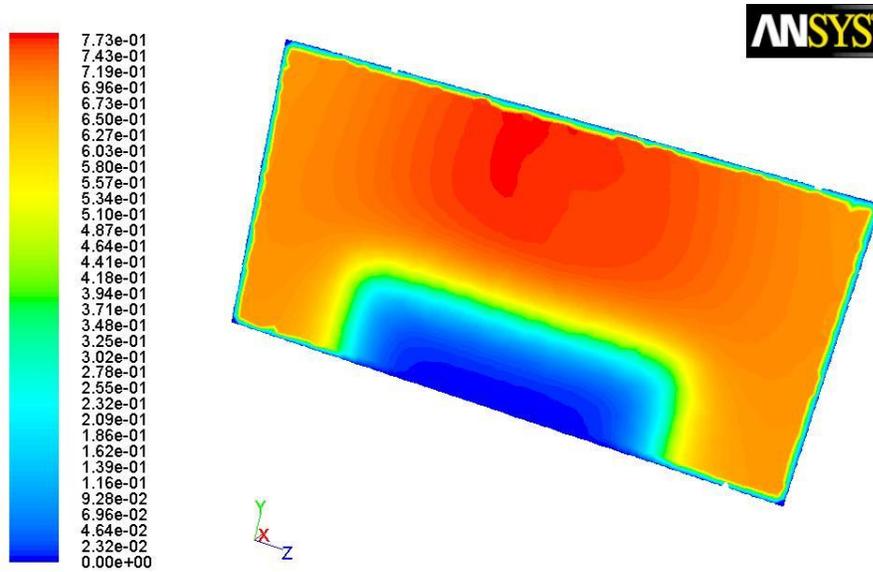
Figura 4.60 Contornos de velocidad con 249004 elementos



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.61 Vectores de velocidad con 249004 elementos

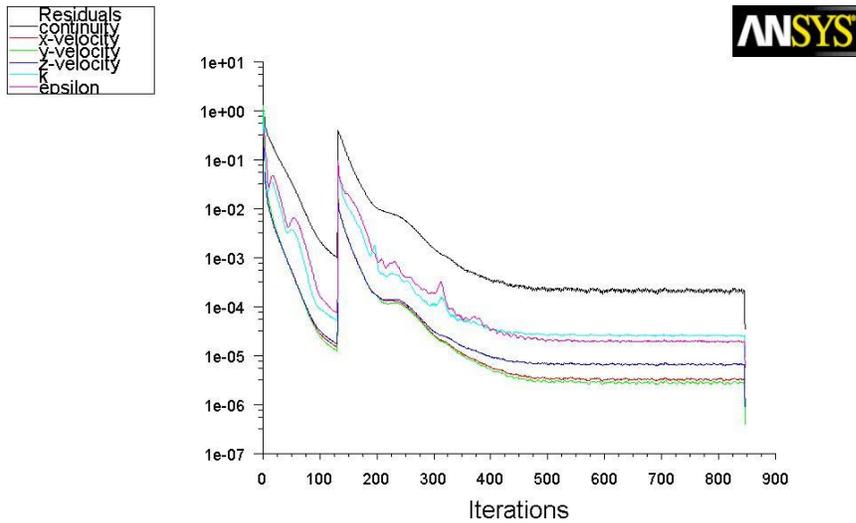


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 24, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.62 Contornos de velocidad en la cara frontal con 249004 elementos

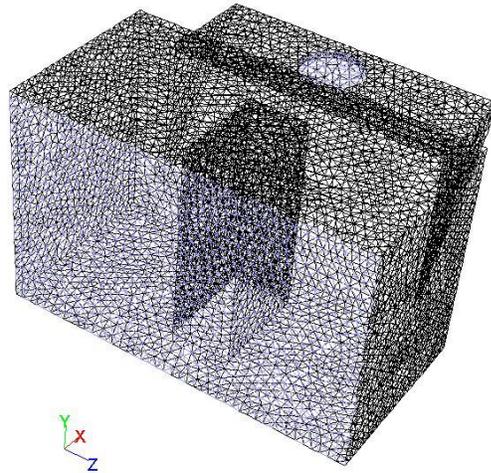
- Sexto caso: Gráficas de la influencia en el cambio de posición del armario grande analizado anteriormente



Scaled Residuals

Feb 03, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

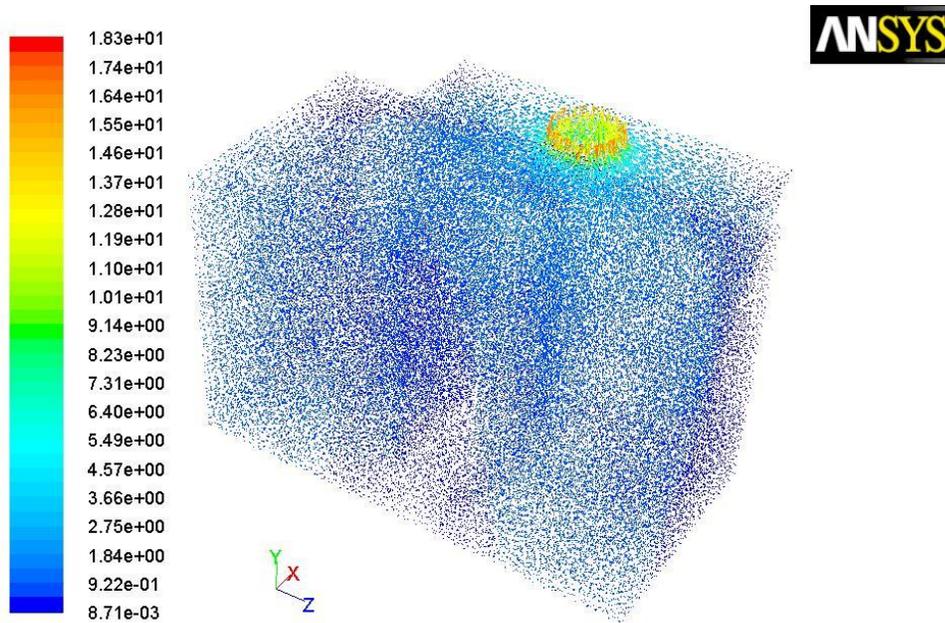
Figura 4.63 Residuales con cambio de posición del mueble



Mesh

Feb 03, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.64 Malla de cambio de posición del mueble



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Feb 03, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.65 Vectores de velocidad con cambio de posición del mueble

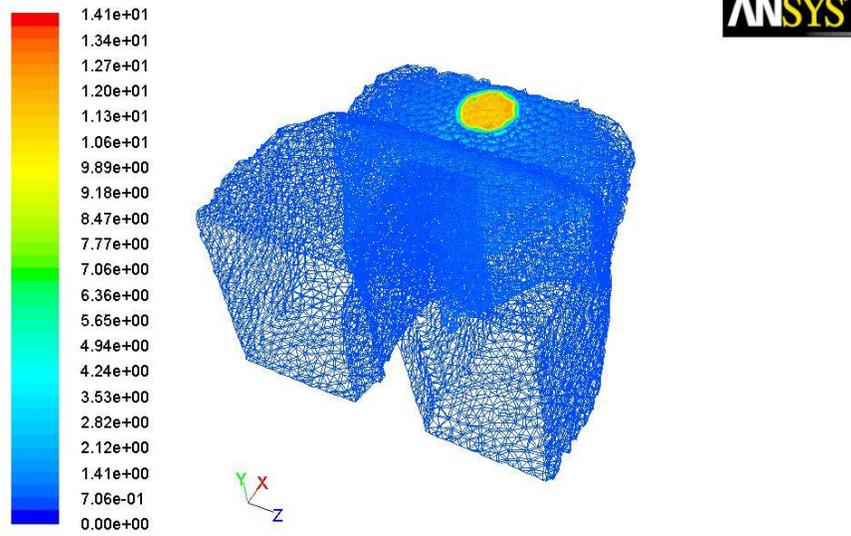


Figura 4.66 Contornos de velocidad con cambio de posición del mueble

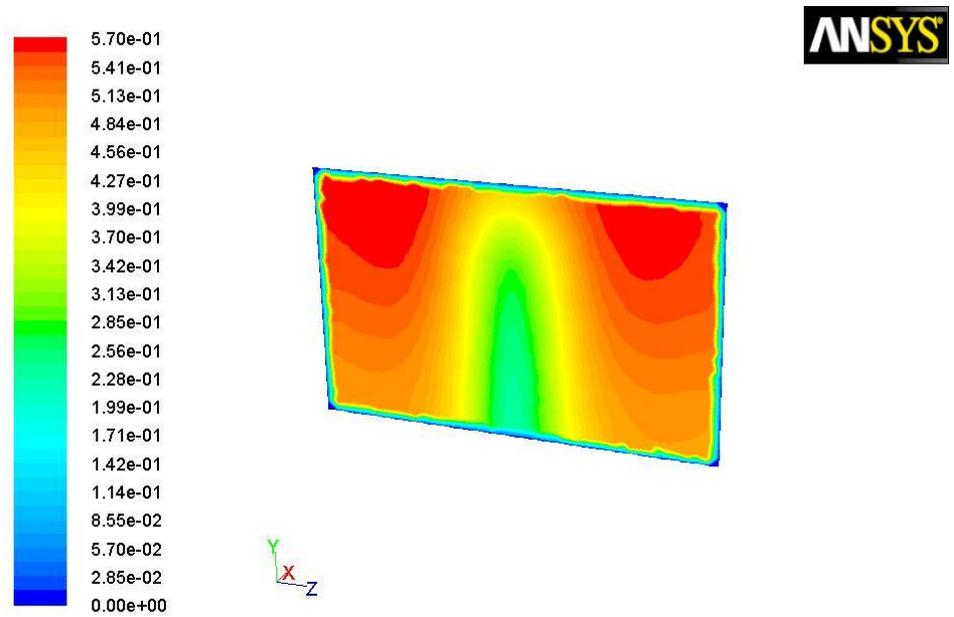
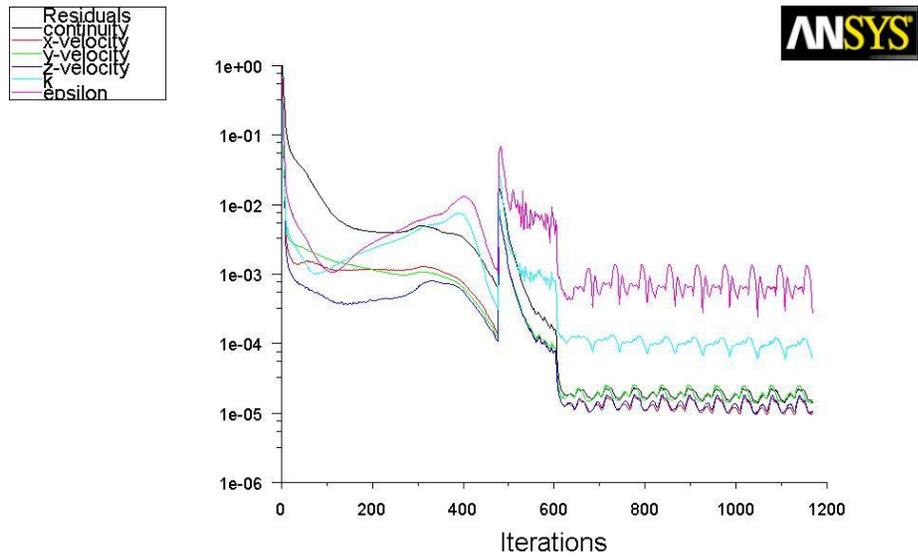


Figura 4.67 Contornos de velocidad en la cara frontal con cambio de posición del mueble

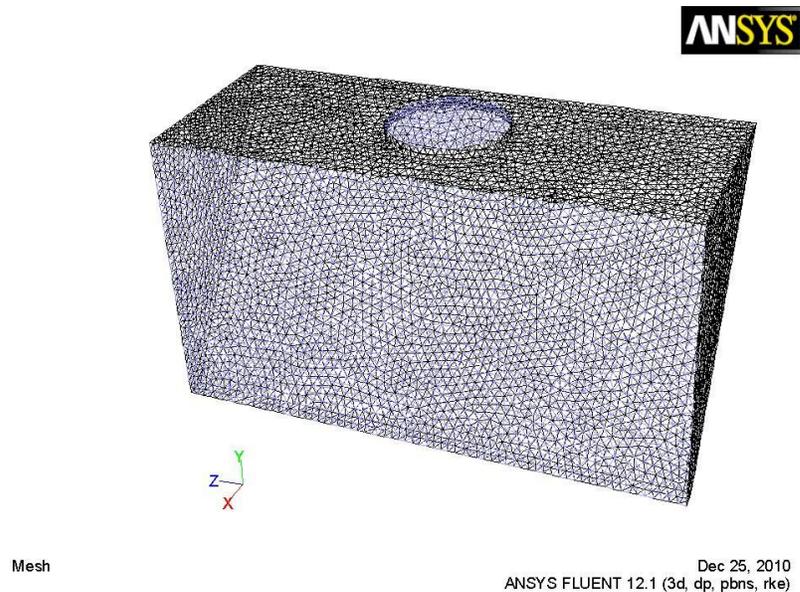
- Séptimo caso: Cuarto de succión con Malla con 92979 elementos



Scaled Residuals

Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

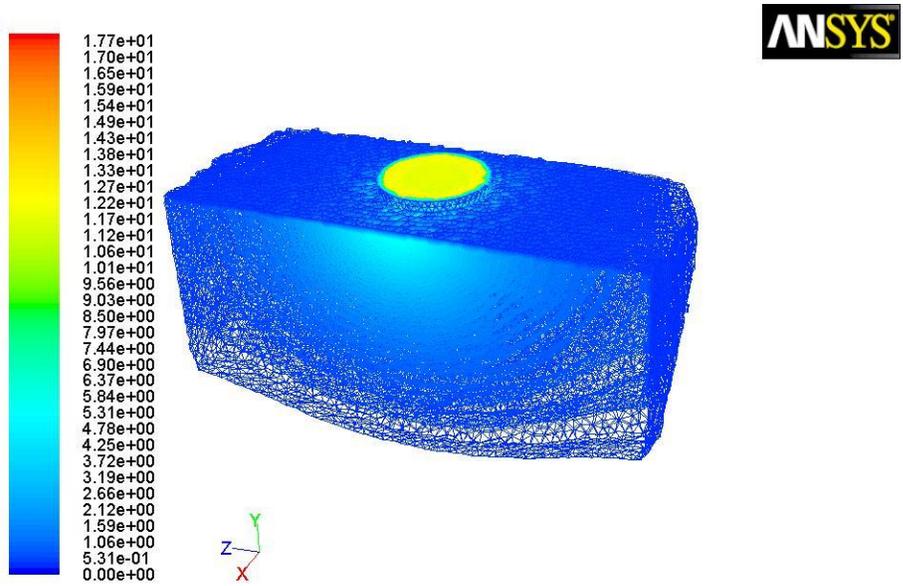
Figura 4.68 Residuales del análisis del cuarto de succión



Mesh

Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

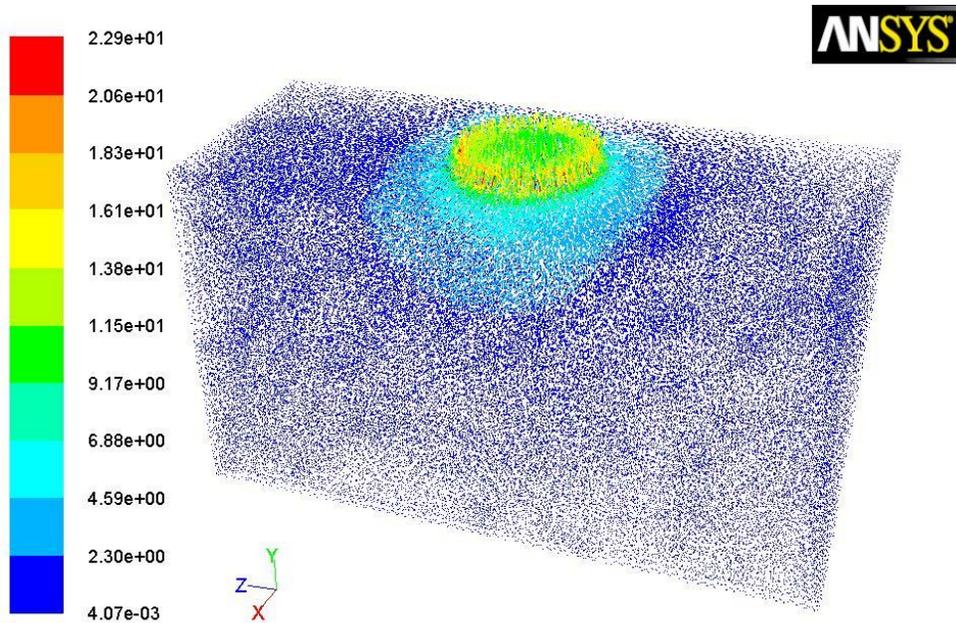
Figura 4.69 Malla del análisis del cuarto de succión



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.70 Contornos de velocidad del análisis del cuarto de succión



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Dec 25, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.71 Vectores de velocidad del análisis del cuarto de succión

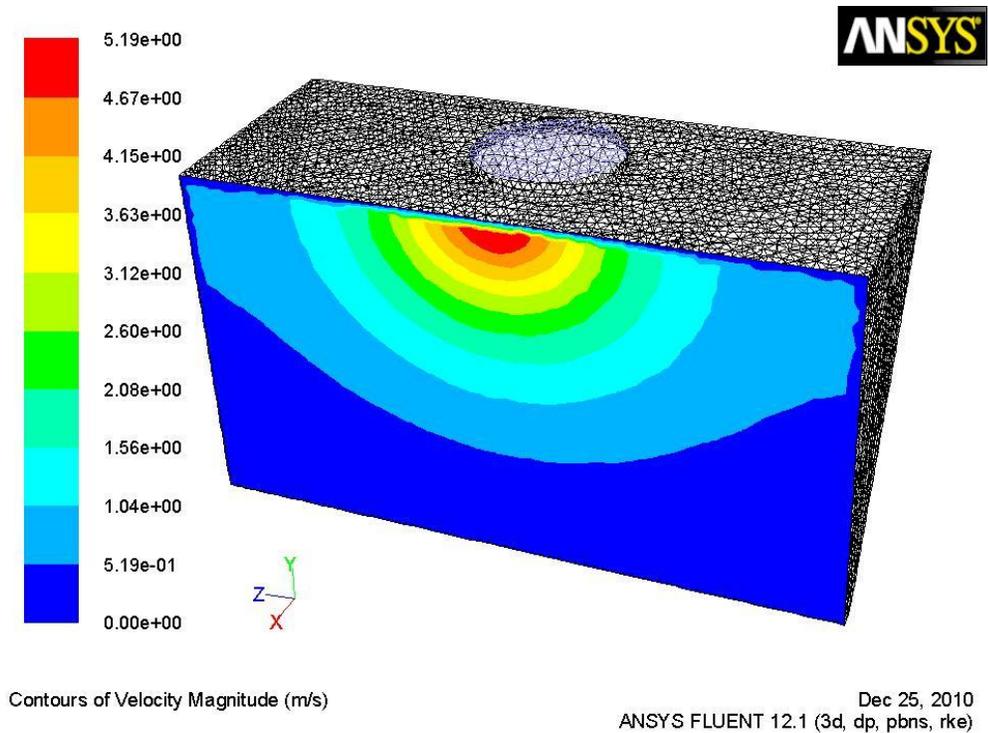


Figura 4.72 Contornos de velocidad en el panel de filtros del análisis del cuarto de succión

4.2.5.2.3 Análisis del flujo de partículas de pintura en polvo

El análisis de flujo de partículas es altamente complejo ya que se trata de un proceso manual, además existe la fuerza de atracción electromagnética que tienen las partículas por lo que su movimiento es muy difícil de predecir, por lo que este análisis se centrará en algunas posiciones posibles para realizar el proceso de pintado y de esta manera observar el comportamiento del mismo y además cómo se comporta el sistema de extracción.

Las características de la pintura electrostática⁴⁸ son las siguientes:

Densidad: 1,3-1,8 g/cm³

Diámetro de la partícula: 10-300 μm

⁴⁸ Hojas Técnicas, Pinturas en polvo, WESCO S.A.

Espesor de película: para uso normal 2 a 4 mils (50 –100 micrones) Para exposición a condiciones severas son factibles espesores de película de 5-6 mils (125-150 micrones)

Cubrimiento teórico: (aplicación 100%) 12,5 m²/kg a 50 micrones de espesor con gravedad específica de 1,6

Granulometría: 98% menor de 90 micrones.

Almacenamiento: 12 meses a 25 °C y de 50% humedad relativa.

Proceso de solución con parámetros de simulación en Ansys Fluent 12.1 basados en los tutoriales de Solver settings del software.

Cálculo de la trayectoria de las partículas de polvo⁴⁹

1. Pestaña General

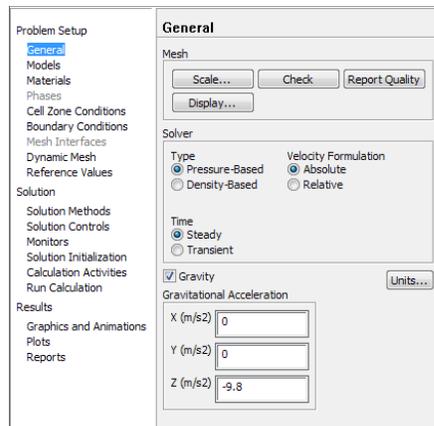


Figura 4.73 Cuadro de diálogo General

- Se escoge el Pressure-Based solver que es aplicable para un amplio rango de regímenes de flujo, desde fluidos incompresibles de baja velocidad a fluido compresibles de alta velocidad. Este solucionador

⁴⁹ Cyclone Fluent tutorial de Gabriel Węcel (30th March 2009)

requiere menos memoria que el Density-Based solver y permite flexibilidad en el procedimiento de solución.

- Es un flujo estable (Steady) ya que no varía con el tiempo.
- Se utiliza una gravedad de 9.8m/s^2

2. Pestaña Models

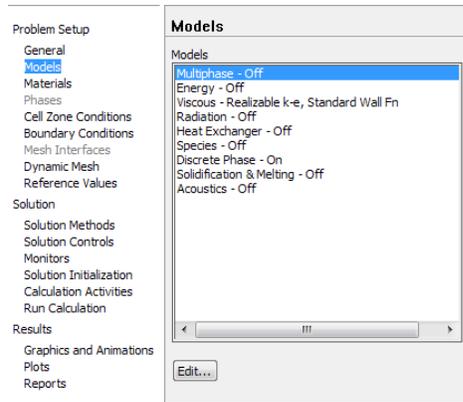


Figura 4.74 Cuadro de diálogo Models

- Se escoge un modelo viscoso turbulento k-e, que es un modelo muy aceptable y sencillo para analizar el flujo de salida de la pistola de pintura electrostática.

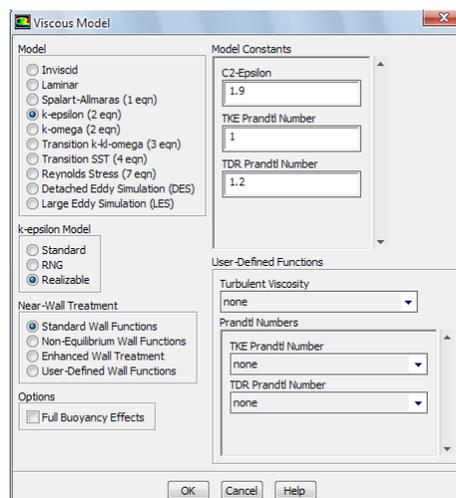


Figura 4.75 Cuadro de diálogo Viscous Model

- En el modelo Discrete Phase se debe crear un ingreso de las partículas de polvo (injection). Utilizo tipo de partícula inerte, una distribución de diámetros logarítmica, material ash (arsenic-hydride) utilizado para partículas pequeñas como polvo, el flujo másico medido en el centro de producción es de 0.000945kg/s (calibración utilizada por el operador), el catálogo de pintura da un rango de diámetros que va desde 1 a 300 micras como se ven los datos ingresados en la ventana.

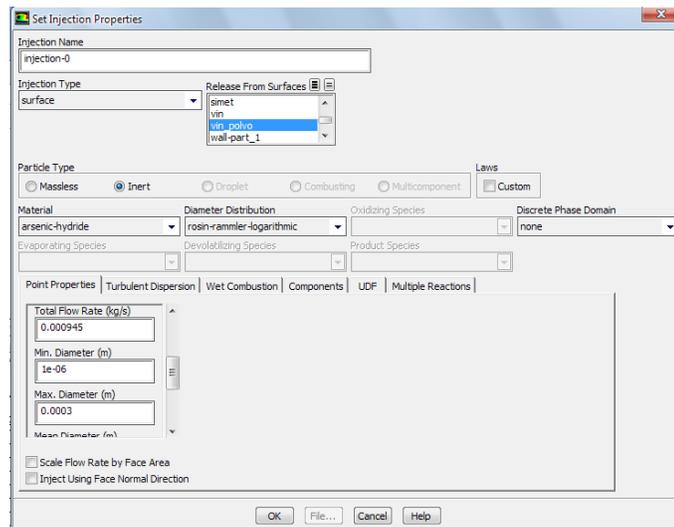


Figura 4.76 Cuadro de diálogo Set Injection Properties

3. Pestaña Materials

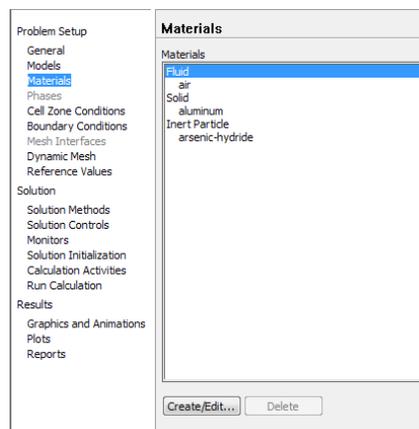


Figura 4.77 Cuadro de diálogo Material

- Defino las propiedades del aire a las condiciones de la ciudad de Latacunga (densidad y viscosidad)

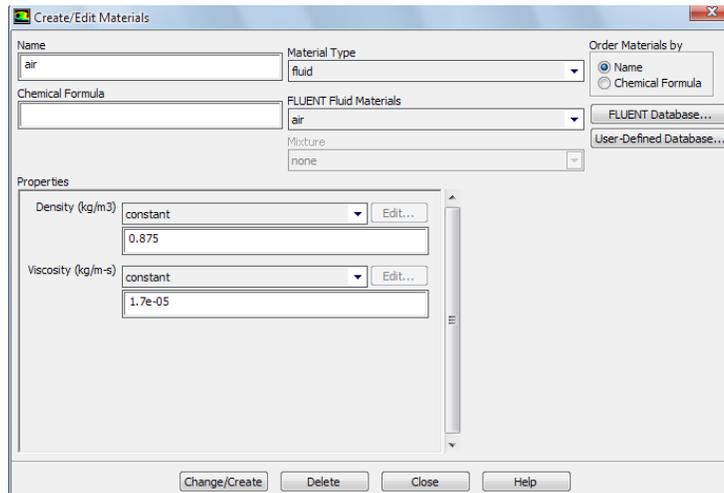


Figura 4.78 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials (aire)

Defino las propiedades de las partículas de pintura según la información del catálogo. En el rango de densidad de 1000 a 2000 kg/m^3 , escojo 1800 kg/m^3 para el cálculo.

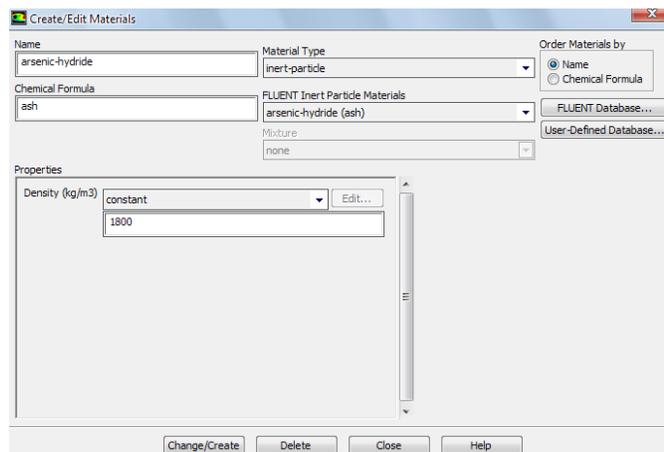


Figura 4.79 Cuadro de diálogo Create/Edit Materials (polvo)

4. Pestaña Cell Zone Conditions

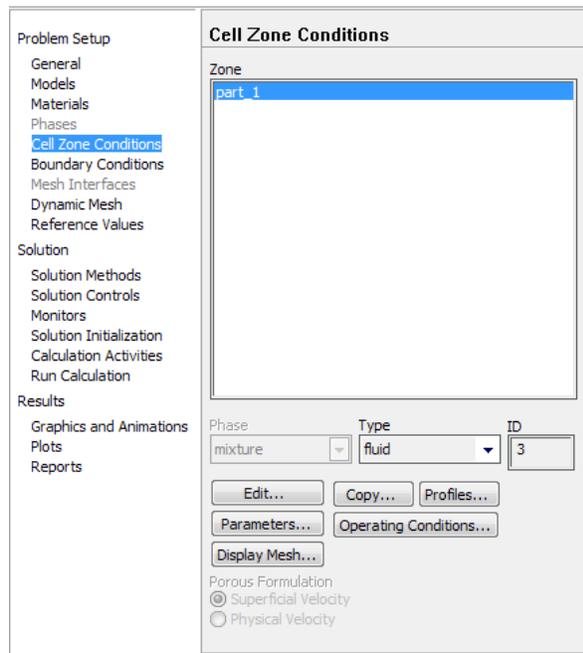


Figura 4.80 Cuadro de diálogo Cell Zone Conditions

- Defino las condiciones de operación de la ciudad de Latacunga en la ventana Operating Conditions.

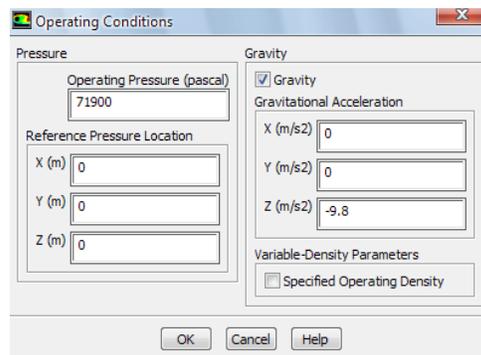


Figura 4.81 Cuadro de diálogo Operating Conditions

5. Pestaña Boundary Conditions

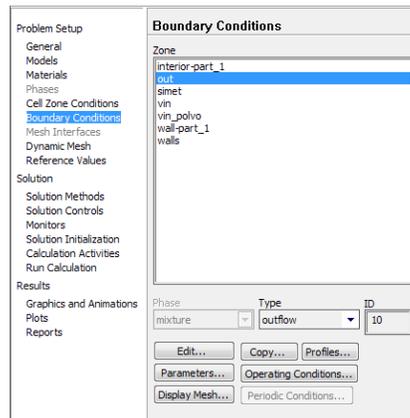


Figura 4.82 Cuadro de diálogo Boundary Conditions

- Defino las características de la frontera vin con una velocidad de 0.58m/s (calculada previamente en el análisis anterior como la velocidad de cara promedio). Intensidad de turbulencia default y diámetro hidráulico de la cara de entrada de la cabina.

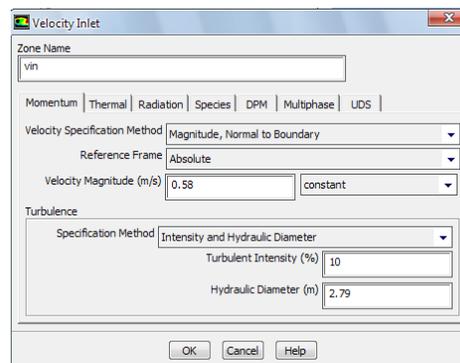


Figura 4.83 Cuadro de diálogo Velocity Inlet (cara frontal)

- Defino las características de la frontera vin polvo donde la velocidad de salida de la pistola es de 13.96m/s (calculado con un caudal de aire utilizado aproximadamente ya que depende de la regulación del equipo). Diámetro de la boquilla 10mm.

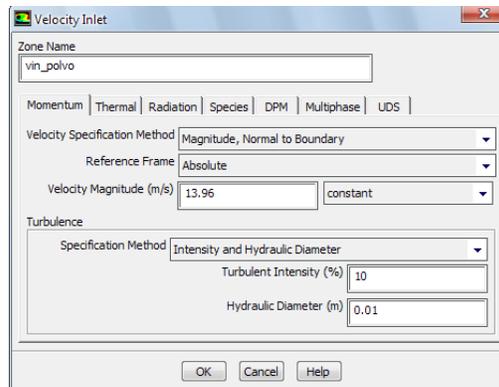


Figura 4.84 Cuadro de diálogo Velocity Inlet (pistola)

- Establezco en la frontera walls que las partículas terminen su trayectoria y sean atrapadas (trap) al topar el mueble a pintar, para realizar el conteo resumen del rastreo de partículas.

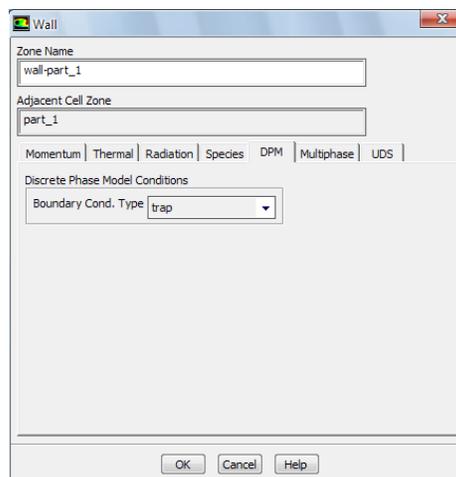


Figura 4.85 Cuadro de diálogo Wall

6. Pestaña Solution Methods

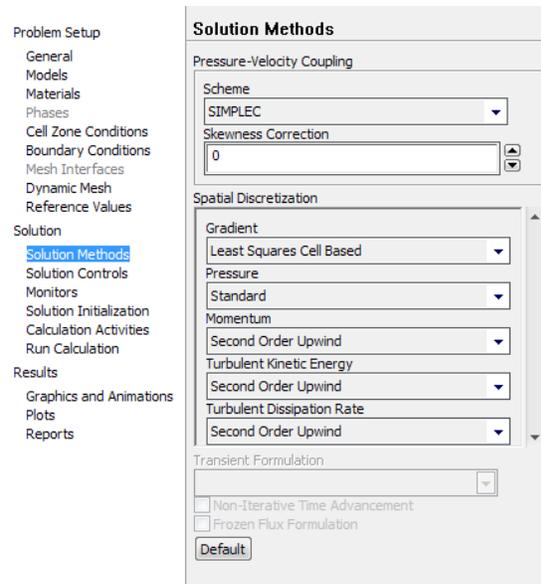


Figura 4.86 Cuadro de diálogo Solution Methods

- Escojo de las 4 opciones el algoritmo (Scheme) SIMPLEC que ayuda a conseguir una rápida convergencia.
- Escojo el Gradiente Least Square Cell Based que es el default y que es recomendado para mallas con elementos tipo poliedros y que tiene una alta precisión.
- Escojo para la ecuación de Momentum: Second Order Upwind como recomendación del programa para poder tener una solución con una precisión adecuada.
- Para el cálculo de turbulencia escojo igualmente Second Order Upwind.

7. Pestaña Solution Controls

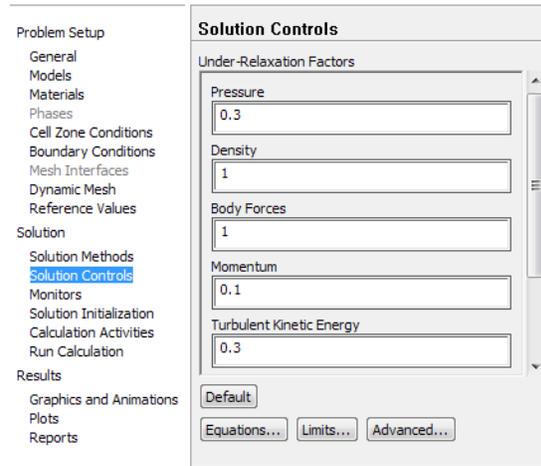


Figura 4.87 Cuadro de diálogo Solution Controls

- Todos los factores quedan con valor default (Under-relaxation factors) y después de que llegan los residuales hasta 10^{-3} , se disminuyen para hallar una convergencia menor (como se muestra en la captura).

8. Pestaña Monitors

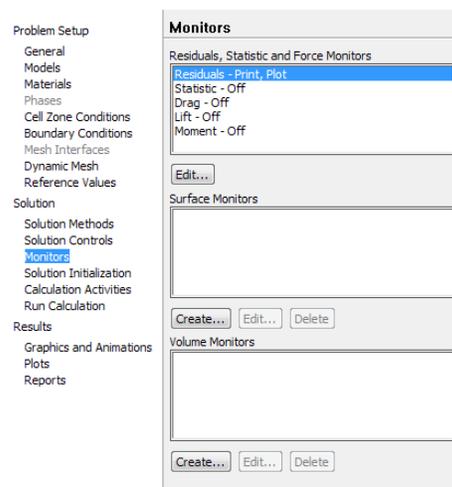


Figura 4.88 Cuadro de diálogo Monitors

- Se deja la convergencia menor de 0.001 para todos los parámetros y después de disminuir los factores de momento y turbulencia se disminuye la convergencia hasta aproximadamente 10^{-6} , dependiendo el caso.

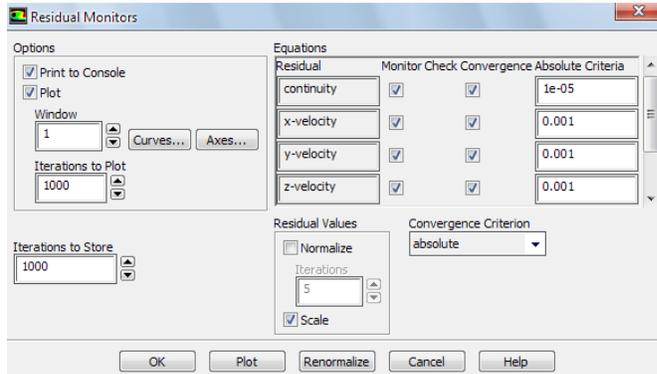


Figura 4.89 Cuadro de diálogo Residual Monitors

9. Pestaña Solution Initialization

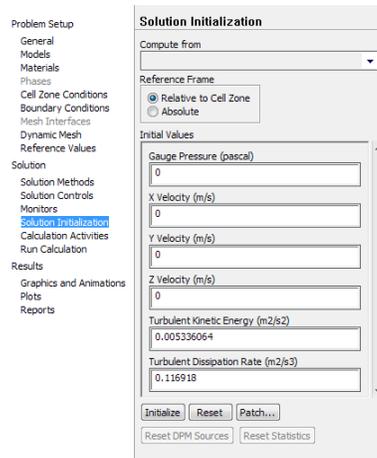


Figura 4.90 Cuadro de diálogo Solution Initialization

- Se inicializan todas las variables para poder iniciar el cálculo.

10. Pestaña Run Calculation

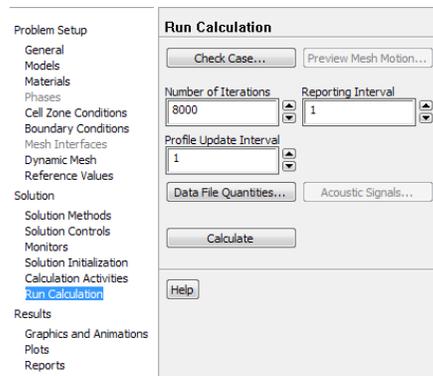


Figura 4.91 Cuadro de diálogo Run Calculation

- Se establece un número de iteraciones adecuado para que el cálculo no se detenga antes de llegar a la convergencia establecida en el cuadro de diálogo Residual monitors, en base a la experiencia de manejo del programa se ingresa 8000 iteraciones para este caso.

11. Pestaña Graphics and Animations

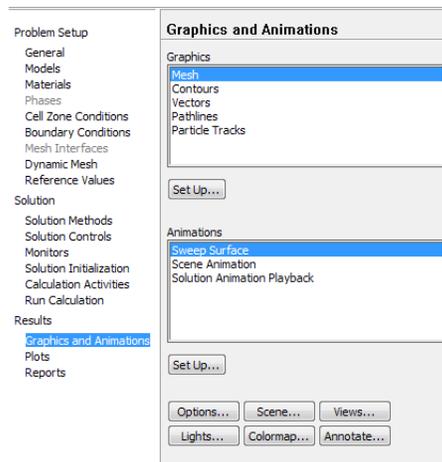


Figura 4.92 Cuadro de diálogo Graphics and Animations

- Se presentan los resultados gráficos del seguimiento de las partículas (Ventana Particle Tracks). Se activa la malla, y se escoge presentar todas las partículas analizadas tanto de manera gráfica

como también se imprime como resumen de conteo en la ventana de comandos.

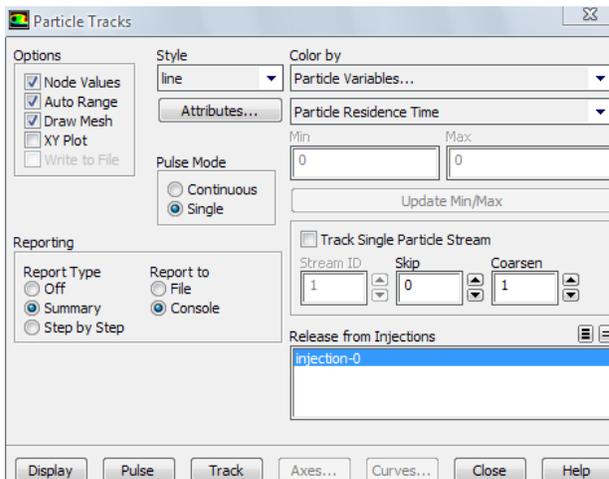


Figura 4.93 Cuadro de diálogo Particle Tracks

Resultados del análisis de la inyección de partículas de pintura en polvo:

- Primer caso: Proceso de pintado desde el centro del mueble

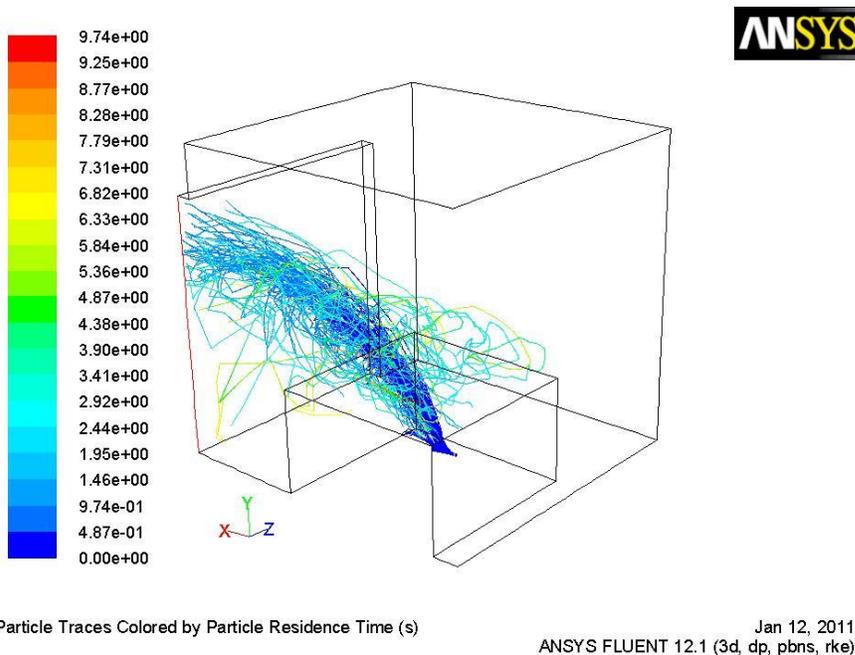
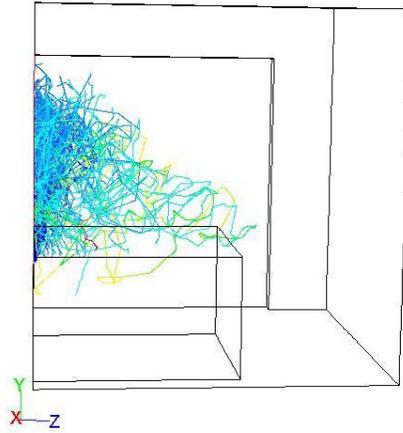
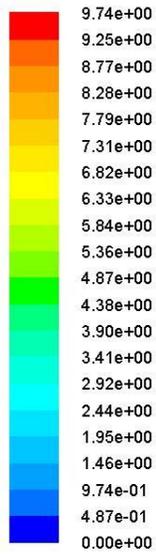


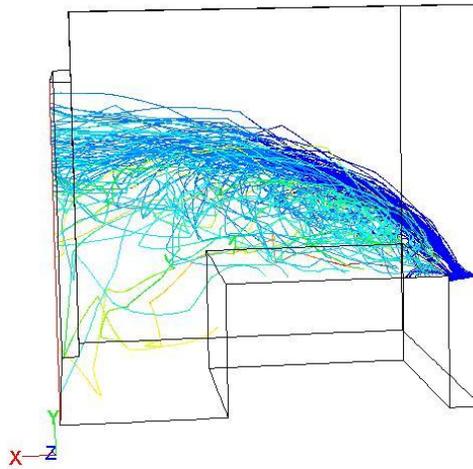
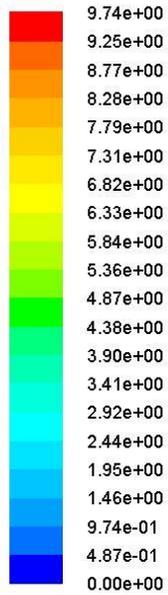
Figura 4.94 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 1)



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

Jan 12, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

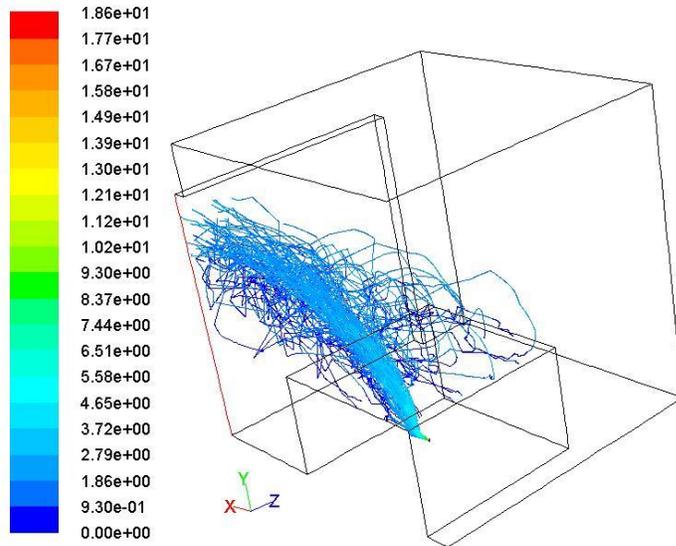
Figura 4.95 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 2)



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

Jan 12, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.96 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 1 - vista 3)

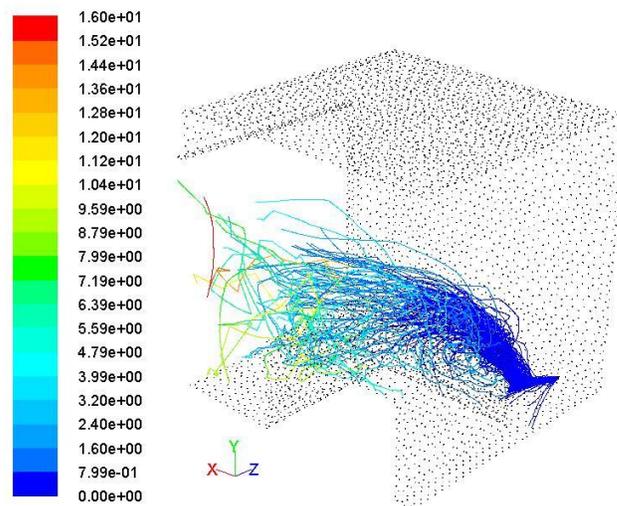


Particle Traces Colored by Particle Velocity Magnitude (m/s)

Jan 12, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.97 Velocidad de las partículas (Caso 1)

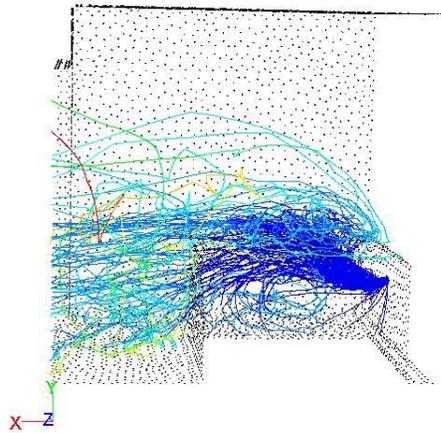
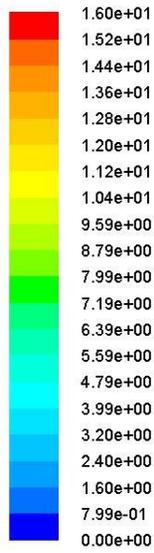
- Segundo caso: Proceso de pintado desde un costado del mueble con un ángulo de inclinación de la pistola de 60° aproximadamente.



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

Jan 13, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

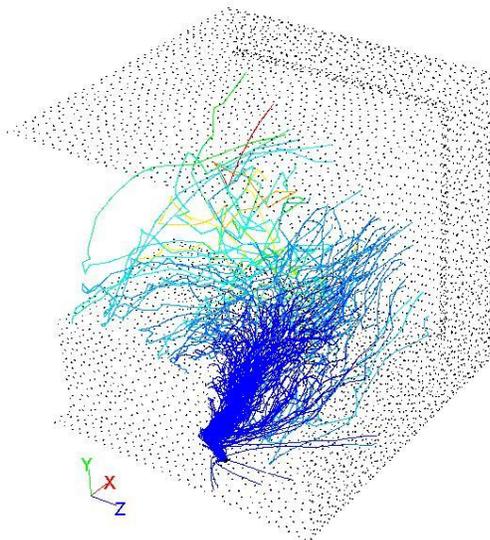
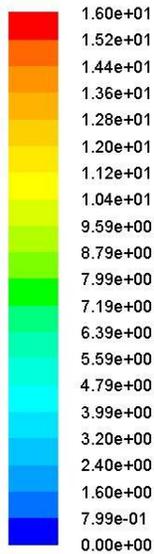
Figura 4.98 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 - vista 1)



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

Jan 13, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.99 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 - vista 2)



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

Jan 13, 2011
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, dp, pbns, rke)

Figura 4.100 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 2 -vista 3)

- Tercer caso: Proceso de pintado con un mueble (pupitre) suspendido

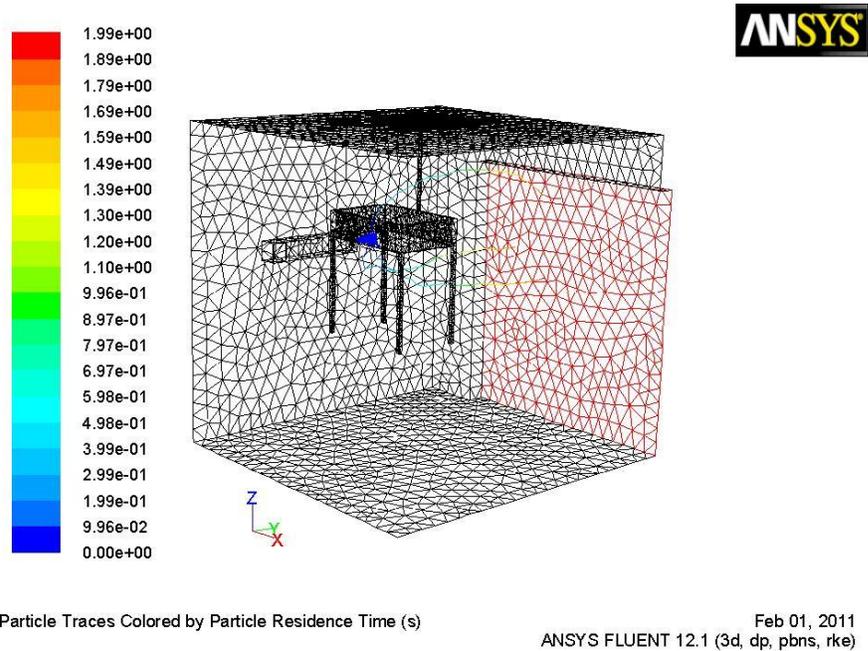


Figura 4.101 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 3 - vista 1)

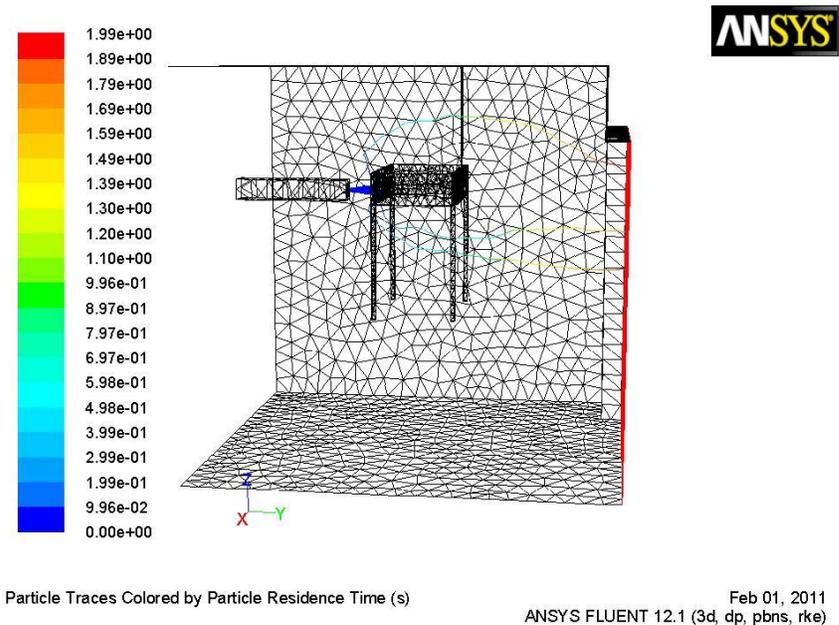


Figura 4.102 Recorrido de las partículas y su tiempo de permanencia (Caso 3 - vista 2)

4.2.5.2.4 Análisis de resultados obtenidos

Tabla 4.8 Obtención de la velocidad de cara apropiada a partir de los caudales del catálogo

ANÁLISIS DE CABINA COMPLETA EN 3D PARA HALLAR VELOCIDAD DE CARA APROPIADA										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Caudal (CFM)	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Cara (m/s)	Vm Cara (m/s)	Observaciones
Flowizard	1	Tetraedro	0,04	64883	7068	16,68	10,71	0,692	0,524	k-e/NB/SOU
Ansys Fluent	2	Tetraedro	0,08	64883	7068	12,9	16,8	0,699	0,524	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	3	Tetraedro	0,08	64883	7812	18,42	11,83	0,764	0,579	k-e/NB/SOU
Ansys Fluent	4	Tetraedro	0,08	64883	7812	14,2	18,5	0,769	0,578	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	5	Tetraedro	0,04	64883	9672	22,81	14,65	0,946	0,717	k-e/NB/SOU
Ansys Fluent	6	Tetraedro	0,04	64883	9672	17,64	23,01	0,956	0,716	PBS/k-e/L/FOU-SOU

Tabla 4.9 Análisis de las velocidades en la cabina

ANÁLISIS CABINA COMPLETA EN 3D										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0,25	7212	1628	12,4	18,5	0,771	0,590	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	2	Tetraedro	0,08	64883	13457	14,2	18,5	0,769	0,578	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	3	Tetraedro	0,05	186550	37390	17,2	22,1	0,773	0,590	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Ansys Fluent	4	Tetraedro	0,04	249004	49601	16	21	0,773	0,586	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	5	Tetraedro	0,25	7212	1628	17,87	11,83	0,772	0,581	k-e/NB/SOU
Flowizard	6	Tetraedro	0,08	64883	13457	18,42	11,83	0,764	0,579	k-e/NB/SOU
Flowizard	7	Tetraedro	0,05	186550	37390	21,74	11,83	0,771	0,583	k-e/NB/SOU
Flowizard	8	Tetraedro	0,04	249004	49601	23,1	11,83	0,776	0,585	k-e/NB/SOU
Ansys Fluent	9	Tetraedro (GAMBIT)	0,06	111699	21589	13,8	17,9	0,766	0,579	PBS/k-e/L/FOU-SOU
Flowizard	10	Tetraedro (GAMBIT)	0,06	111699	21589	18,01	11,83	0,761	0,578	k-e/NB/SOU

Tabla 4.10 Análisis de la cabina completa

ANÁLISIS CABINA COMPLETA MUEBLE EN POSICIÓN VERTICAL										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0.08	78395	15250	14,1	18,3	0,57	0,476	PBS/k-e/L/FOU-SOU

Tabla 4.11 Análisis de las velocidades en el cuarto de succión

ANÁLISIS CUARTO DE SUCCIÓN (SECCIÓN DE FILTROS Y RECOLECCIÓN DE POLVO) EN 3D										
Software	Nº Análisis	Tipo de elemento	Intervalo de elementos	Nº elementos	Nº nodos	V máx (m/s)	Vect Vmáx (m/s)	V máx Pin (m/s)	Vm Pin (m/s)	Observaciones
Ansys Fluent	1	Tetraedro	0,04	92979	19107	17,7	22,9	5,19	0,828	PBS/k-e/L/FOU-SOU (Vfiltros)
Flowizard	2	Tetraedro	0,04	92979	19107	20,856	11,83	5,309	0,853	k-e/NB/SOU

Tabla 4.12 Diferencias en los análisis

Nº Análisis	Intervalo	Δ de e (veces)	Δ de e (# de dif.)	Δ de Vec (m/s)	Δ de V (m/s)
1	I1-I2	9,0	57671	0	1,8
2	I2-I3	2,9	121667	3,6	3
3	I3-I4	1,3	62454	-1,1	-1,2
4	I1-I2	9,0	57671	0	0,55
5	I2-I3	2,9	121667	0	3,32
6	I3-I4	1,3	62454	0	1,36

Tabla 4.13 Condiciones de frontera utilizadas

Condiciones de Frontera	
Pressure inlet	in
Velocity inlet (FLUENT)	out (V-)
Velocity outlet (FLOWIZARD)	out (V+)

Tabla 4.14 Códigos utilizados

CÓDIGO	
PBS	Pressure based Solver
FOU	First Order Upwind
SOU	Second Order Upwind
L	Least Square Cell Based Gradient Eval.
NB	Node based Gradient Evaluation
k-e	K-epsilon turbulent viscous model

Gráficas de análisis de resultados

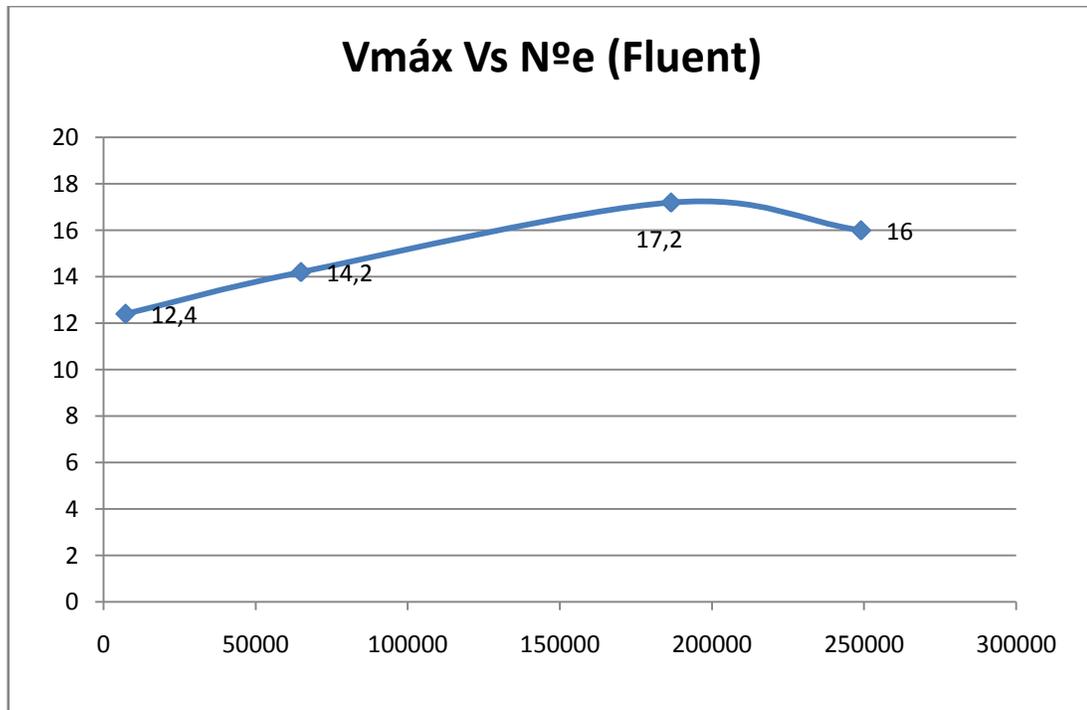


Figura 4.103 Gráfica de velocidad máxima vs N° elementos (Fluent)

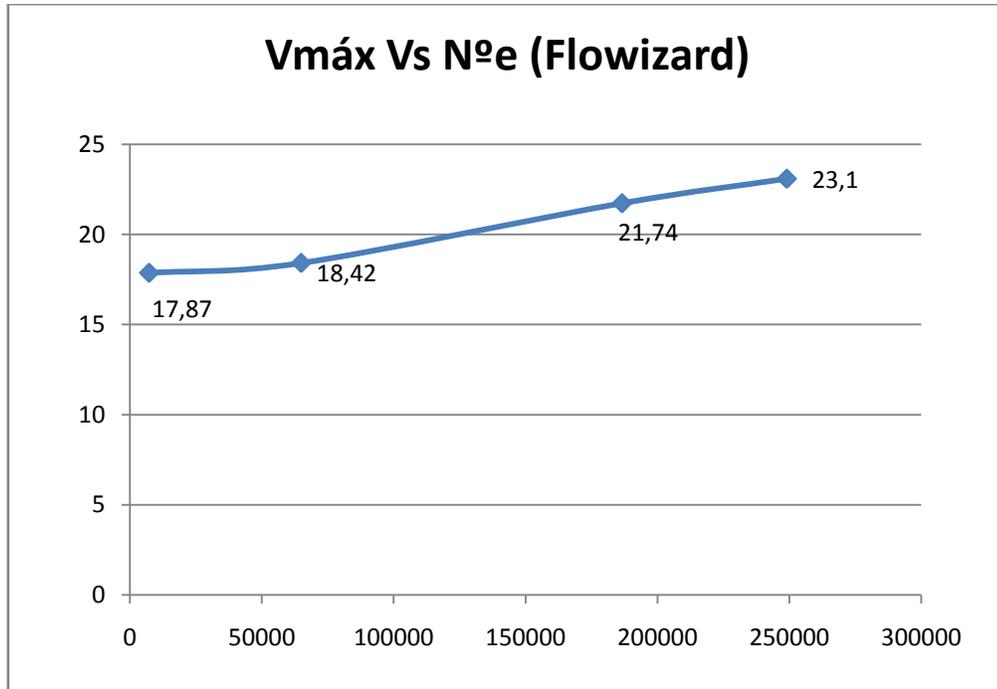


Figura 4.104 Gráfica de velocidad máxima vs N° elementos (Flowizard)

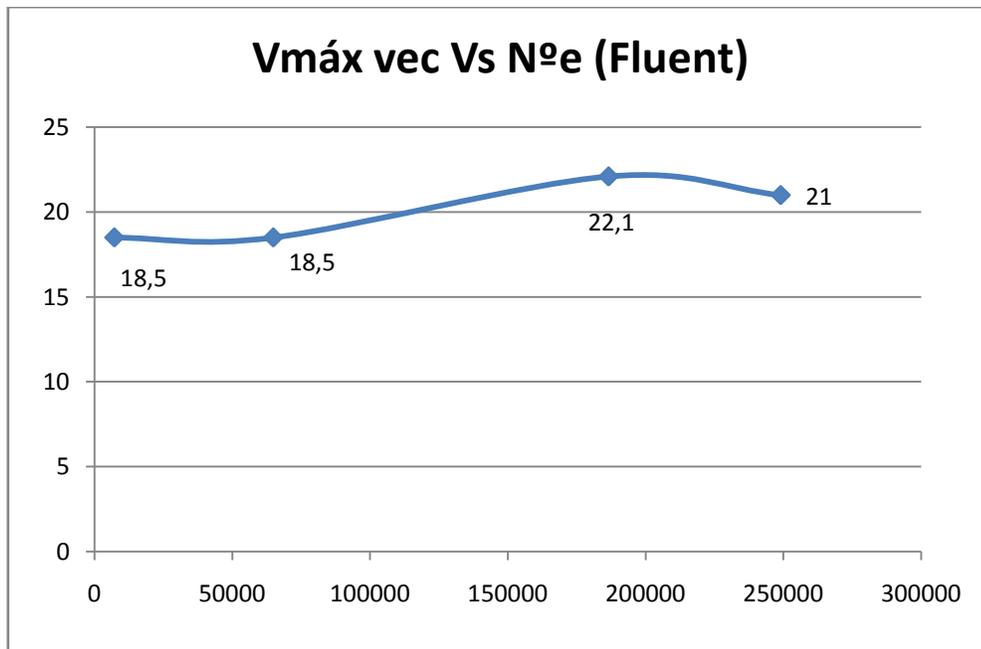


Figura 4.105 Gráfica de vectores de velocidad máxima vs N° elementos (Fluent)

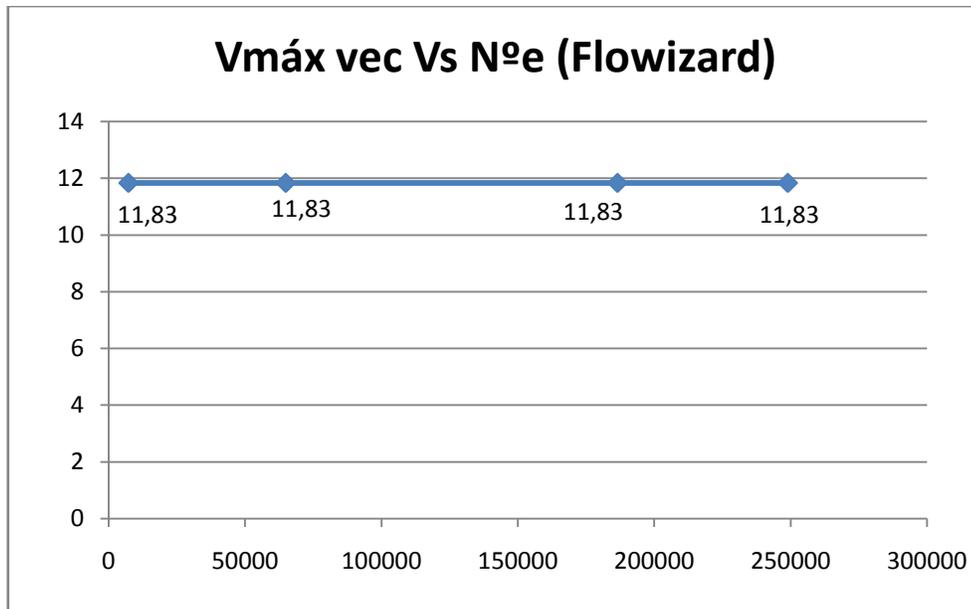


Figura 4.106 Gráfica de vectores de velocidad máxima vs N° elementos (Flowizard)

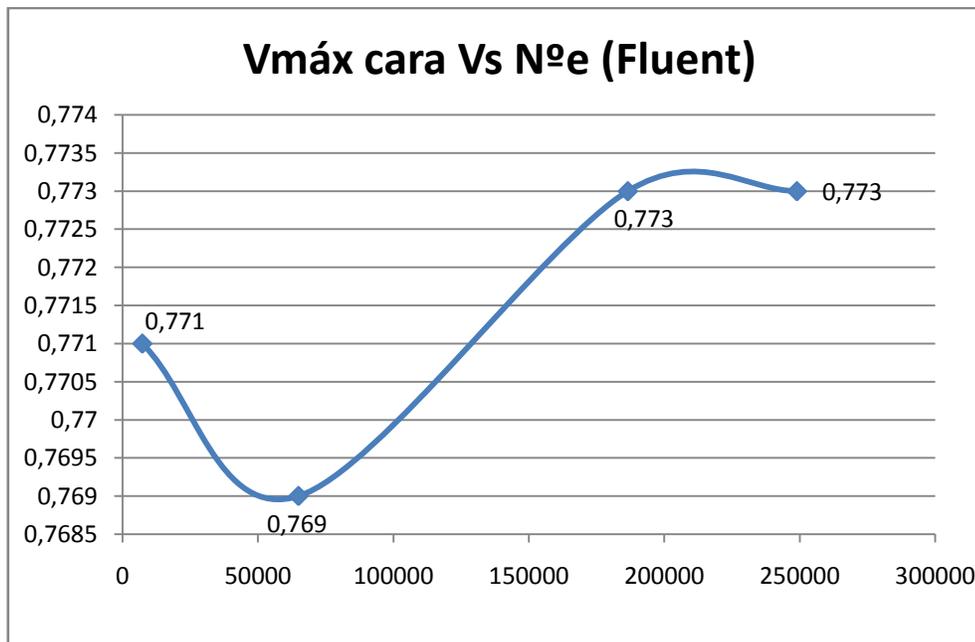


Figura 4.107 Gráfica de velocidad máxima de cara vs N° elementos (Fluent)

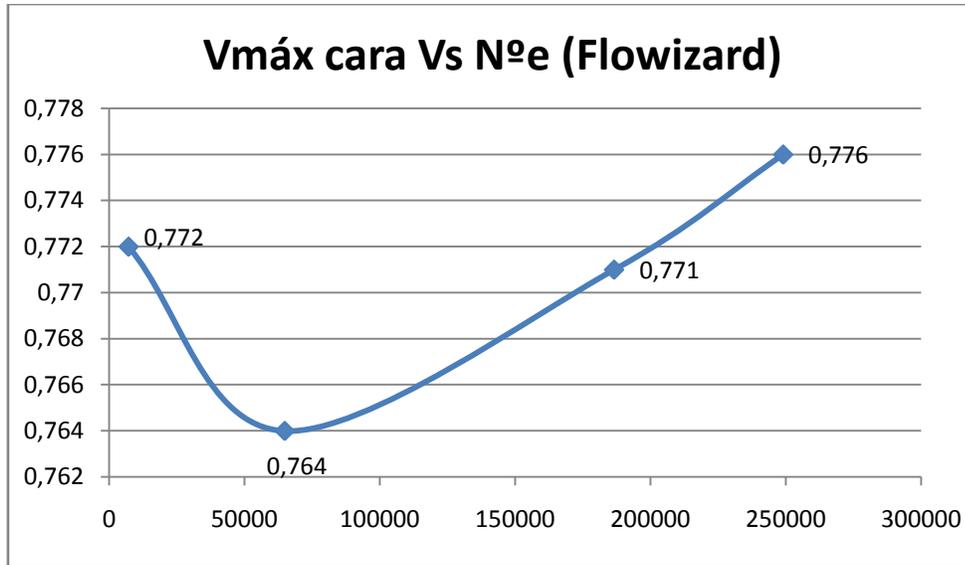


Figura 4.108 Gráfica de velocidad máxima de cara vs N° elementos (Flowizard)

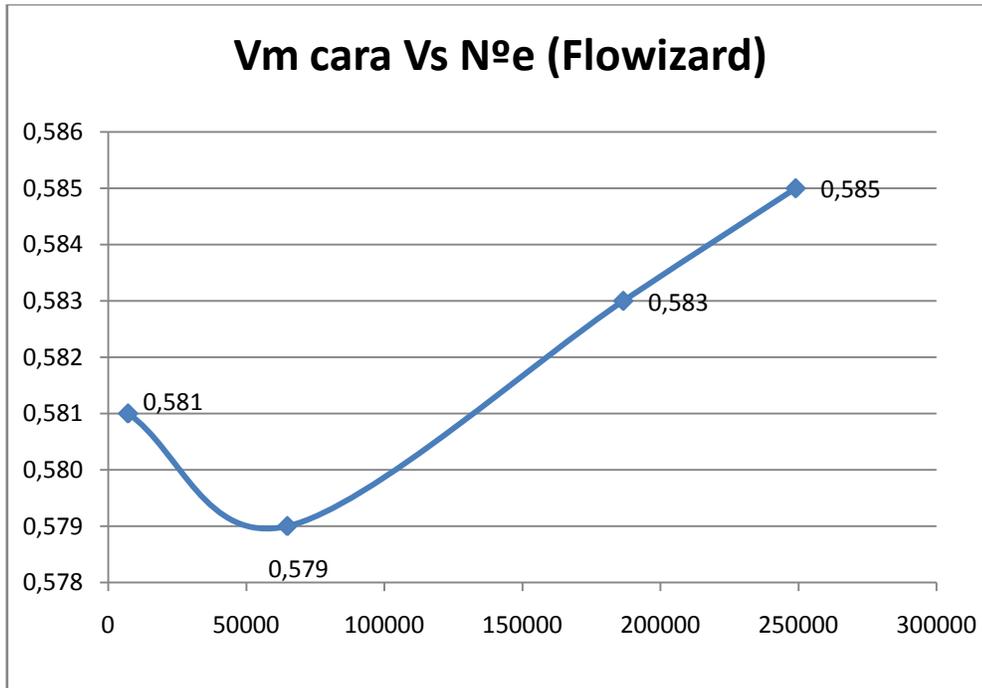


Figura 4.109 Gráfica de velocidad media de cara vs N° elementos (Fluent)

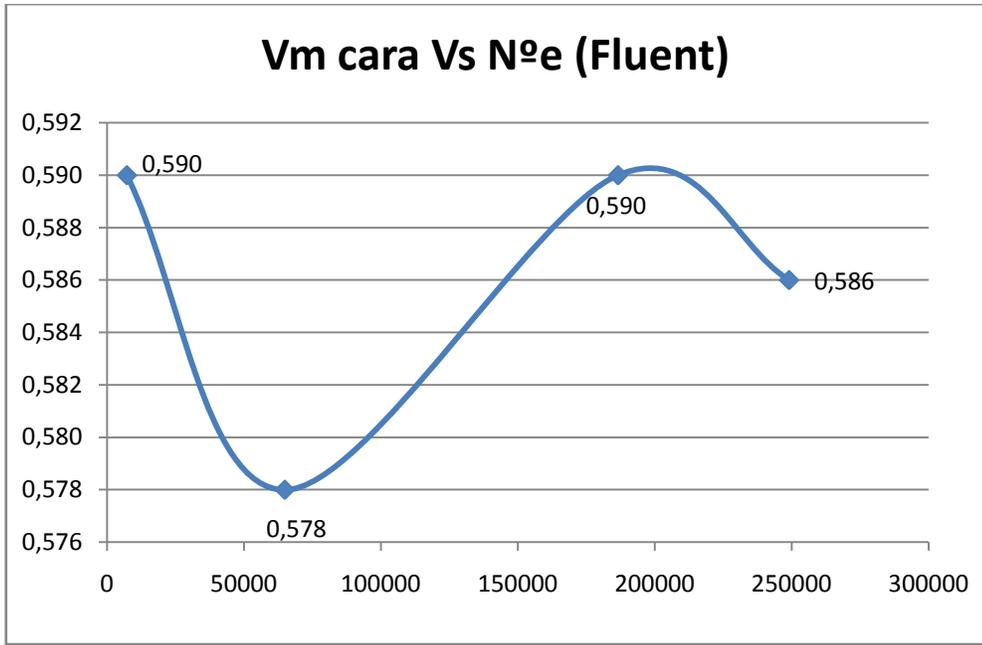
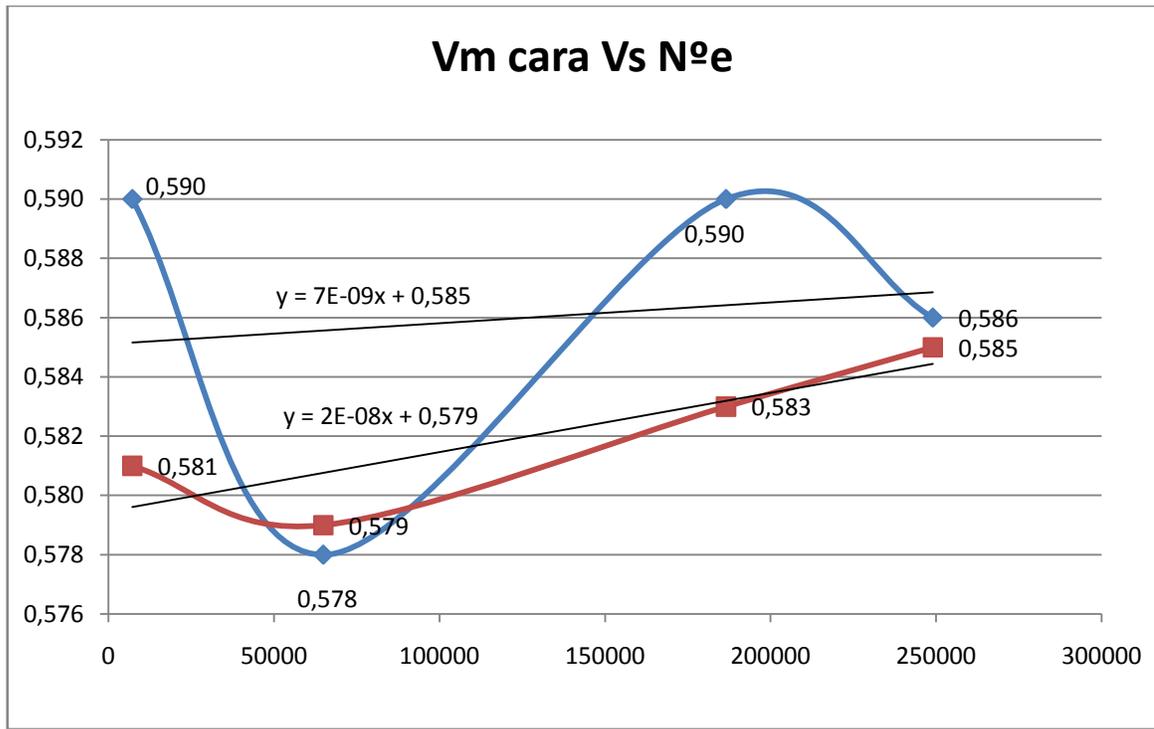


Figura 4.110 Gráfica de velocidad media de cara vs N° elementos (Flowizard)



— Fluent — Flowizard

Figura 4.111 Gráfica comparativa de velocidad media de cara vs N° elementos de ambos programas

Conclusión:

De los datos tabulados y las gráficas obtenidas se puede concluir que después de incrementar 34,5 veces el número de elementos en ambos programas la diferencia en la velocidad media de cara es mínima por lo que se concluyó las simulaciones hasta este punto, y se aceptaron como respuestas finales los valores de la malla de 249004 elementos. La diferencia de velocidades en este punto como se observa es de una milésima por lo que representa un porcentaje de error de 0.2% aproximadamente.

Como se observa en la gráfica no existe una clara tendencia pero si existe una disminución marcada en el segundo análisis en ambos programas debido probablemente a la calidad de los elementos de la malla. Debido que el error máximo en el software Fluent es de 2.1% y en el software Flowizard es de 1% aproximadamente, y debido a no disponer de un computador de mayor rendimiento no se realizaron más simulaciones con resultados más precisos.

Una consideración importante es que al hacer la simulación con el cambio de posición del armario de mayores dimensiones producido en el centro de producción se pudo obtener resultados que reflejan que el volumen de aire contenido en la cabina afecta considerablemente al rendimiento del sistema de extracción ya que al ser retirada la base aumenta el volumen total de succión de aire y la velocidad promedio bajó de 0.58 m/s aproximadamente a 0.476m/s, valor de velocidad que está por debajo del límite inferior recomendado que es de 0.508m/s como mínimo para obtener buenos resultados de recolección del polvo de pintura electrostática.

Por lo tanto el ingreso de un mueble de dimensiones superiores a las previamente establecidas en las simulaciones o a su vez una excesiva cantidad de muebles dentro de la cabina que reduzcan considerablemente el volumen neto de aire produciría un aumento en la velocidad de cara que puede perturbar el proceso de pintura electrostática.

Tabla 4.15 Resumen de las simulaciones del flujo de partículas

Posición de la pistola	Partículas atrapadas	Partículas recuperadas	Total partículas*	η proceso %
1	48	82	130	36,92
2	110	60	170	64,71
3	1596	4	1600	99,75

*El número de partículas rastreadas lo establece el programa según la geometría y condiciones de cálculo

Conclusión:

Existen infinitas posibilidades en cuanto a la posición de la pistola de pintura electrostática y la calibración del equipo en cuanto al caudal másico de salida, por lo que se escogieron 3 posiciones con un caudal másico constante para analizar el rendimiento del proceso de pintado, la trayectoria de las partículas y tiempo de permanencia dentro de la cabina.

Se escogieron sólo estas 3 posiciones aleatoriamente debido a que la geometría de los muebles fabricados en el Centro de Producción es variada y además el proceso-tiempo de simulación es complicado y extenso.

El porcentaje ideal de captación de pintura en polvo es del 98%⁵⁰ (máximo posible de recuperación) lo cual representaría el rendimiento máximo del sistema de extracción. Por tal motivo lo que medimos con este cálculo fue el rendimiento del proceso de pintado que como se observa depende de la posición de la pistola y la geometría del mueble.

⁵⁰ Catálogo de Metal Actual – Pintura en polvo, página 30

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRADO

4.3.1 SELECCIÓN DE FILTROS

El sistema de filtrado consta de las siguientes etapas:

4.3.1.1 Etapa inicial: Malla de acero fina convencional

Esta malla, como función principal, va a proteger a la tela filtrante de golpes, rasgaduras y/o perforaciones debido a la manipulación de objetos dentro de la cabina, ya que el costo de la tela es elevado y la tela filtrante requiere de un buen cuidado para su óptima operación, es muy necesaria esta protección. Además, va a evitar que las impurezas superiores a 1.5mm contaminen la pintura electrostática y se adhieran a la tela filtrante lo que acortaría su vida útil.

Características de la malla:

- Micraje de la malla 1500 μm
- Caída de presión final ~ 0 Pa

4.3.1.2 Etapa final: Tela Filtrante

Este es el paso de filtración para la pintura en polvo ya que se utilizará un filtro de un micraje bajo adecuado para este tipo de pintura, el cual impedirá que partículas superiores a $10\mu\text{m}$ pasen y se acumulen en el rotor del ventilador desbalanceándolo o que a su vez sean expulsadas al ducto de salida y se produzca un desperdicio que no permita conseguir el aprovechamiento requerido.

Un alto porcentaje de las partículas que pasen por el filtro serán retenidas en este y al irse acumulando por la vibración del ventilador y por leves movimientos de limpieza con una brocha suave del operario, la pintura caerá en el canal de recolección de la cabina de succión para ser reutilizada posteriormente.

Cabe recalcar que no se tienen mayores datos técnicos sobre este filtro ya que su disponibilidad en el mercado es escasa.

Características de la tela filtrante:

- Micraje de la tela filtrante 10 μm
- Caída de presión final ~349 Pa (se asume como máximo)

4.3.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

El sistema de posicionamiento de los dos marcos de filtros está compuesto de estructuras metálicas simples y marcos internos de madera para la sujeción de tela filtrante.

4.3.2.1 Filtro inicial:

La estructura está construida de perfil de madera de las siguientes dimensiones

- Un marco de 2800x1550 mm y un espesor de 50 mm. Además tiene divisiones internas para dar rigidez al marco y a la malla metálica, esto también permite colocar las secciones de malla que tienen un ancho inferior a 1.5 metros.

4.3.2.2 Filtro final

Las estructuras están construidas de perfil tipo L (ángulo) 20x20x3mm y presentan las siguientes dimensiones:

- El primer marco: 1500x1343mm con su respectivo marco interno de madera de 40mm de espesor donde se sujeta la tela filtrante.
- El segundo marco: 1500x1433mm con su respectivo marco interno de madera de 40mm de espesor donde se sujeta la tela filtrante.

Este es el sistema más factible para la configuración de diseño ya que les permitirá a los trabajadores cambiar los filtros de forma rápida y efectiva, esto permitirá ganar tiempo de espera y por lo tanto incrementar la producción.

4.3.3 CAMBIOS DE COLOR

El sistema de cambios de color está diseñado de manera que no se pierda tiempo en el cambio de filtros. El cambio de los filtros es necesario ya que la pintura electrostática se contamina con facilidad, por tal razón; es necesario que en cada cambio de pintura sean cambiados los filtros en este caso un panel. Este panel es removible mediante el sistema de posicionamiento. Esto ayudará al trabajador a ganar tiempo al momento que el proceso requiera cambiar de color de pintura.

En cada cambio de pintura es necesario llevar a cabo la limpieza de la cabina de succión ya que como se mencionó anteriormente, la pintura electrostática se contamina con facilidad, por lo tanto la limpieza interna de esta estructura es necesaria para conseguir resultados óptimos en el proceso de pintura y una calidad competitiva de los productos.

4.4 SELECCIÓN DEL VENTILADOR

4.4.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL MOTOR

Cálculo del ventilador centrífugo necesario

$P_{et1} := 1.4$ inH2O Presión estática del catálogo

$\rho_{ag} := 998$ kg/m³ 20°C y 0 m.s.n.m. densidad del agua a la temperatura del fluido

$\gamma_{ag} := \rho_{ag} \cdot gL = 9778.404$ N/m³ Peso específico del agua

$\gamma_{ag1} := \frac{\gamma_{ag}}{gL} \cdot 2.2046.3048^3 = 62.30247$ Lbf/ft³

$P_{et} = 1.4$

$P_v := \gamma_{ag1} \cdot (Q_f) \cdot (P_{et1}) \cdot \frac{1}{12} = 60838.35742^*$ Lbf*ft/min Potencia

$P_{v1} := \frac{P_v}{33000} = 1.84359$ Hp A nivel del mar $Q_{ext} = 3.68685$

* $P = Q(m^3/s) \cdot g(m/s^2) \cdot ha(mmcd) = Q_m(Kg/s) \cdot ha$

Factor total por altitud y temperatura

$$\frac{60 - 55.4}{60 - 40} := \frac{0.98 - Ft}{0.98 - 0.94} \quad \text{a } 13^{\circ}\text{C ó } 55.4^{\circ}\text{F} \quad (\text{Ver Anexo E})$$

$$Ft := -1 \left(\frac{60 - 55.4}{20} \cdot 0.04 - 0.98 \right) = 0.9708 \quad \text{Factor de temperatura}$$

$$\frac{10000 - 9350}{10000 - 9000} := \frac{1.45 - Fa}{1.45 - 1.40} \quad \text{a } 2850\text{m ó } 9350\text{ft}$$

$$Fa := -1 \left(\frac{10000 - 9350}{1000} \cdot 0.05 - 1.45 \right) = 1.4175 \quad \text{Factor de altitud (Ver Anexo E)}$$

$$F_{tot} := Ft \cdot Fa = 1.37611 \quad \text{Factor total de corrección}$$

$$P_{ec} := P_{et} \cdot F_{tot} = 1.2385 \quad \text{inH}_2\text{O} \quad \text{Presión estática total corregida}$$

$$P_{otc} := \frac{P_{v1}}{F_{tot}} = 1.33971 \quad \text{Hp} \quad \text{Potencia corregida}$$

Factor de corrección de potencia por pérdidas en la transmisión

$$P_{otc} \cdot 1.09 = 1.46028 \quad \text{Hp}$$



SELECCIÓN DE MOTOR

La curva de potencia mostrada en cada una de las gráficas de equipos representa la potencia absorbida en el eje medida en BHP.

Para determinar la potencia instalada del motor, se deberá aplicar el factor de corrección para compensar las pérdidas por transmisión.

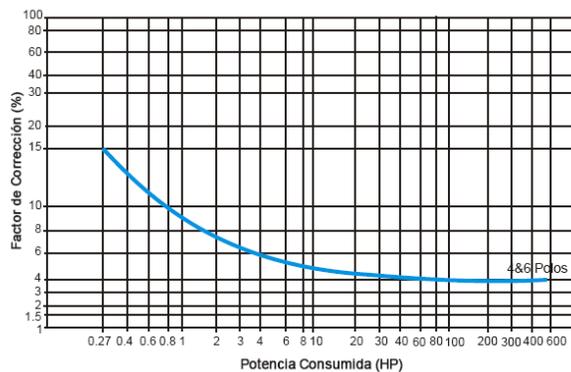


Figura 4.112 Curva de factor de corrección por pérdidas de transmisión

Ventilador Corregido a condiciones de Latacunga

Q=7812 CFM (Catálogo de Megafrió)

Petc=1.5 inH2O (Catálogo de Megafrió)

HP=1.47HP+15% seguridad = 1.69HP (mínimo Calculado)

HP=3.6HP (Catálogo de Megafrió sin pérdidas y a nivel del mar)

RPM=1107 (Catálogo de Megafrió)

$rpm_a := 1107$

Selección motor de 5HP

$Pen := 38.1$ mmcda = 1.5inH2O presión estática corregida

$Pota := \frac{Q_{ext} \cdot Pen \cdot gL}{746} = 1.84493$ Hp Potencia del ventilador entregada al aire a nivel del mar

$Potac := \frac{Pota}{F_{tot}} = 1.34068$ Hp Potencia del ventilador entregada al aire corregido

$Potv := 3.6$ Hp Potencia que el ventilador recibe en su eje (catálogo)

$Potrv := 5$ Hp Potencia que el ventilador recibe en su eje (real)

$\eta_t := \frac{Pota}{Potv} \cdot 100 = 51.248$ % rendimiento teórico del ventilador

$\eta_r := \frac{Pota}{Potrv} \cdot 100 = 36.89856$ % rendimiento real del ventilador

4.4.2 SELECCIÓN DE UNA MARCA Y MODELO DISPONIBLE EN EL MERCADO

La selección de un modelo disponible en el mercado se basa en las empresas dedicadas a la importación y/o fabricación de equipos de ventilación industrial.

El modelo seleccionado de ventilador centrífugo es fabricado por la empresa Soler & Palau S.A (España), su importador en Ecuador es la empresa Megafrío, y que consta de las siguientes características⁵¹:

- Procedencia: España
- Modelo: CMA 630
- Tipo de turbina: Airfoil
- Diámetro de rodete: 640 mm. (25 3/16 inch).
- Diámetro del eje: Clase I 38.1 mm (1 1/2 inch).
- Área de salida: 0.346 m² (3.727 ft²).
- BHP máximos: Clase I 10.72.
- Armazón máximo de motor: Clase I 254 T.
- RPM máximas: Clase I 1600.
- Peso del equipo: 158 Kg / 348 Lbs
- Presión estática utilizada: 1.5 in H₂O
- Velocidad de salida: 2100 ft/min
- Nivel de ruido: 83 dB

La selección de este ventilador se basó en criterios como:

- Facilidad de adquisición
- Confiabilidad de la marca
- Sistema de funcionamiento
- Cumplimiento con los parámetros de diseño
- Nivel de eficiencia
- Vida útil
- Bajo mantenimiento

⁵¹ Catalogo Ventiladores Centrífugos serie CM y CMA. Soler & Palau S.A Pág. 51

4.4.3 DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE ACCIONAMIENTO

El sistema de accionamiento de este tipo de ventilador centrífugo se basa en las llamadas correas o bandas, ya que es necesaria una transmisión variable para posteriores cambios en el caudal de aire dependiendo de las necesidades posteriores que la demanda exija en el Centro de Producción.

Adicional a esto el sistema, para su funcionamiento, está acoplado a un eje (dimensionado con diámetros adecuados para la operación, con tolerancia precisa, fabricado en acero AISI C-1045, recubierto con una capa anticorrosiva) suspendido por un par de chumaceras que permiten la transmisión de movimiento del motor a la turbina y así generar el trabajo deseado.

Los rodamientos del sistema de accionamiento constan de una vida útil de 200000 horas.

Por lo tanto el sistema de transmisión por medio de bandas es el más óptimo para este tipo de aplicación.

4.4.4 ACCESORIOS DISPONIBLES DEL MODELO SELECCIONADO

4.4.4.1 Cubierta intemperie

Accesorio que protege totalmente al sistema motriz completo: eje-chumaceras, poleas-bandas y motor de las condiciones ambientales externas. Incluye entradas de aire para el correcto enfriamiento del motor.

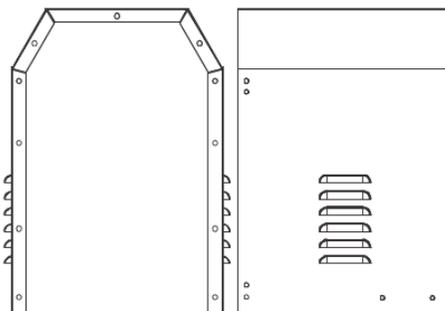


Figura 4.113 Cubierta del ventilador

4.4.4.2 Puerta de inspección

Para facilitar la limpieza y permitir la inspección interna del equipo. Se encuentra atornillada a la envolvente y está fabricada del mismo material.

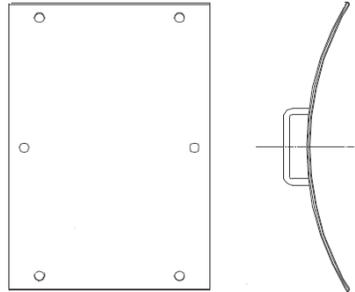


Figura 4.114 Puerta de inspección

4.4.4.3 Brida para la descarga

Accesorio especial para facilitar el acoplamiento al sistema de ductos. Con barrenos.

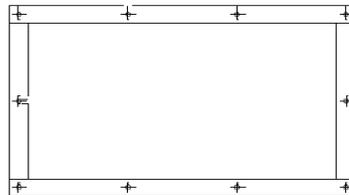


Figura 4.115 Brida de descarga

4.4.4.4 Malla de protección en succión y descarga

Para prevenir la entrada de materiales al interior del equipo, cuando éste no se encuentra enductado y salvaguardar la integridad de las personas y equipos que se encuentran alrededor del ventilador.

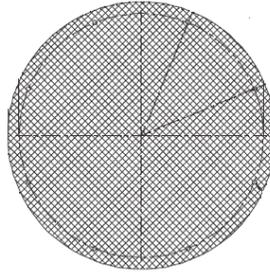


Figura 4.116 Malla de protección de succión

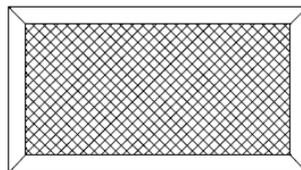


Figura 4.117 Malla de protección de descarga

4.4.4.5 Resortes con base

Actúan de manera independiente para un amortiguamiento 100% vertical, son lateralmente estables, de acero, con sistema de ajuste para controlar la deflexión (25 mm) y base moldeada de neopreno antideslizante de 3/16" de espesor.

4.4.4.6 Cubierta para protección de las chumaceras

Accesorio de protección que cubre la flecha con una malla cerrada, que impide el contacto con el eje impulsor de la turbina y protege al operario

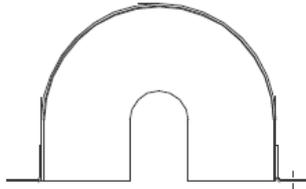


Figura 4.118 Cubierta de protección

4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO

4.5.1 SISTEMA DE ADMISIÓN

El sistema de admisión consta de una cabina de succión la cual permitirá crear un vacío por medio de la presión negativa generada por el ventilador. Todo el aire aspirado circulará libremente en esta cabina y cuarto de succión y se dirigirá hacia la boca del ventilador centrífugo.

Una vez que el aire llegue a la boca de aspiración, logrará una velocidad de $11,83 \frac{m}{s}$, la misma que disminuirá en la descarga.

El diseño del sistema de admisión está ligado al sistema de extracción razón por la cual no se mencionará más datos técnico ni cálculos.

4.5.2 SISTEMA DE DESCARGA

El sistema de descarga inicia con la velocidad final del ventilador, es decir; la velocidad que adquiere luego de pasar por los álabes. Esta velocidad según su catálogo es de $2100 \frac{pies}{min}$, la misma que se utilizará para diseñar el sistema de descarga que incluye 3 secciones de ducto recto y 2 codos rectos de 90° y una reducción rectangular.

4.5.2.1 Cálculo de los codos rectos

$$H1 := 800 \text{ mm}$$

Dimensiones de la boca de salida
del ventilador

$$W1 := 433 \text{ mm}$$

$$\text{rel} := \frac{H1}{W1} = 1.848$$

$$\rho := 0.86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del aire en Latacunga

$$\text{Vel} := 10.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad a la salida de la boca del ventilador. Catalogo

Soler & Palau. Pág. 51

$$r1 / w1 = 0,75$$

Relación más favorable de dimensiones con respecto al radio

$$r1 := 0.75 W1 = 324.75 \text{ mm}$$

$$C1 := 0.39$$

Valor obtenido de la tabla del Anexo F

$$\Delta P := C1 \cdot \rho \cdot \frac{\text{Vel}^2}{2} = 19.42$$

Pa Caída de presión en el codo de 90°

$$\Delta P_t := \Delta P \cdot 2 = 38.84$$

Pa Caída de presión total en los codo de 90°

$$\Delta P_{tin} := \frac{\Delta P_t}{228} = 0.17$$

in H2O

Dimensiones totales del codo do 90°

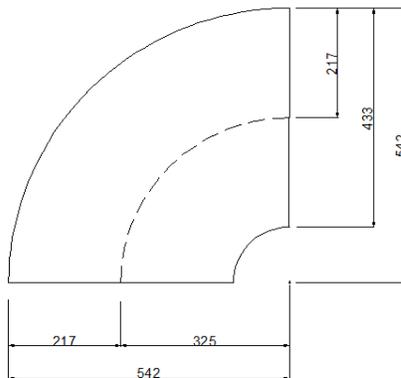


Figura 4.119 Codo de 90°

4.5.2.2 Cálculo de los ductos rectos

Las longitudes de los ductos ya están determinadas por el espacio limitante que tenemos dentro del espacio de trabajo, razón por la cual nos limitaremos a calcular únicamente la caída de presión en los mismos.

Caída de presión en el ducto rectangular

$$Q1 := 0.80.433Vel = 3.695 \frac{m^3}{s}$$

$$L1 := 10 \text{ m}$$

$$Deq := \frac{1.3 \frac{(H1 \cdot W1)^{0.625}}{(H1 + W1)^{0.25}}}{1000} = 0.636$$

m Diámetro equivalente de la tubería rectangular

$$\Delta P_{dr2} := \frac{1.51 \frac{Q1^{1.924}}{Deq^{5.129}} \cdot L1 \cdot 10^{-6}}{228} = 8.3442 \times 10^{-6}$$

in H2O

$$\Delta P_{Total} := \Delta P_{tin} + \Delta P_{dr2} = 0.17$$

in H2O

4.5.2.3 Materiales

El material a utilizar es el Acero galvanizado en lámina de espesor 0.75mm común ya que solamente es una aplicación regular y no requiere mayor dureza ni resistencia a esfuerzos. Además una justificación importante es el factor peso ya que este tipo de material es liviano y en gran manera ayudará a que la estructura de los ductos sea de fácil instalación.

4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA EL VENTILADOR Y MOTOR

4.6.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

4.6.1.1 Dimensiones

- L=2800mm
- A=1100mm
- h=1900mm

4.6.1.2 Cargas totales aplicadas

- 1 ventilador centrífugo + cubierta del motor: 158 Kg ~ 160 Kg
- 1 motor trifásico de 5hp: 33.2 Kg ~ 40 Kg
- 2 Personas de peso promedio 70 Kg para mantenimiento = 140 Kg

4.6.1.2.1 Carga total parte superior

200 Kg (Distribuida en 8 puntos)

4.6.1.2.2 Carga total posterior (mantenimiento del ventilador)

140 kg (Distribuida en 4 puntos)

4.6.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL ELEMENTO MÁS CRÍTICO Y DIAGRAMA DE MOMENTOS

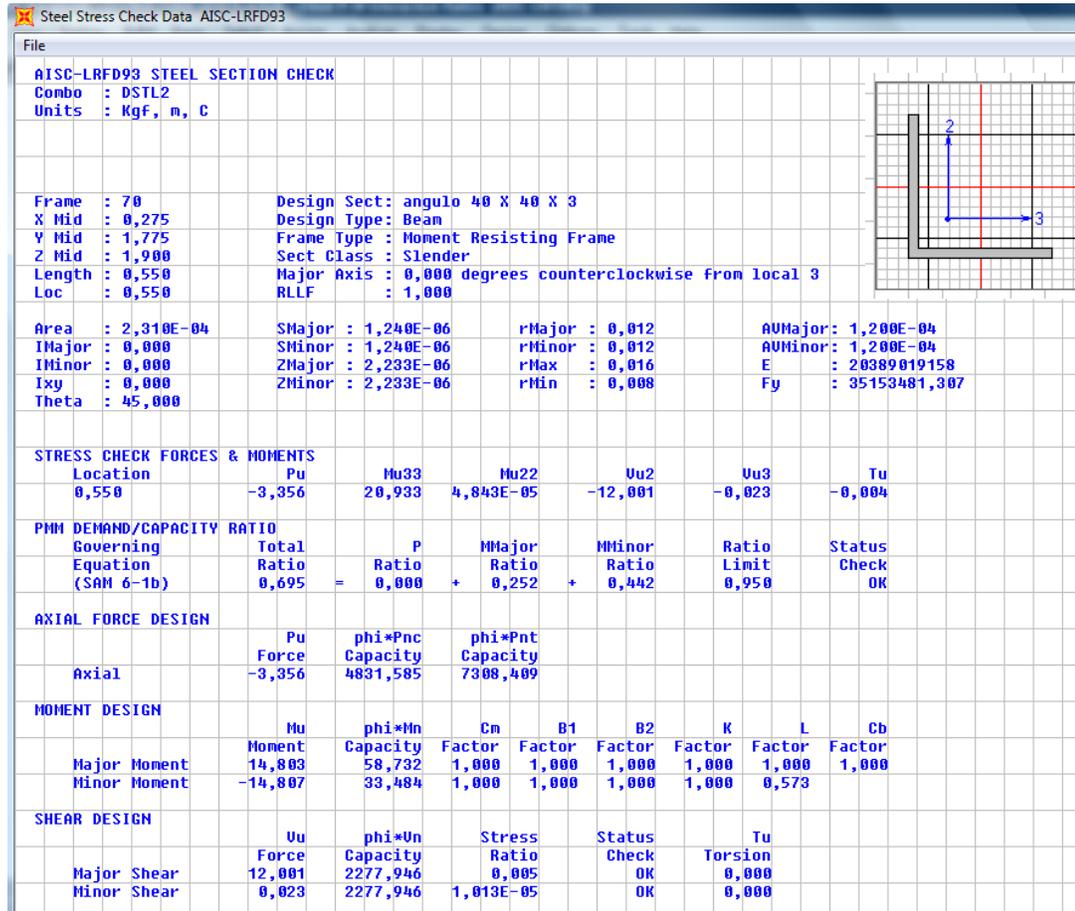


Figura 4.121 Elemento más crítico del cuarto de succión

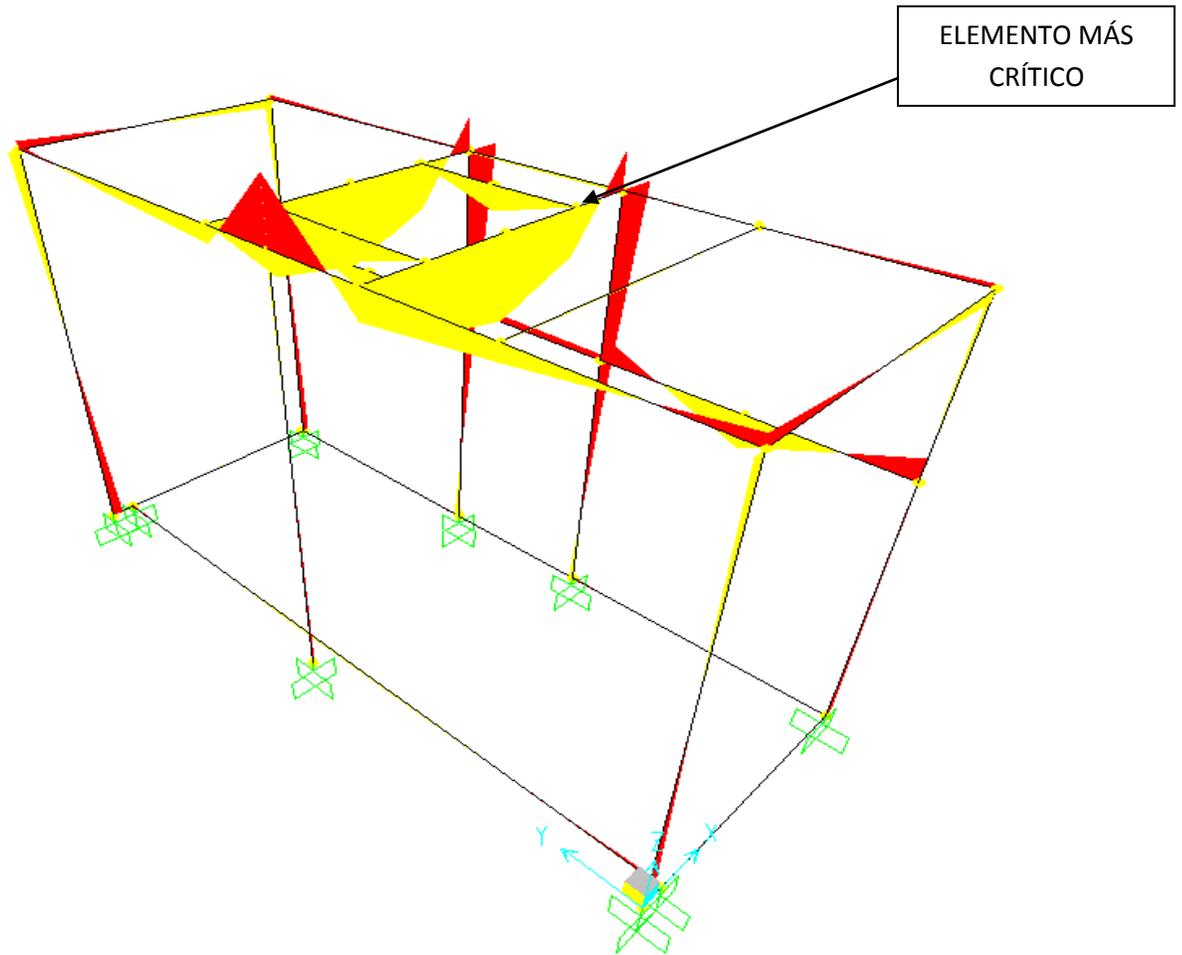


Figura 4.122 Diagrama de momentos del cuarto de succión

Como se puede observar el momento más crítico está ubicado en el elemento de la base superior, esto se debe a que estos perfiles tipo L reciben toda la carga del ventilador y el motor y es allí donde se deben colocar varios perfiles juntos al igual que una columna central permitiendo que la estructura soporte las cargas de diseño.

4.6.3 RESULTADOS OBTENIDOS

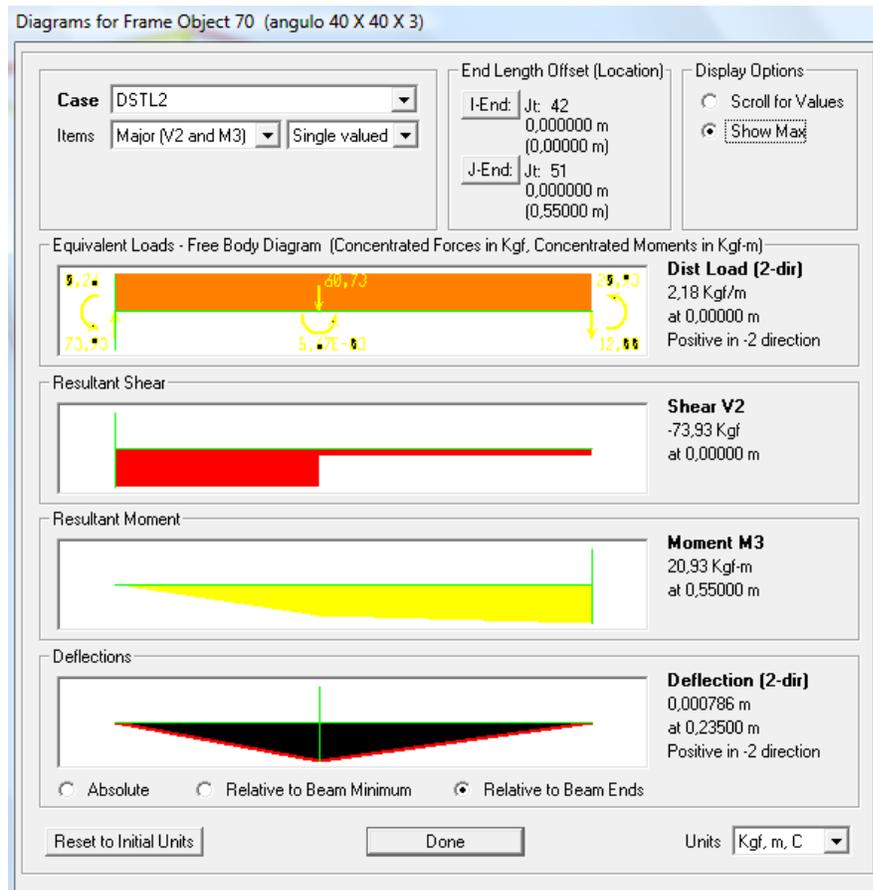


Figura 4.123 Cortante, momento y deflexión máxima para el elemento más crítico del cuarto de succión

Los datos obtenidos del análisis de SAP 2000 son los siguientes:

- Cortante máximo: 73,93 kgf
- Momento máximo: 20,93 kgf-m
- Deflexión: 0.0008 m

Se puede concluir que la estructura no va a sufrir falla debido a los bajos valores de cortante y momentos. Además la deflexión producida es casi nula, por lo que no afecta a la estructura.

4.6.5 CÁLCULO DE LA SOLDADURA EN LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL VENTILADOR Y MOTOR

$$d := 37 \quad \text{mm}$$

$$din := \frac{37}{24.5} = 1.51 \quad \text{in}$$

$$I_u := \frac{din^3}{6} = 0.574 \quad \text{in}^3$$

Segundo momento del área unitaria⁵²

$$\tau := 18000 \quad \text{psi}$$

Esfuerzo cortante permisible con electrodo E6011⁵³

$$F1 := 25 \quad \text{kgf} \quad F2 := F1 \cdot 2.2 = 55 \quad \text{lbf}$$

Fuerza Aplicada

$$Din := 357 \text{mm}$$

Distancia de la fuerza al centro de gravedad de la soldadura

$$Dinc := \frac{357}{25.4} = 14.055 \quad \text{in}$$

Factor de seguridad de la junta
Momento generado

$$M := F2 \cdot Dinc = 773.031 \quad \text{lb-in}$$

$$C1 := \frac{din}{2} = 0.755 \quad \text{in}$$

Distancia del centro de gravedad al momento aplicado

$$h1 := \frac{M \cdot C1}{0.707 I_u \cdot \tau} = 0.08 \quad \text{in}$$

$$h2 := h1 \cdot 25.4 = 2.029 \quad \text{mm}$$

Cordón de soldadura mínimo requerido

Factor de seguridad

$$Sy := 50000 \quad \text{psi}$$

Resistencia a la fluencia

$$Syy := 0.577 Sy = 2.885 \times 10^4$$

Resistencia mínima

$$h3 := \frac{1}{8} \quad \text{in}$$

Cordón mínimo según la Norma AWS

$$\tau2 := \frac{M \cdot C1}{0.707 I_u \cdot h3} = 1.151 \times 10^4 \quad \text{in}$$

⁵² Tabla 9-3 Propiedades a la flexión de soldaduras de filete. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:550

⁵³ Tabla 9-7 Esfuerzo cortante permisible en la garganta de soldadura de filete o de muesca de penetración parcial. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:553

$$n := \frac{S_{yy}}{\tau_2} = 2.507$$

Factor de seguridad de la junta

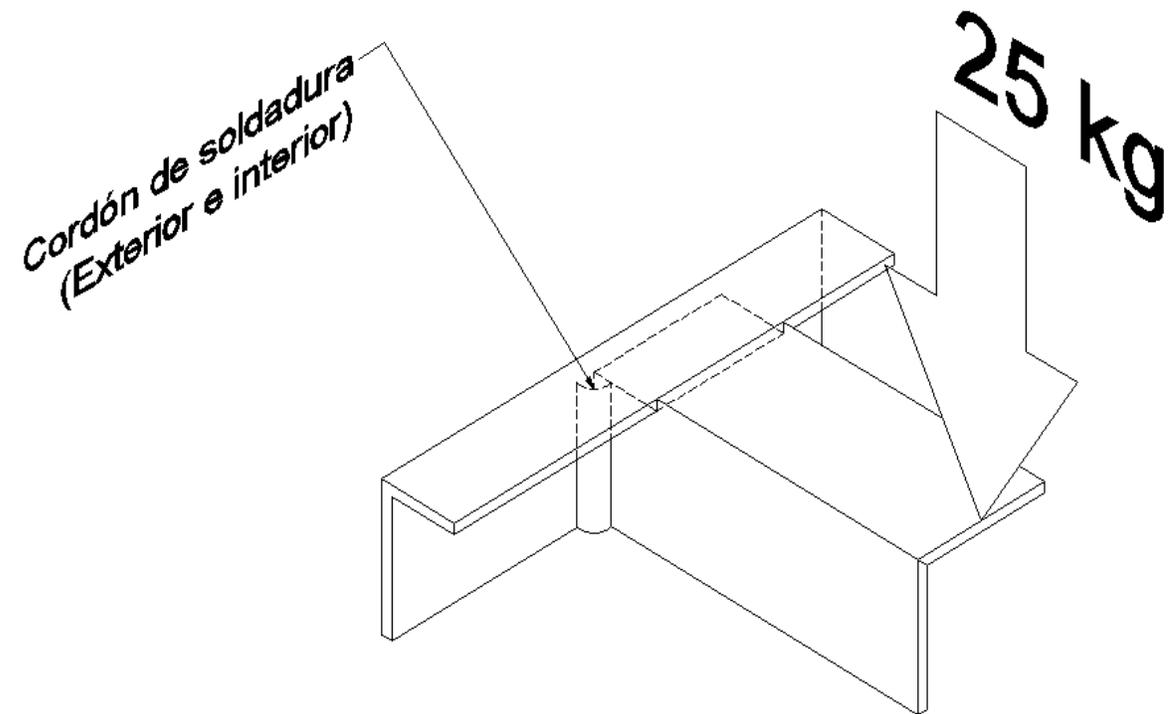


Figura 4.125 Gráfico de la ubicación de los cordones de soldadura

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

5.1 DIAGRAMAS DE CONSTRUCCIÓN

Una vez concluido el diseño empieza la construcción del proyecto. Los diagramas de construcción son herramientas versátiles que ayudarán al rápido entendimiento del proceso de elaboración de las piezas mecánicas. Estos diagramas cuentan con la siguiente simbología:

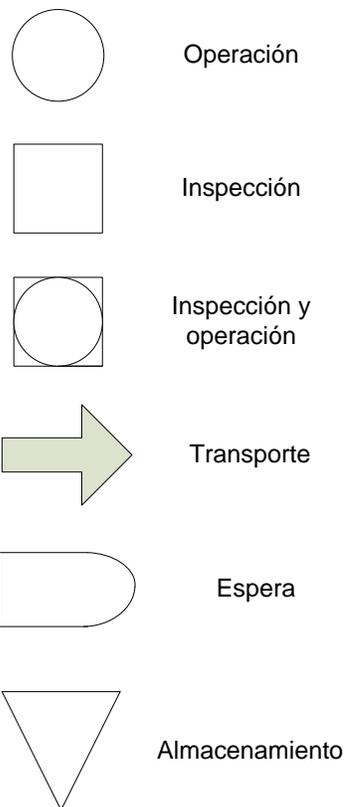


Figura 5.1 Simbología utilizada en los diagramas de construcción

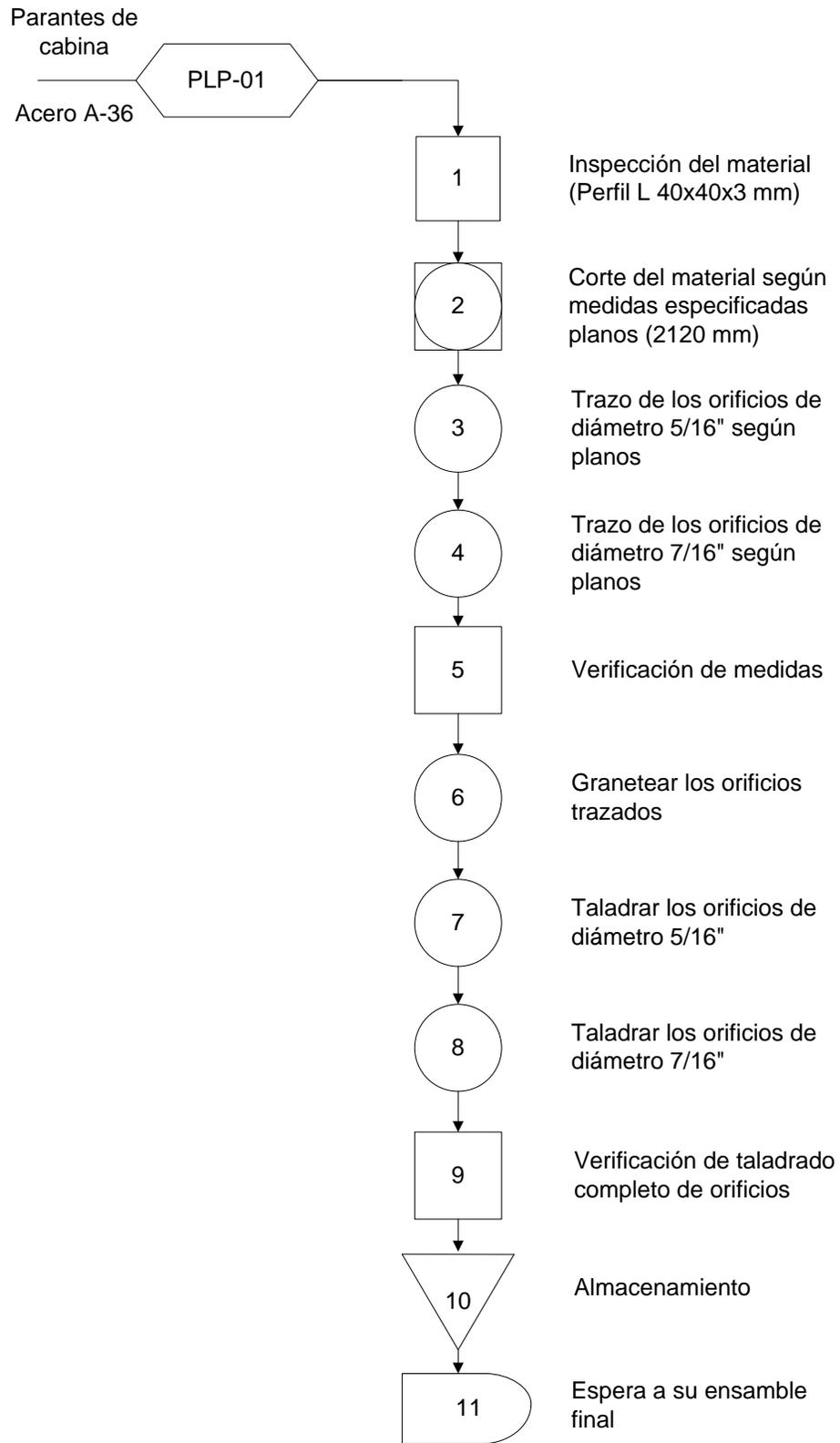


Figura 5.2 Construcción de los parantes de la cabina

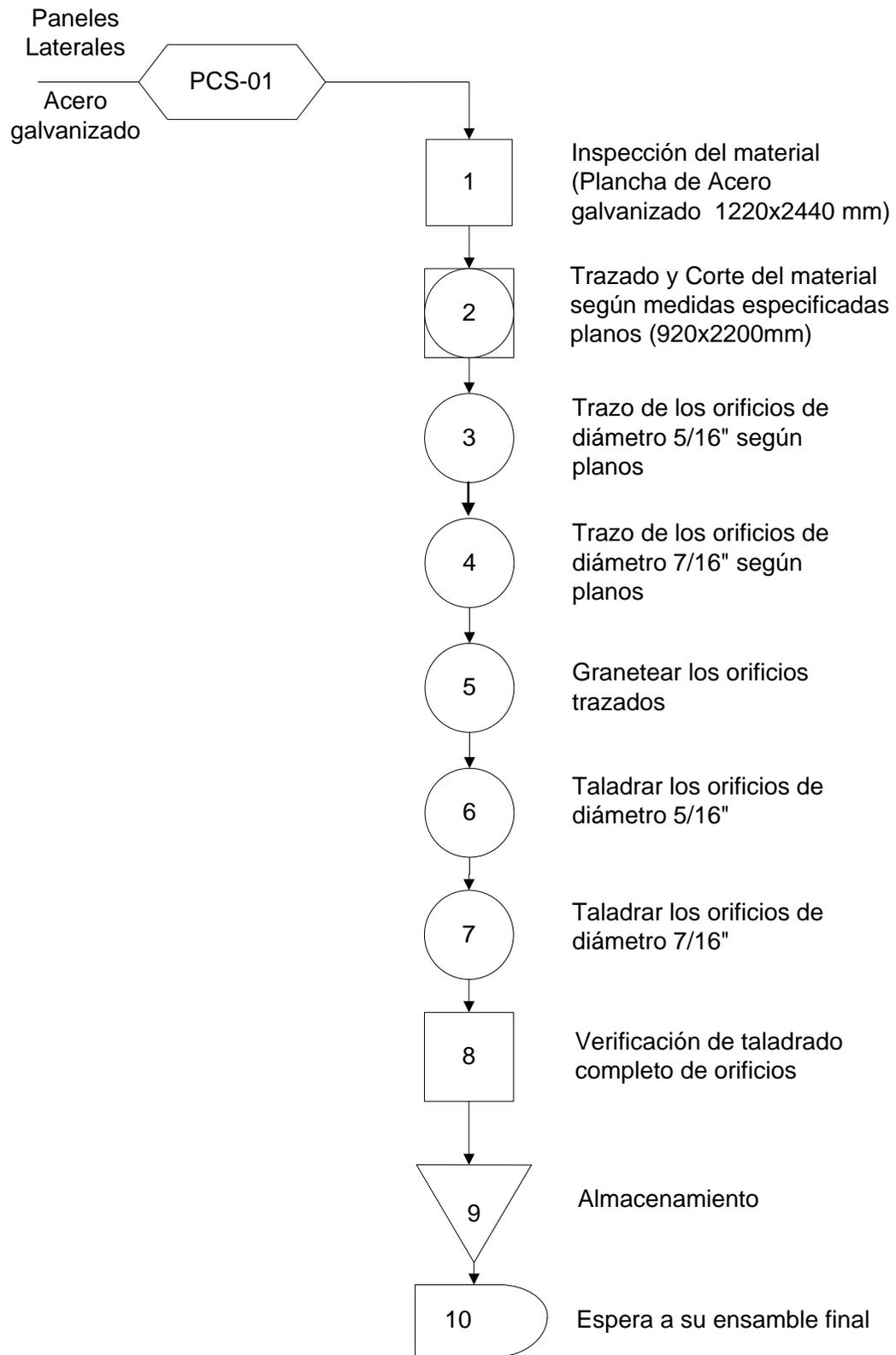


Figura 5.3 Construcción de los paneles laterales de la cabina

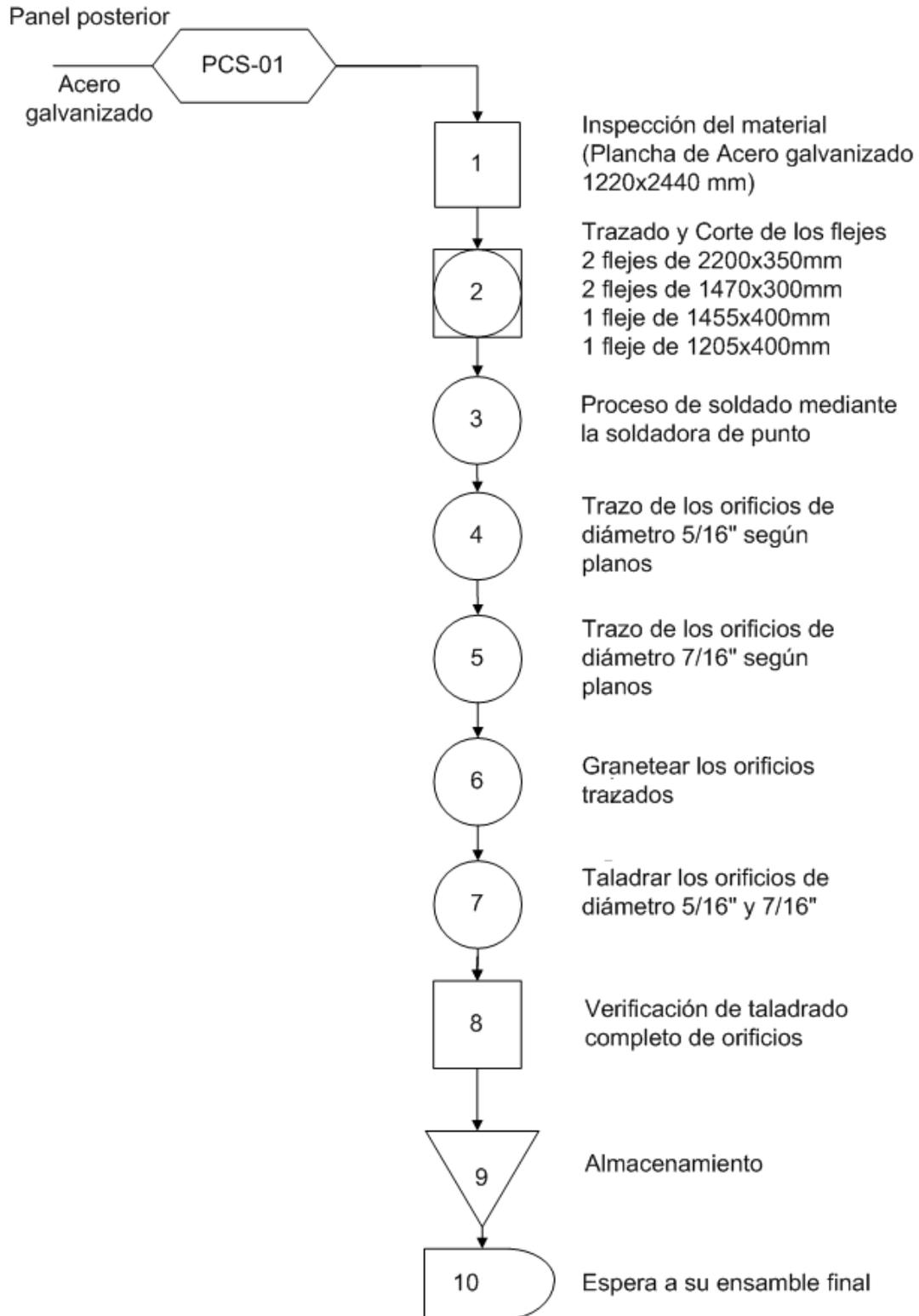


Figura 5.4 Construcción del panel posterior de la cabina

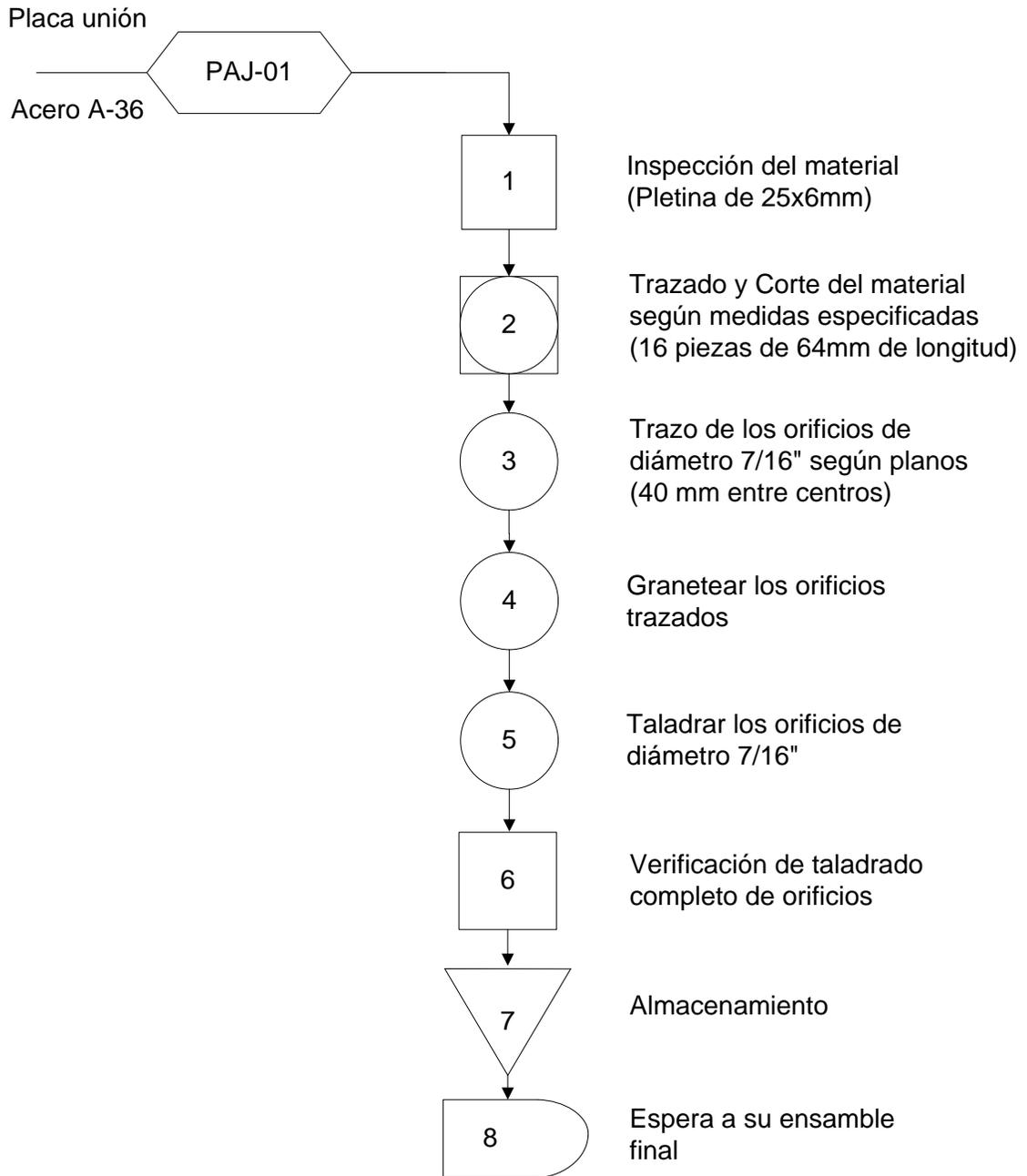


Figura 5.5 Construcción de las placas unión de la cabina

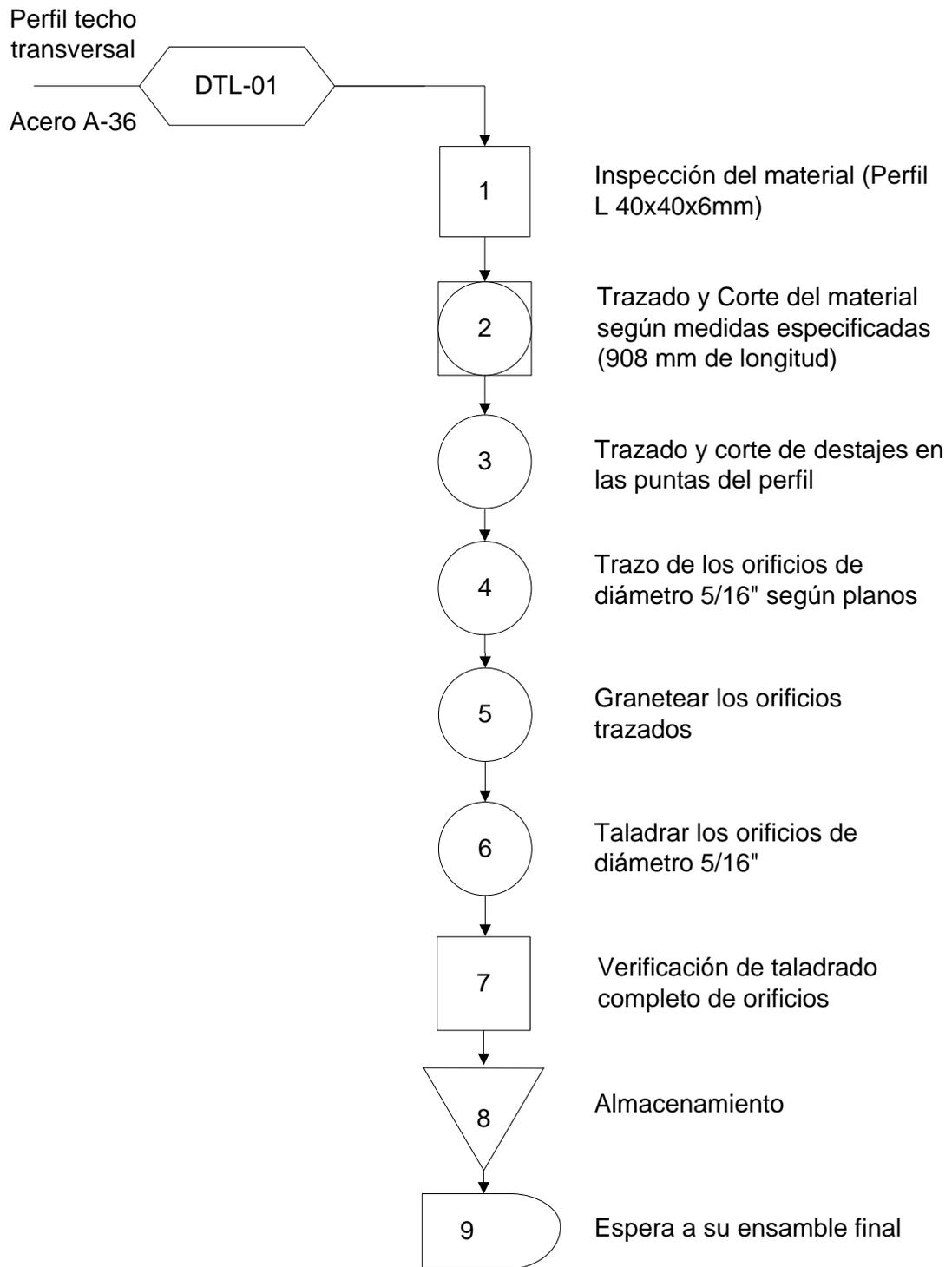


Figura 5.6 Construcción del perfil transversal del techo de la cabina

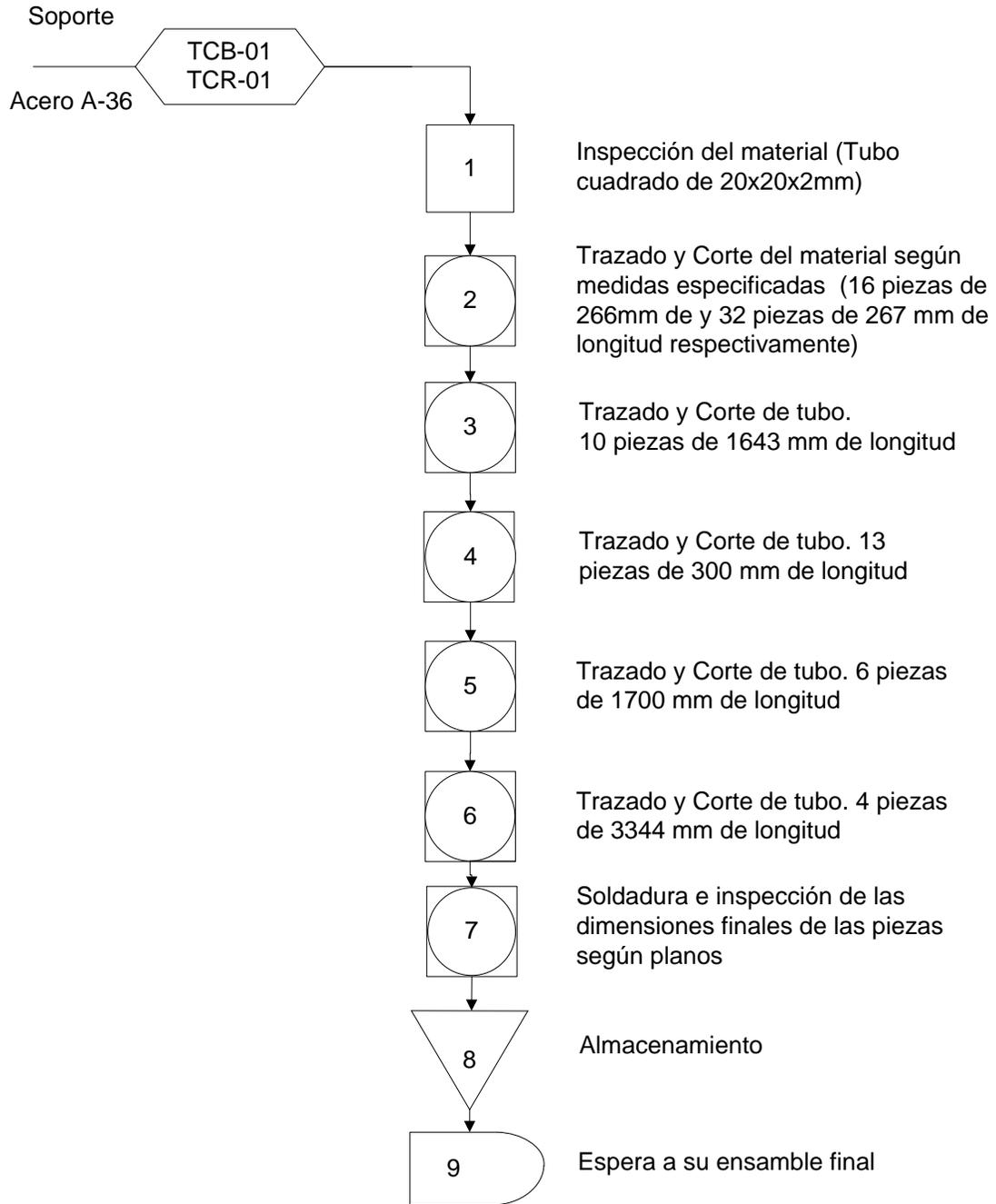


Figura 5.7 Construcción del soporte

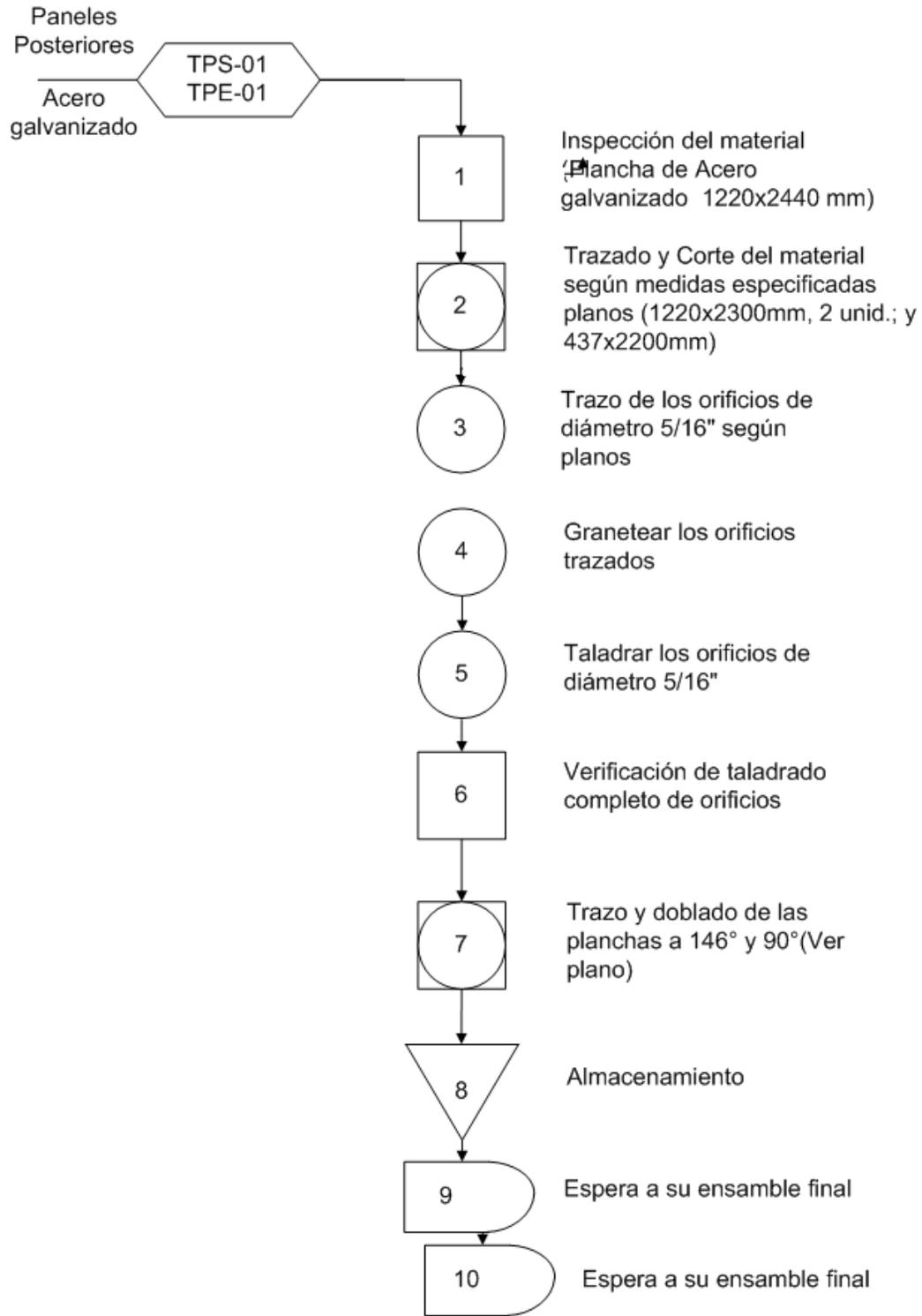


Figura 5.8 Construcción de los paneles posteriores del cuarto de succión

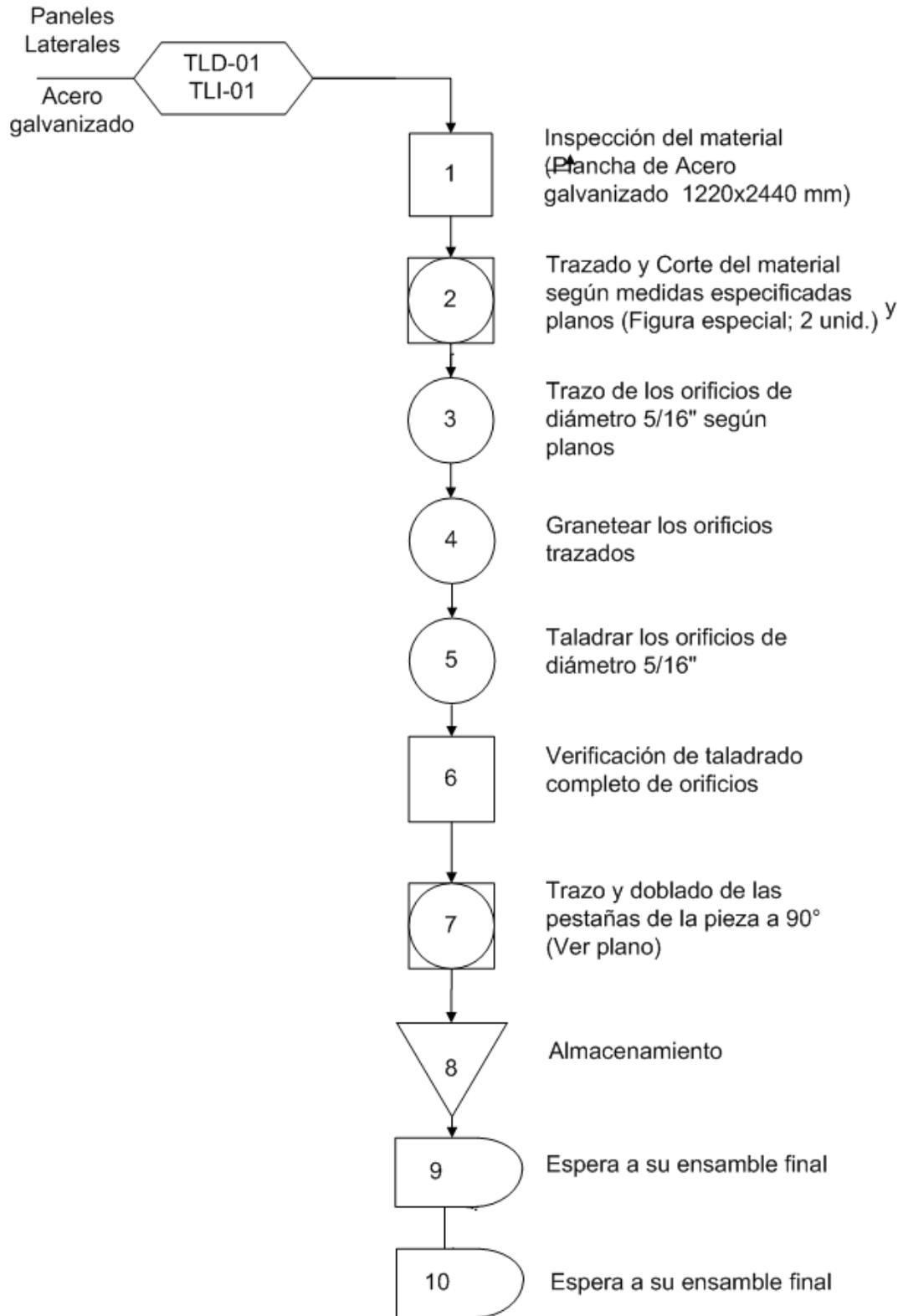


Figura 5.9 Construcción de los paneles laterales del cuarto de succión

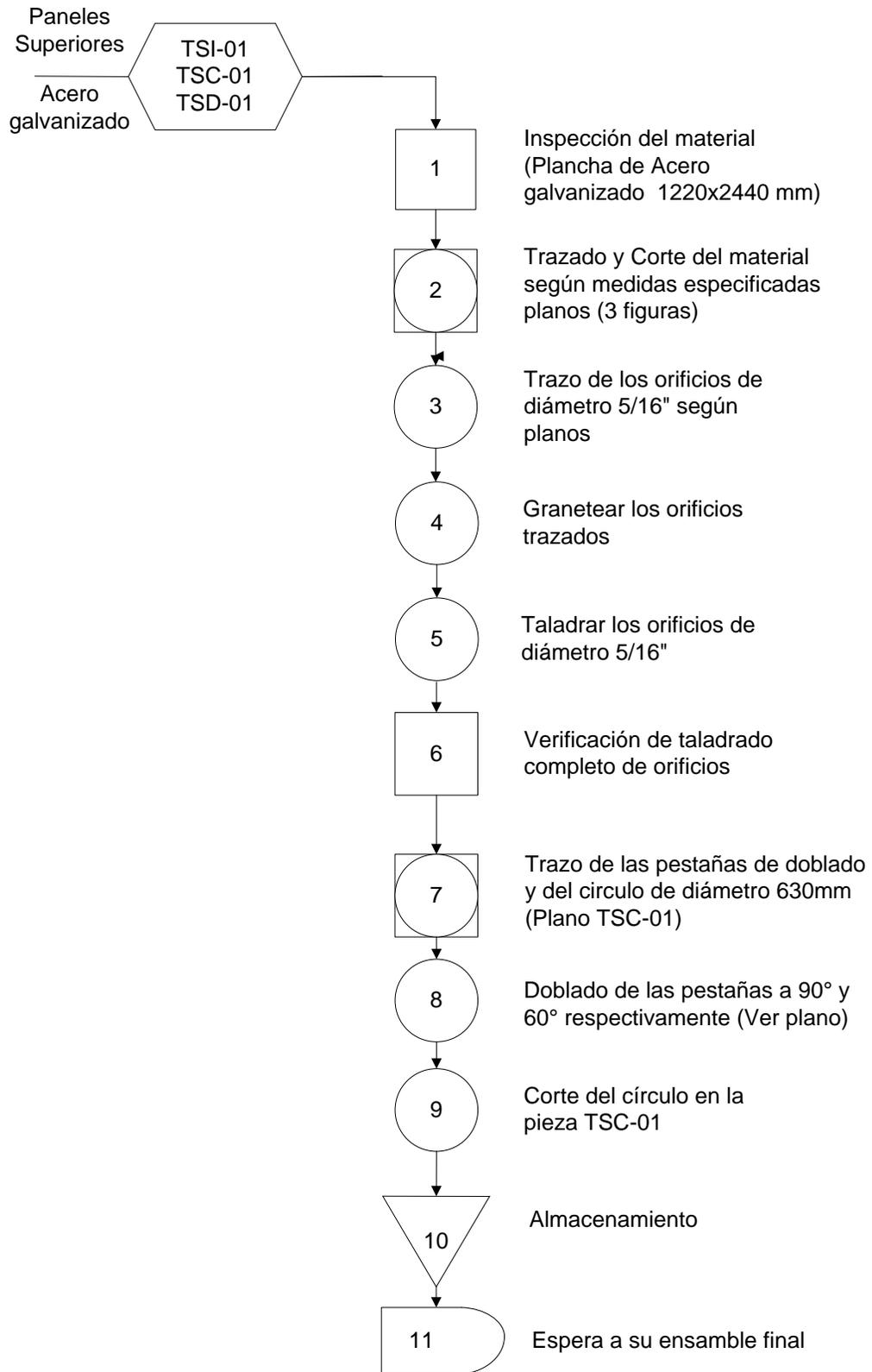


Figura 5.10 Construcción de los paneles superiores del cuarto de succión

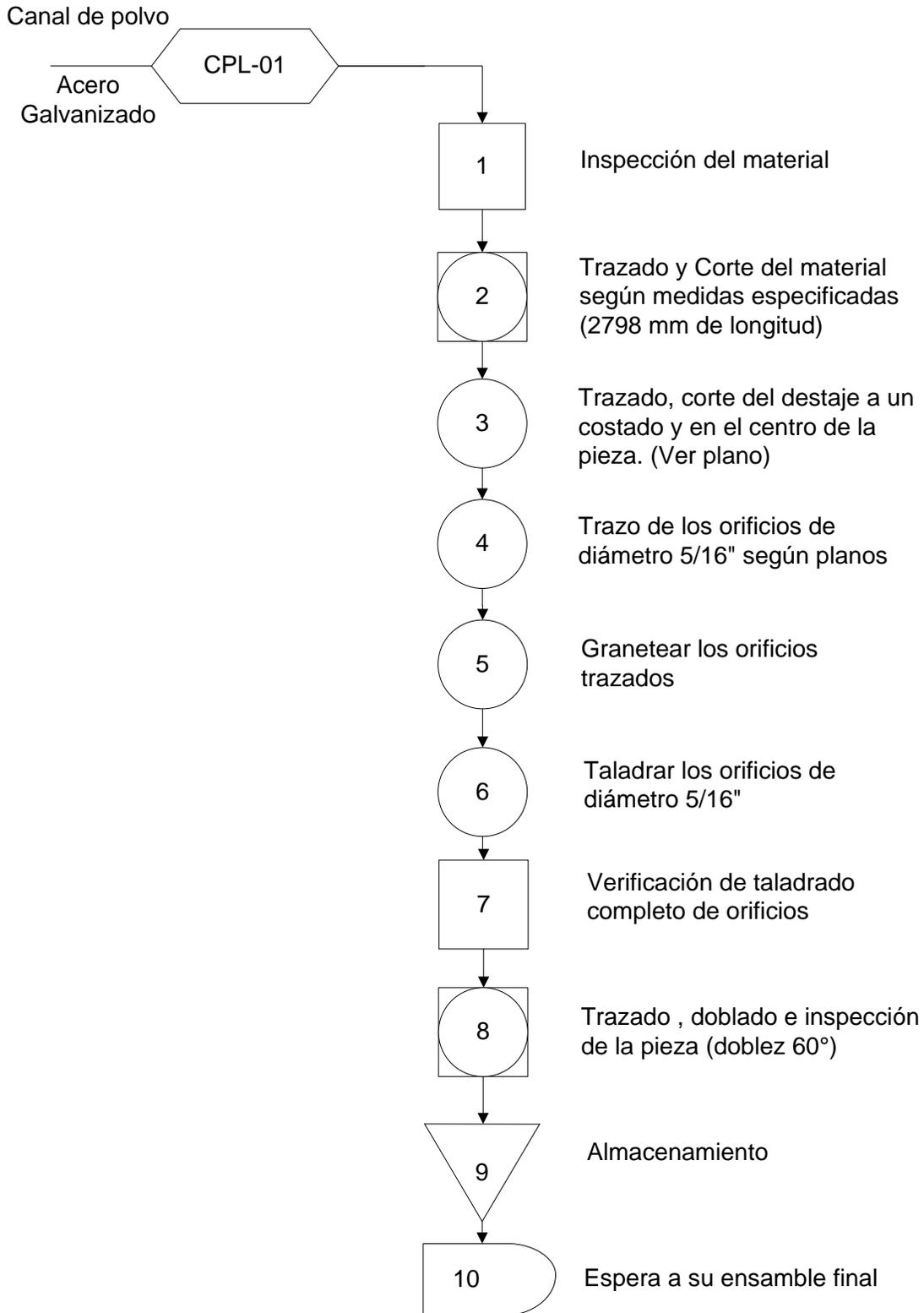


Figura 5.11 Construcción del canal de polvo de recolección del cuarto de succión

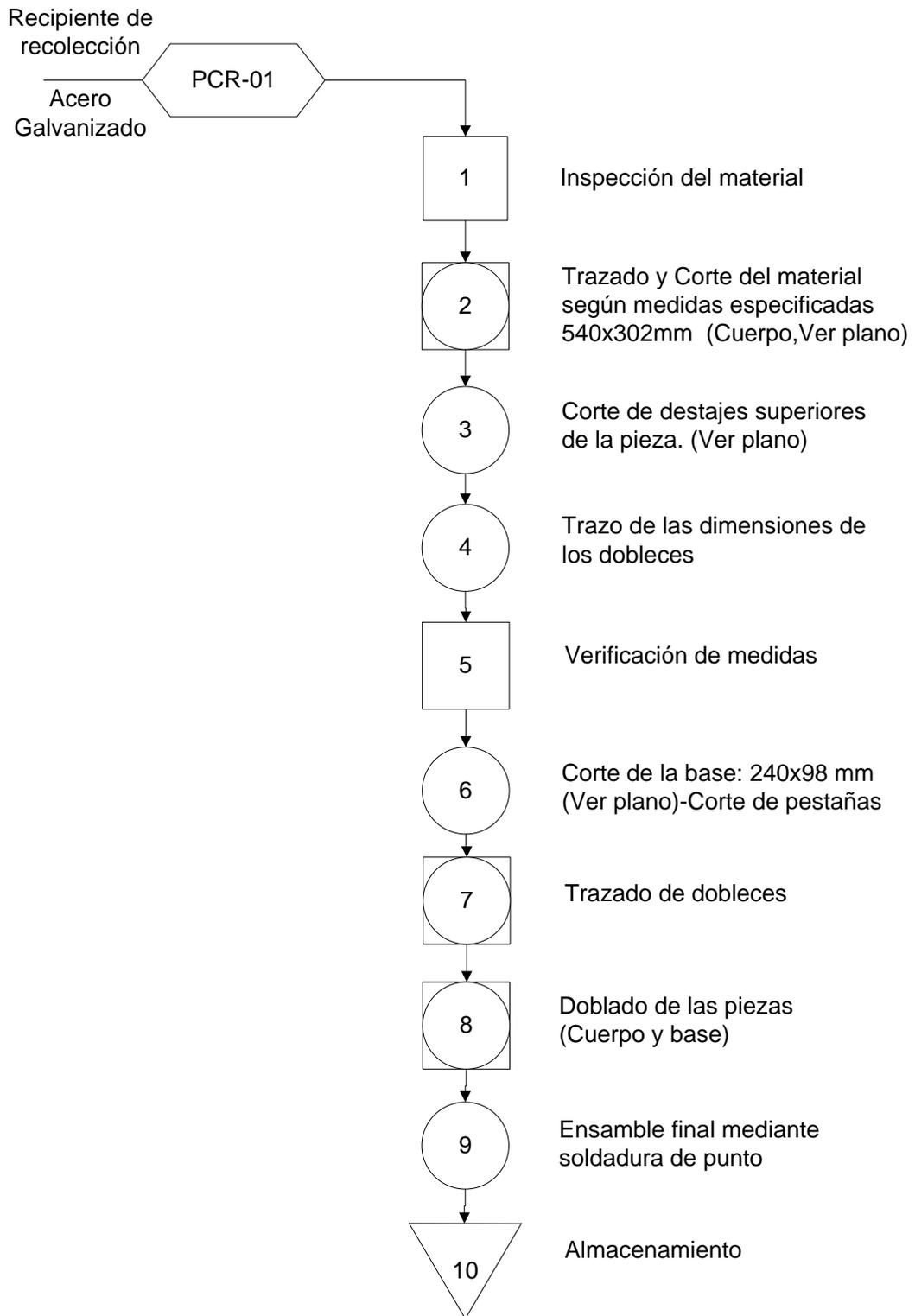


Figura 5.12 Construcción del recipiente de recolección del cuarto de succión

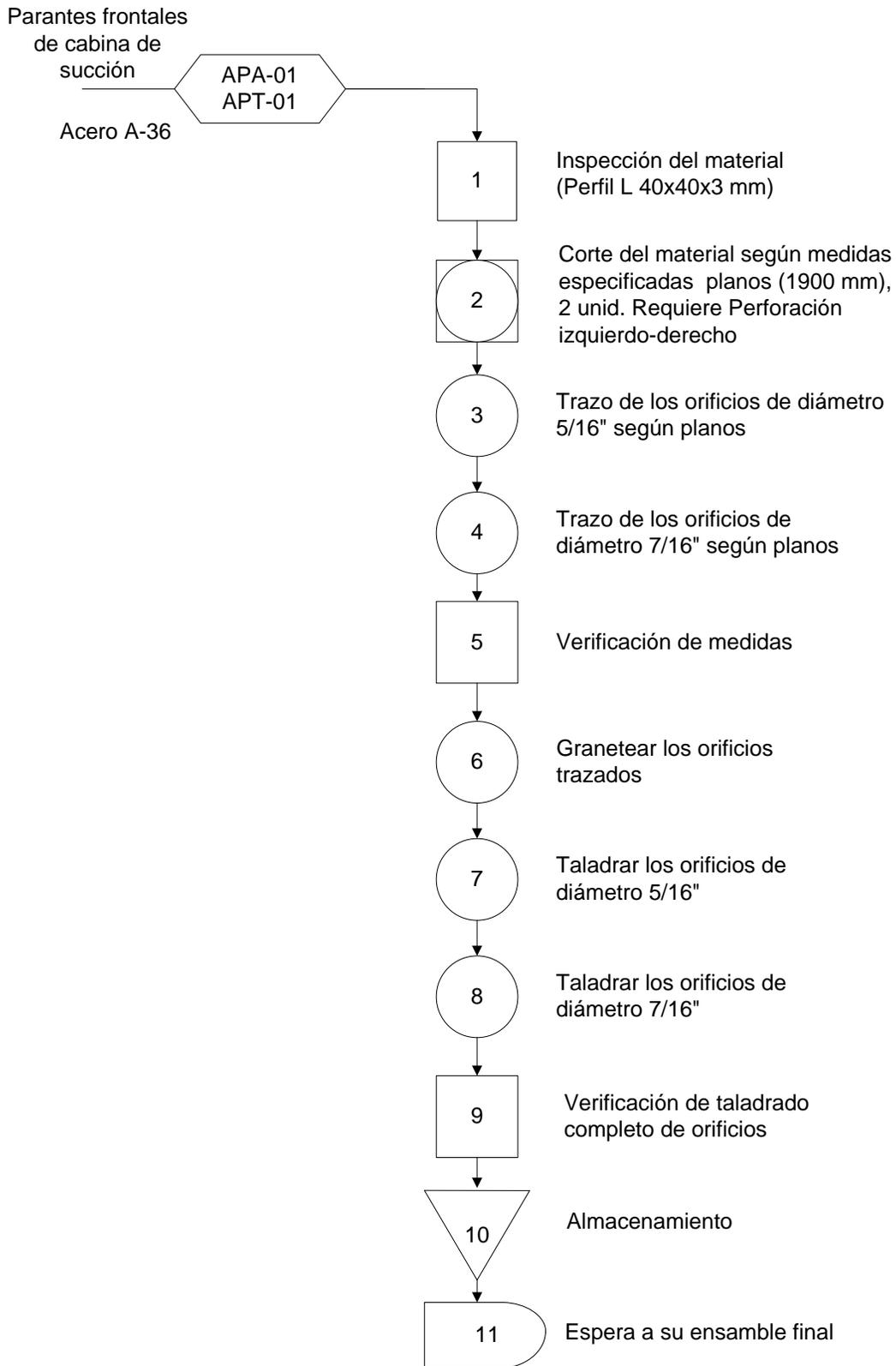


Figura 5.13 Construcción de los perfiles frontales del cuarto de succión

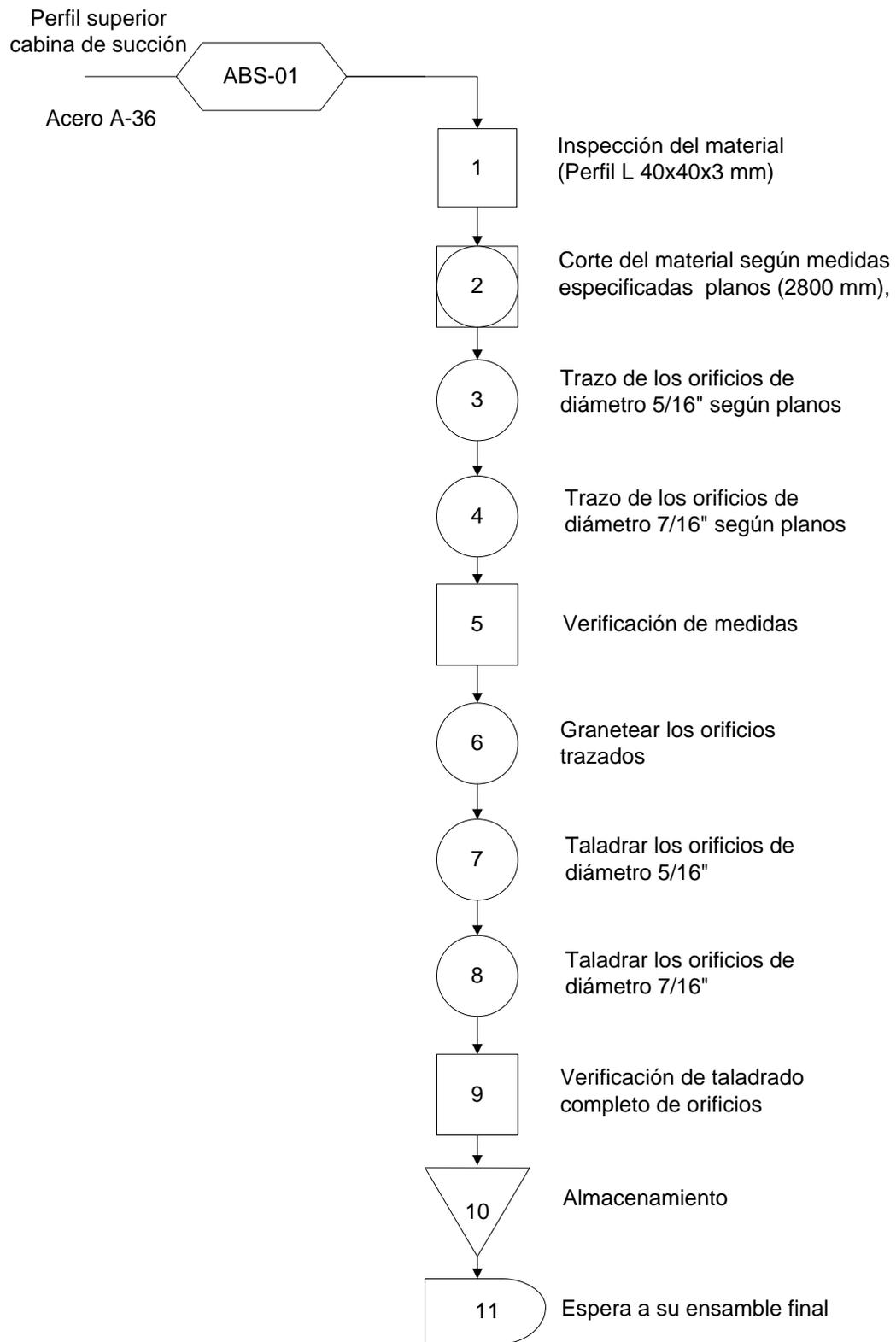


Figura 5.14 Construcción del perfil superior del cuarto de succión

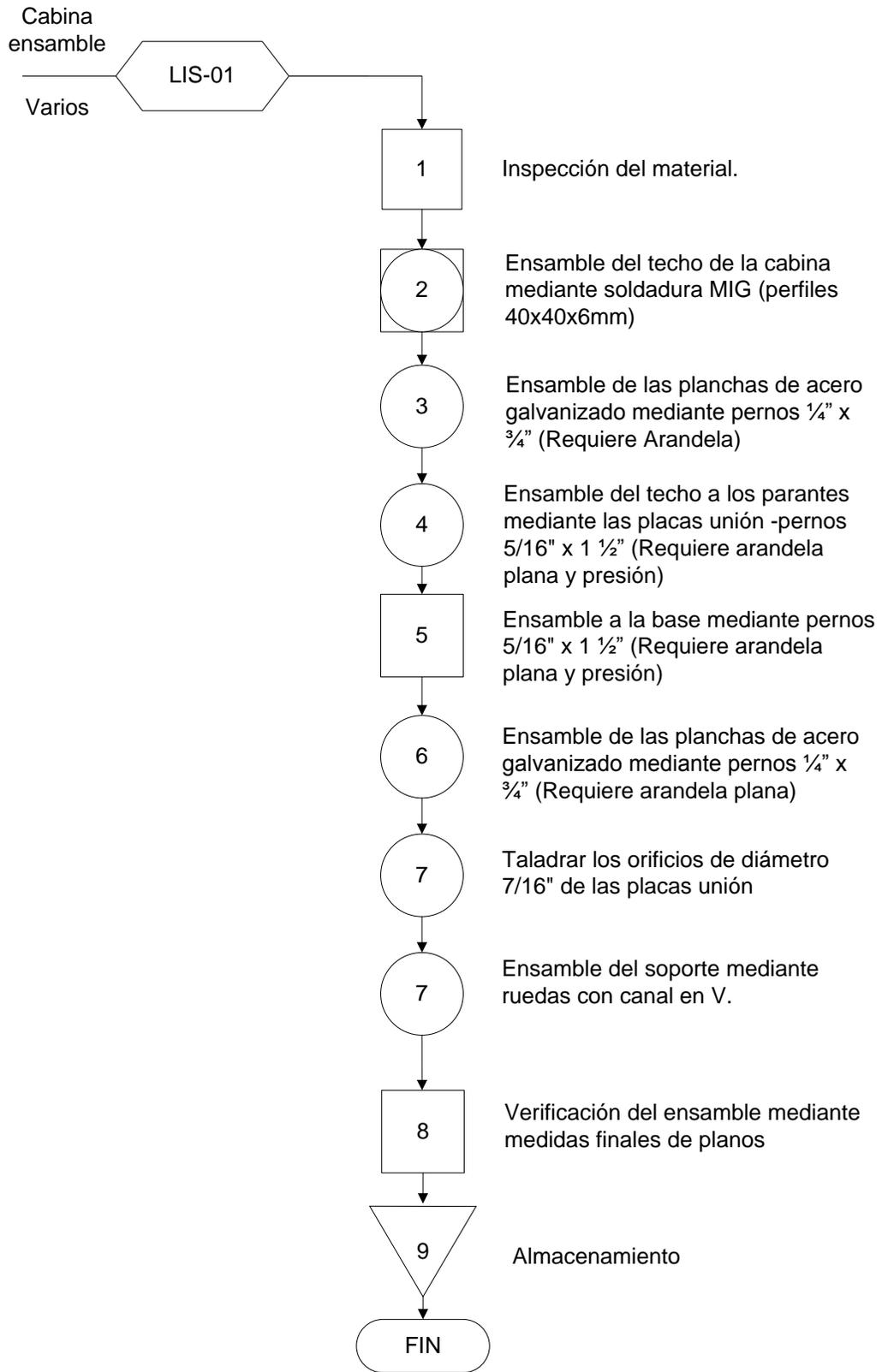


Figura 5.15 Ensamble final de la cabina de pintura

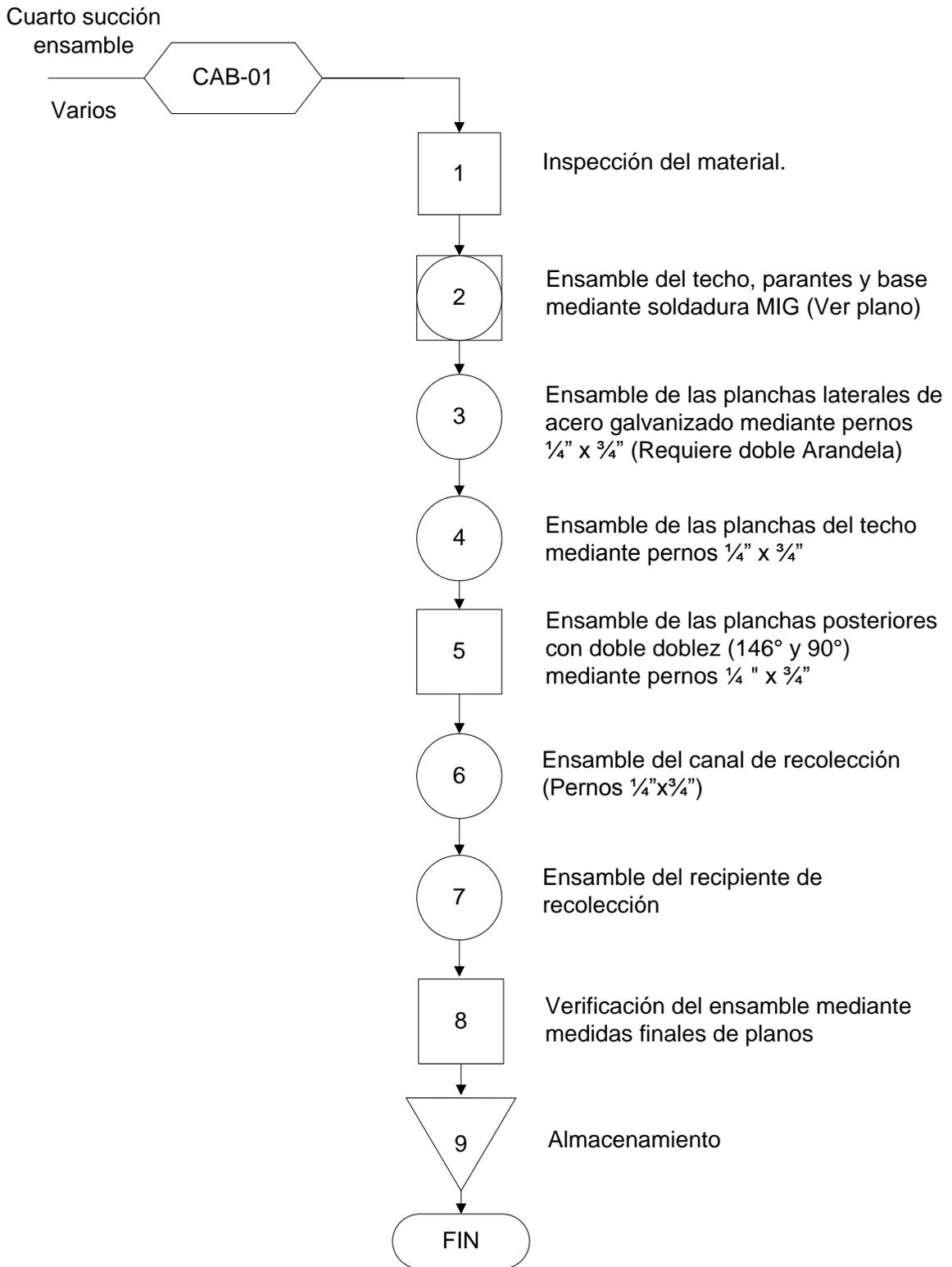
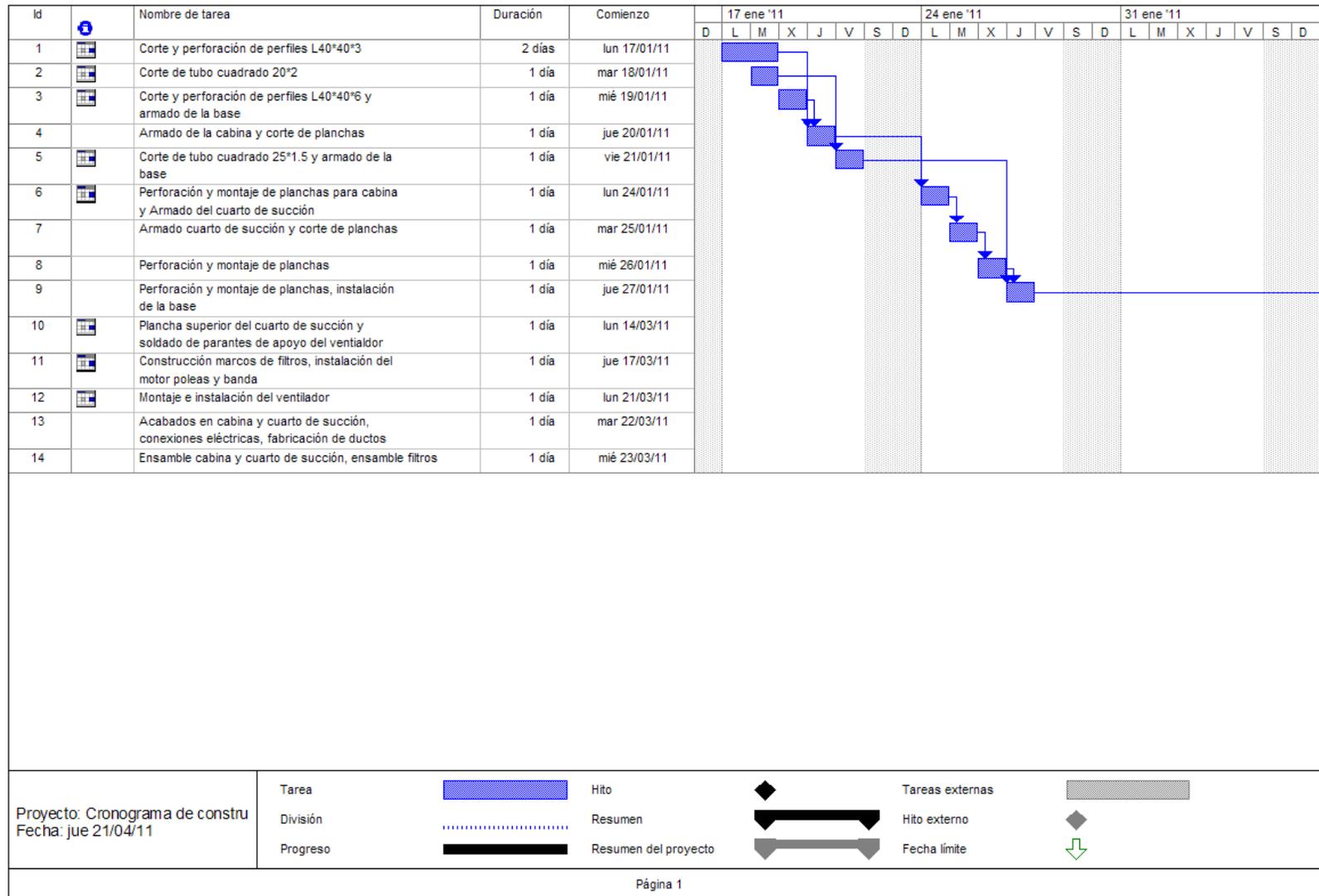


Figura 5.16 Ensamble final del cuarto de succión

5.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



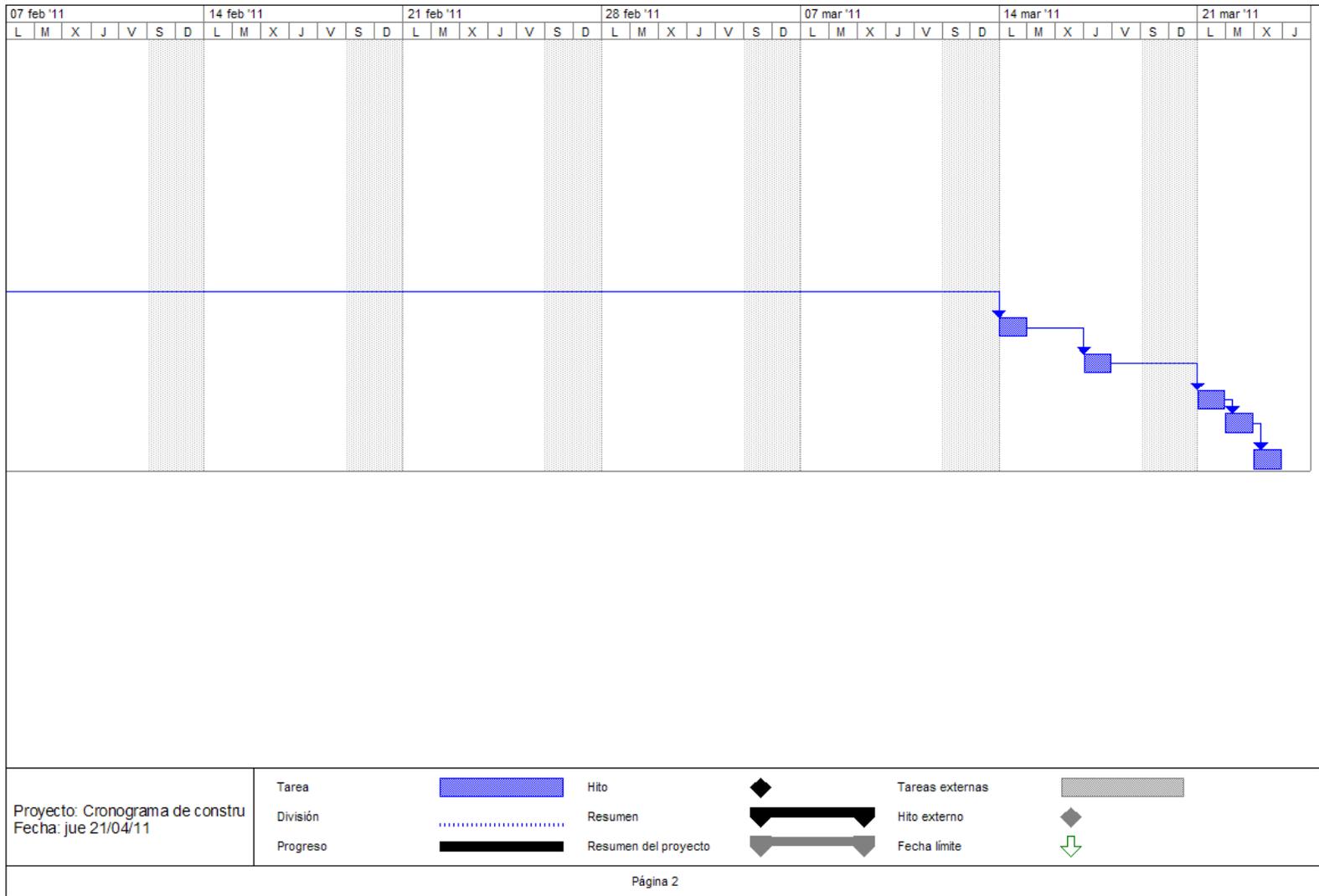


Figura 5.17 Cronograma de actividades

5.3 MEDIOS PARA LA FABRICACIÓN

5.3.1 MATERIALES

Los materiales son elementos agrupados en un conjunto el cual es, o puede ser, usado con algún fin específico.

Es esta sección se detallarán cada uno de los materiales de los cuales está compuesta la cabina y cuarto de succión.

5.3.1.1 Parantes y perfiles base de la cabina

Las parantes de la cabina de pintura y del cuarto de succión fueron construidos de perfiles tipo L de acero A-36. El perfil consta de las siguientes dimensiones: 40x40x3mm.

Estos parantes deben ser perforados con brocas de diámetros de 5/16" y 7/16" según planos. Algunos de los parantes necesitan un destaje adicional para su montaje.

5.3.1.2 Techo de la cabina (vigas transversales y longitudinales)

Estos elementos fueron construidos de perfil tipo L de 40x40x6mm ya que necesitan de mayor rigidez según los parámetros de diseño establecidos.

Necesitan ser perforados mediante brocas con diámetros 5/16" y 7/16" según planos. La cubierta del cuarto de succión está construida de perfiles en L de 40x40x3mm.

5.3.1.3 Paneles laterales, superiores y posteriores de la cabina y cuarto de succión

Estos paneles fueron construidos de plancha de acero galvanizado de espesor 0.75mm las cuales debieron ser perforadas mediante brocas con diámetros de

5/16" y 7/16" según planos. Algunas de estas planchas necesitan entrar en un proceso de doblado para adecuarlas al diseño.

5.3.1.4 Estructura del cuarto de succión

Todos los elementos de esta estructura son perfiles tipo L de 40x40x3mm por facilidad de compra del material y de montaje, con la configuración calculada en el software SAP2000 para poder soportar las cargas de diseño. Estos perfiles necesitan ser perforados mediante brocas con diámetros 5/16" y 7/16" según planos.

5.3.1.5 Estructura de la base

Los materiales utilizados para la base son perfiles cuadrados de 20x20x1.5mm y 25x25x1.5mm, todos unidos mediante soldadura. Para la parte superior de la base se utilizan 2 planchas de acero al carbono de 3mm como superficie de trabajo para asentar los distintos muebles y para que los operarios puedan pararse sin que se flexionen o deformen las planchas.

5.3.1.6 Elementos de sujeción

Las planchas principales están unidas a la cabina mediante pernos 1/4"x 3/4" grado 5, además se necesitan de arandelas planas y su respectiva tuerca. La rigidez de estos pernos es la mínima comercial ya que solamente necesitan sujetar las planchas y no necesitan estar sometidos a ningún esfuerzo adicional.

Los parantes están sujetos del techo mediante pernos 3/8"x1 1/2" grado 5; estos necesitan arandelas planas y de presión por su condición de ser elementos de sujeción principales.

5.3.2 MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS

5.3.2.1 Máquinas

Taladro de pedestal

Este tipo de taladro tiene mayor precisión y potencia que la de un taladro manual. Está construida por una sólida columna de fundición que forma un eje rígido sobre el cual se desplazan los diferentes elementos de la máquina.

En el proyecto realizado esta máquina se utilizó para la perforación de los agujeros de 5/16" y 7/16" en los perfiles L.



Figura 5.18 Taladro de pedestal

Soldadora GMAW

Es una máquina que realiza el proceso de soldadura que emplea un electrodo continuo de metal de aporte y protegido por un gas suministrado externamente. En esta soldadura el gas no participa en modo alguno en la reacción de soldadura. Su función es proteger la zona crítica de la soldadura de oxidaciones e impurezas exteriores.



Figura 5.19 Soldadora GMAW

Dobladora manual

Es una máquina que permite realizar dobleces en láminas de acero de diferente espesor. El equipo cuenta con accesorios que le permiten realizar fácilmente su trabajo. La forma de realizar el doblado es realmente fácil mediante un mecanismo de palanca y contrapesos que permite multiplicar la fuerza del operador.



Figura 5.20 Dobladora de tol

Cizalla automatizada

Esta máquina sirve para el corte de planchas de hasta 3mm y consta de última tecnología ya que posee un sistema de control numérico el cual le permite realizar cortes con suma precisión únicamente insertando las dimensiones en el tablero de control.



Figura 5.21 Cizalla automatizada

Amoladora

Es una máquina que trabaja mediante la rotación de su eje principal a altas revoluciones y que es utilizada para muchas aplicaciones entre ellas corte, pulido, desbaste, corte de cerámica etc. Es la máquina más común en talleres metalmecánicos.



Figura 5.22 Amoladora

Taladro manual

Estas máquinas tienen tipos muy variados y están formados por un bloque muy compacto que consta de un motor que hace girar un eje a través de un reductor de velocidades. Es una máquina muy útil para lugares de difícil acceso en los cuales se necesitan realizar perforaciones.



Figura 5.23 Taladro manual

Máquina Pullmax

Esta máquina cuenta con un motor eléctrico que a través de un mecanismo le permite mover una cuchilla oscilatoriamente en sentido vertical para el corte de distintas formas en planchas de tol. Esta máquina se utilizó en el corte de varias piezas de difícil geometría y acceso para un tijera de tol normal.



Figura 5.24 Máquina Pullmax

Cizalla manual

Consta en su cuchilla de corte de una ligera inclinación la cual le permite alinear la plancha de tol de manera que exista una gran precisión en el corte. Es utilizada para espesores pequeños y requiere de la sujeción de la plancha mediante palancas de aprisionamiento.



Figura 5.25 Cizalla manual

Tronzadora

Es una máquina utilizada para el corte a un ángulo determinado a derecha e izquierda del plano normal de contacto del disco, pudiendo cortar asimismo a bisel.

Para efectuar los cortes, el operario deposita la pieza sobre la mesa contra la guía-tope posterior, selecciona el ángulo de corte y aproxima el disco a la pieza accionando el brazo destinado al efecto.



Figura 5.26 Tronzadora

Soldadora de punto (RSW)

La soldadura por puntos se basa en presión y temperatura. Dos piezas se sueldan entre sí cuando una parte de ellas se calienta a temperaturas próximas a la fusión y se hace presión entre ellas. En el caso de esta soldadura el calentamiento de la pieza se hace por corriente eléctrica entre dos electrodos y la presión la realizan precisamente estos electrodos en forma de pinza.

Como generalmente la resistencia de las piezas a soldar es muy baja la corriente que debe pasar por la zona a soldar debe ser muy alta del orden de los 500 amperios, pero sin embargo los voltajes son muy bajos, de 1 a 3 voltios.



Figura 5.27 Soldadora por puntos (RWS)

Esmeril de banco

Se trata de una herramienta para afilar las herramientas y limpiar metales. Un esmeril de banco puede hacer el filo de las herramientas en forma cuadrada y aguda, reparar destornilladores, mechas y las puntas de punzones.



Figura 5.28 Esmeril de banco

5.3.2.2 Herramientas

La utilización de herramientas adecuadas en el proyecto es sin duda un recurso que al ser empleado eficientemente nos provee un ahorro de tiempo se construcción y reduce el esfuerzo del operador.

Entenalla

Es una herramienta que se utiliza para la sujeción de partes mecánicas mediante sus muelas y un tornillo sin fin móvil. Se emplea para distintas aplicaciones de sujeción.



Figura 5.29 Entenalla

Playo de presión

Es una herramienta de sujeción que consta de un tornillo de ajuste el cual permite calibrar la sujeción y la fuerza de presión para distintos espesores.



Figura 5.30 Playo de presión

Arco de sierra

Se denomina sierra manual a una herramienta manual de corte que está compuesta de dos elementos diferenciados. De una parte está el arco o soporte donde se fija mediante tornillos tensores la hoja de sierra y la otra parte es la hoja de sierra que proporciona el corte.



Figura 5.31 Arco de sierra

Broca

Es una herramienta de corte que se emplea para perforar orificios de diferentes diámetros. Existe diversidad de medidas, se fabrican de muchos materiales para distinto tipo de resistencia.



FIG 5.32 Broca HSS

Martillo

Es una herramienta utilizada para golpear una pieza, causando su desplazamiento o deformación. El uso más común es para clavar, calzar partes (por la acción de la fuerza aplicada en el golpe que la pieza recibe) o romper una pieza. Los martillos son a menudo diseñados para un propósito especial, por lo que sus diseños son muy variados.



Figura 5.33 Martillo de uña

Juego de racha

Son herramientas que tienen forma hexagonal y sirven para el ajuste y afloje de pernos con gran facilidad. Consta de una palanca en la cual se incrusta el dado (racha).



Figura 5.34 Juego de racha

Llaves mixtas (boca-corona)

Las llaves de apriete son las herramientas manuales que se utilizan para apretar elementos atornillados mediante tornillos o tuercas con cabezas hexagonales principalmente.



Figura 5.35 Llave mixta

Granete

Se denomina granete a una herramienta manual que tiene forma de puntero de acero templado afilado en un extremo con una punta de 60° aproximadamente que se utiliza para marcar el lugar exacto que se ha trazado previamente en una pieza donde haya que hacerse un agujero, cuando no se dispone de una plantilla adecuada.



Figura 5.36 Granete

Flexómetro

El flexómetro o cinta métrica es un instrumento de medición, con la particularidad de que está construido en chapa metálica flexible debido su delgado espesor, dividida en unidades del sistema métrico e inglés, y que se enrolla en espiral dentro de una carcasa metálica o de plástico. Dispone de un sistema de freno o anclaje para impedir el enrollado automático de la cinta, y mantener fija alguna medida precisa de esta forma.



Figura 5.37 Flexómetro

Escuadra

La escuadra que se utiliza en los talleres es de acero, puede ser de aleta o plana y se utiliza básicamente para trazado y la verificación de perpendicularidad de las piezas mecanizadas.



Figura 5.38 Escuadra

Tijera de tol

Es una herramienta similar a una tijera tradicional con la diferencia que sus cuchillas son diseñadas especialmente para el corte de tol. Se puede utilizar para corte rectilíneo o curvo.



Figura 5.39 Tijera de tol

5.3.3 RECURSO HUMANO

Se denomina recurso humano al trabajo que aporta el conjunto de los empleados o colaboradores a una organización o a un proyecto específico.

En este caso la mano de obra requerida para este proyecto debe ser calificada ya que el trabajo a realizarse debe ser hecho de forma profesional para evitar errores en la construcción y montaje. El personal requerido para este proyecto se detalla a continuación:

- Dos diseñadores responsables de:
 - Diseñar el proyecto.
 - Dirigir y realizar la construcción.
 - Realizar las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del proyecto.
- Un soldador experimentado responsable de:
 - Unir mediante soldadura SMAW Y GMAW todas las uniones de perfiles y planchas.
- Un técnico en motores eléctricos responsable de:
 - Realizar las conexiones eléctricas necesarias.
 - Instalar el tablero de control.
 - Verificar el funcionamiento de las partes eléctricas.

5.4 DIAGRAMAS DE MONTAJE

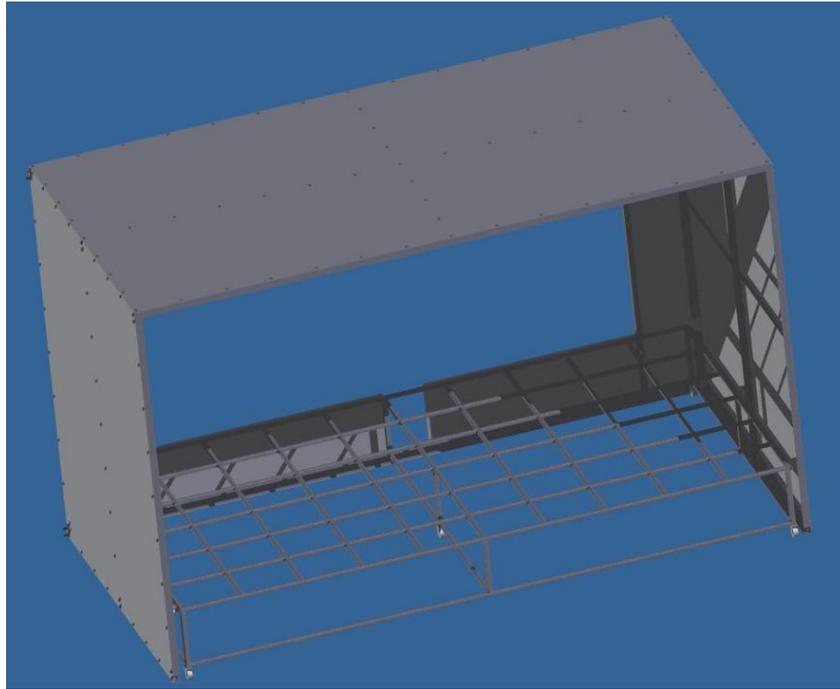


Figura. 5.40 Cabina de pintura ensamblada

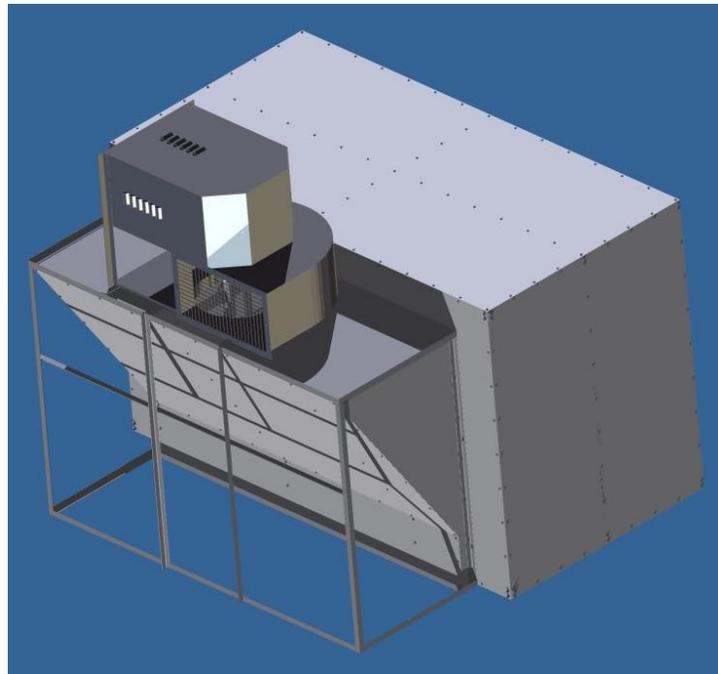


Figura 5.41 Cabina de pintura ensamblada al cuarto de succión, posición para el montaje del ventilador (Vista 1)

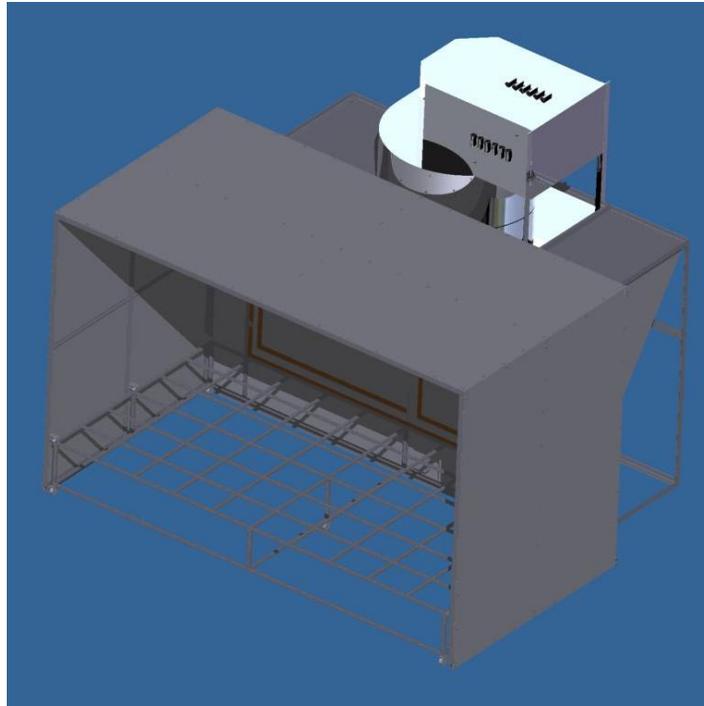


Figura 5.42 Cabina de pintura ensamblada al cuarto de succión, posición para el montaje del ventilador (Vista 2)

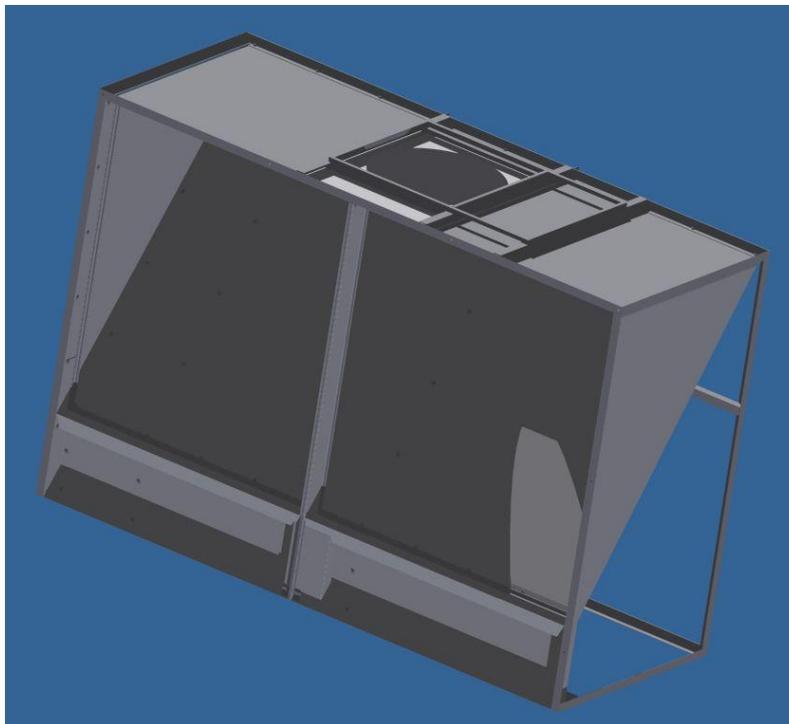


Figura 5.43 Cuarto de succión

5.5 CONEXIONES ELÉCTRICAS

5.5.1 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL ARRANQUE TOGAMI de 22A CON BOTONERA INCLUIDA PARA MOTORES DE HASTA 7.5 HP. MODELO PAK-26JM

(3) • PAK—26JM,35JM,50HM,65HM
PAK—80HM,100HM,125HM,150HM

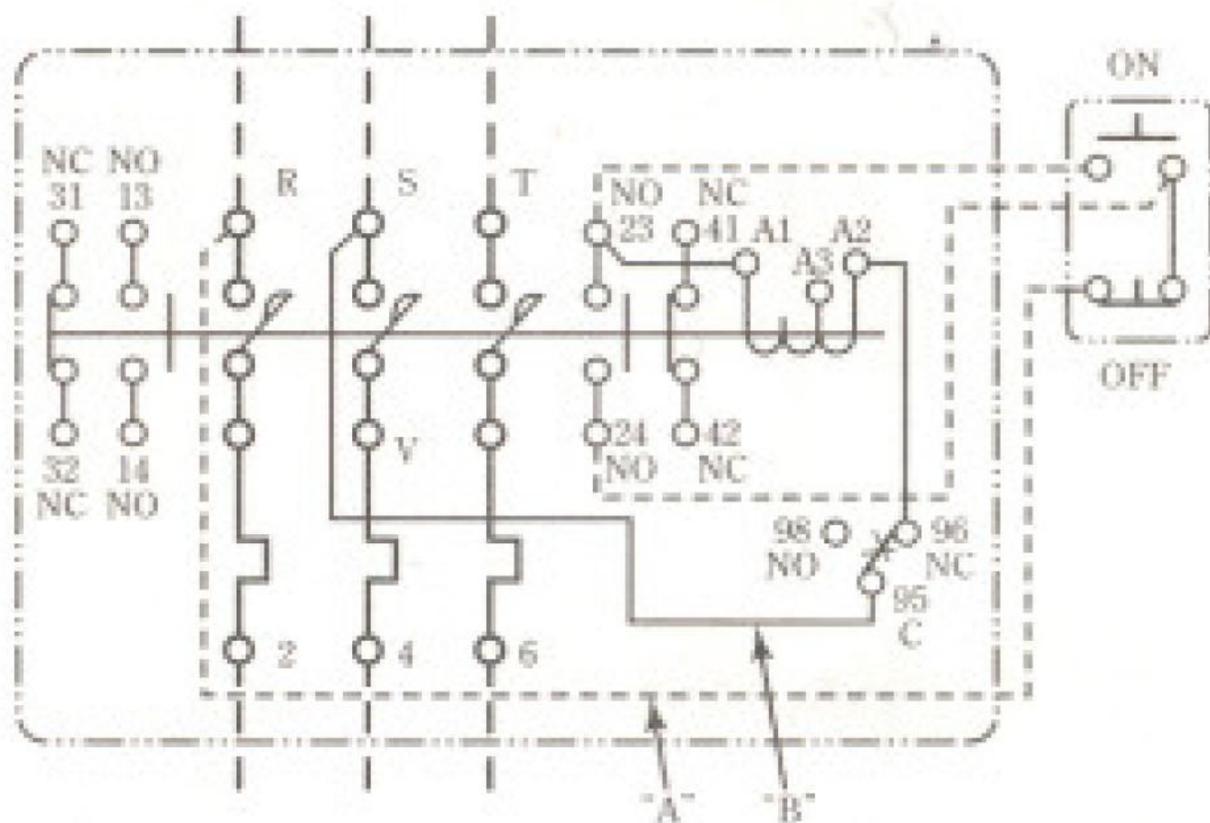


Figura 5.44 Diagrama eléctrico del arranque y protección del motor⁵⁴

⁵⁴ Togami Electric Mfg. Co., Ltd. Manual. Página 3

5.5.2 DIAGRAMA ELÉCTRICO DE LA INSTALACIÓN GENERAL

Las conexiones eléctricas se realizaron mediante la ayuda profesional de un técnico electricista de planta del Centro de Producción.

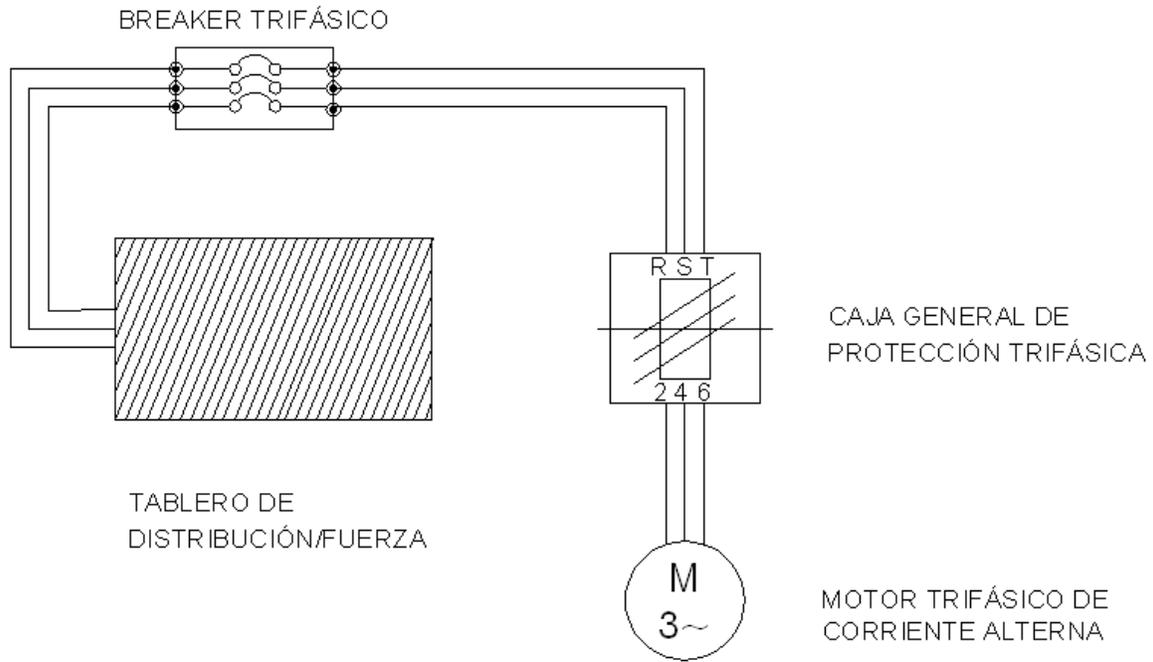


Figura 5.45 Diagrama eléctrico general

5.6 CONEXIONES DE DUCTOS

Los ductos fueron unidos mediante soldadura de resistencia eléctrica de punto RSW y soldadura tipo GMAW.

La instalación y sujeción se realizó con puntos de soldadura GMAW a la boca del ventilador y entre sí.

La configuración de la descarga antes de la sección de ductos recta de 550*650mm tiene la disposición de la figura 5.46.

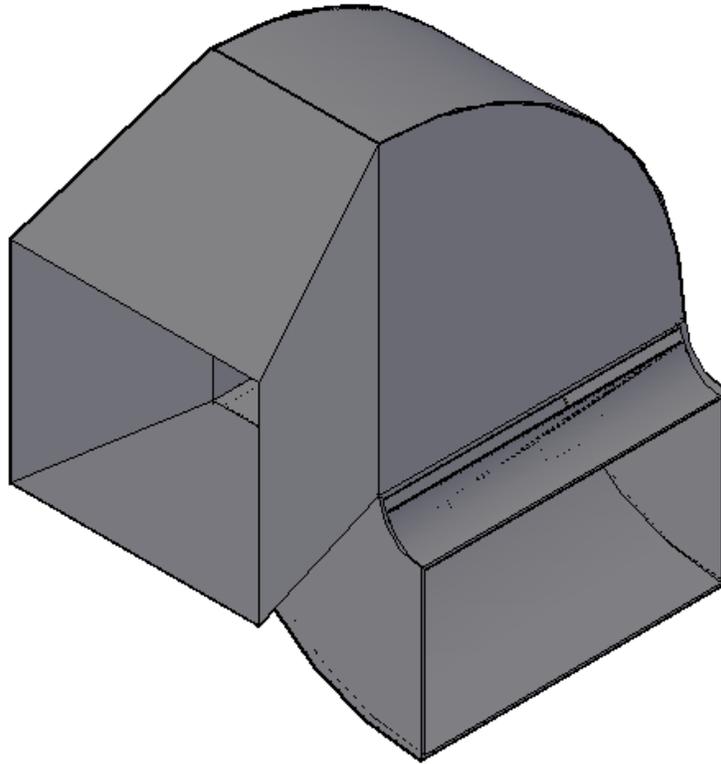


Fig. 5.46 Configuración del ducto de salida⁵⁵

⁵⁵ La razón de la configuración del ducto de salida se debe al poco espacio disponible para la ubicación de la cabina de pintura, sin embargo; esto no afecta mayormente al desempeño del ventilador.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO

6.1 PRUEBA DE HERMETICIDAD

Para realizar esta prueba se procedió de la siguiente manera:

- Se procedió a realizar una inspección visual y táctil de posibles fallas de la hermeticidad especialmente en el cuarto de succión.
- Se sellaron con puntos de suelda GMAW y silicón los orificios o hendiduras encontradas del cuarto de succión para evitar que el ventilador tome aire de cualquier lugar ajeno al establecido en el diseño para de esta manera poder generar la presión negativa necesaria.
- Se encendió el ventilador para comprobar si existe alguna otra falla en la hermeticidad.

6.2 MEDICIÓN DEL PORCENTAJE DE RECOLECCIÓN DE PINTURA EN POLVO

6.2.1 PRUEBAS

Esta prueba se realizó sin la presencia de ningún mueble metálico dentro de la cabina, esto nos aseguró una medida exacta del porcentaje de pintura en polvo que se recolectó dentro del sistema.

Se siguieron los siguientes pasos:

- Pesar 4 libras de pintura en polvo mediante una balanza de apreciación igual a 0,1 lb.
- Se procedió a cargar el equipo electrostático con este material.
- Se encendió el ventilador y se roció la pintura dentro de la cabina simulando la operación de pintado.

- Luego de esto se procedió a extraer las partículas de pintura de los filtros y malla pre-filtrante.
- Se repiten todos los pasos anteriores para realizar otra prueba con un peso de 2 lb.

6.2.1.1 Resultados obtenidos

Luego de haber realizado las pruebas se realizaron las mediciones respectivas encontrando lo siguiente:

Tabla 6.1 Resultados de la prueba

Prueba N°	Lectura inicial (lb)	Lectura final (lb)	Porcentaje de recolección (%)
1	4	2.4	60
2	2	1.5	75
Promedio de recolección			67.5

Conclusión:

El porcentaje de recolección establecido en el proyecto por requisito del Centro de Producción se cumple a satisfacción (60%), aunque la recuperación pudo ser mayor pero ya que en la primera prueba los filtros eran nuevos existe cierta cantidad de partículas que ingresaron dentro de las porosidades de los filtros y no se pudieron recolectar, añadido a esto el desperdicio por adherencia de las partículas de pintura a las paredes, suelo y techo de la cabina, también existe el desperdicio que se adhiere a la ropa del operador y lo que se retiene dentro del equipo de pintura. Por esto es fundamental tener un buen proceso de pintado y una buena calibración del equipo para tener el máximo porcentaje de recolección posible.

El promedio de recolección de ambas pruebas resultó ser de 67.5%, el cual como se observa puede ser mayor ya que la facilidad de recolección aumenta a medida que los filtros se van saturando internamente ya que se forma una capa fina de la pintura en polvo, la cual es de fácil remoción y recuperación.

6.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SISTEMA

El dispositivo utilizado para medir la velocidad del aire dentro de la cabina y el cuarto de succión es un anemómetro electrónico con las siguientes características:

Tabla 6.2 Especificaciones del anemómetro

Unidad	Rango	Resolución	Mínima medida	Precisión
m/s	0-30	0.1	0.1	±5%
ft/min	0-5860	19	39	
Km/h	0-90	0.3	0.3	
Mph	0-65	0.2	0.2	

6.3.1 MEDICIÓN EN LA BOCA DE ENTRADA DEL VENTILADOR

El primer paso es la medición de la velocidad del aire en la boca de succión para comprobar que exista una correcta calibración del ventilador y que corresponda con los valores de la ficha técnica del mismo como sigue a continuación:

Tabla 6.3 Tabla comparativa de las velocidades medidas y calculadas de la boca de entrada del ventilador

Descripción	Valor	Error Aproximado Valor promedio
Valor teórico de la ficha técnica	11.83 m/s	-
Valor de Ansys fluent en la periferia ⁵⁶	4.37-8.28 m/s	$(7-6.33)/6.33*100$

⁵⁶ Valor teórico. Ver Figura 4.37; y compara con contornos de velocidad de las figuras 4.49 y 4.50

Valor medido de la periferia	6-8 m/s	= 10.58%
Valor de Ansys Fluent en el centro ⁵³	10.6-11.8m/s	(11.75-11.2)/11.2
Valor medido en el centro	11-12.5 m/s	*100 = 4.91%

Conclusión:

Los valores que contiene la tabla son intervalos ya que tanto el software Ansys Fluent que muestra los resultados utilizando una escala de colores, como al medir con el anemómetro en la boca abierta del ventilador no se pueden obtener valores exactos por la interpretación en el código de colores así como las dificultades en la medición. Por la tanto el valor de error es aproximado siendo estos del orden de 11% y 5% en la periferia y centro de la boca del ventilador respectivamente.

6.3.2 MEDICIÓN EN LA CARA ABIERTA DE LA CABINA

Los datos que se pudieron obtener en la medición de la entrada de la cabina son los siguientes:

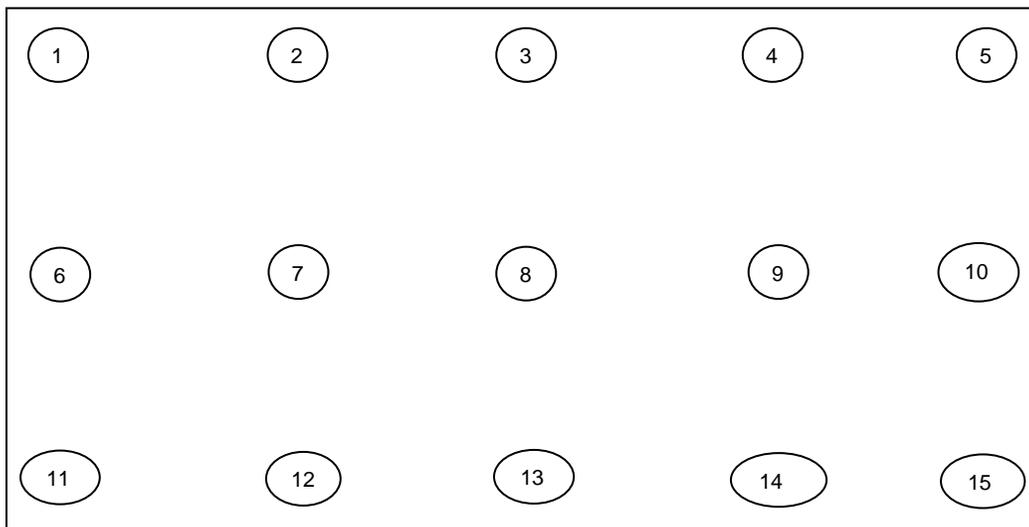


Figura 6.1 Posiciones de medición en la entrada de la cabina

Tabla 6.4 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada de la cabina

		Mediciones (m/s)			Promedio
		Nº1	Nº2	Nº3	
Posiciones	1	0,1	0,1	0	0,07
	2	0	0	0	0,00
	3	0,1	0,2	0,1	0,13
	4	0	0,1	0,1	0,07
	5	0	0,1	0	0,03
	6	3,1	3,3	3,5	3,30
	7	0	0	0	0,00
	8	0	0	0	0,00
	9	0	0	0	0,00
	10	3,7	3,7	3,7	3,70
	11	0,1	0,1	0,2	0,13
	12	0	0	0	0,00
	13	0	0	0	0,00
	14	0	0	0	0,00
	15	0,1	0,2	0,1	0,13
Promedio total				0,50	

Valor teórico = 0.5855 m/s que es el promedio de los valores de Ansys Fluent (0.586 m/s) y Flowizard (0.585 m/s) con la malla de mejor calidad.

$$\%Error = \frac{0.5 - 0.5855}{0.5855} * 100 = 14.6\%$$

Conclusión:

Las mediciones en la cara abierta de la cabina presentaron varias dificultades debido a factores como: la variabilidad del caudal de entrada o a su vez de la velocidad en una misma posición, la alteración de las mediciones por las corrientes de aire que pasan cerca de la entrada (se pudo comprobar un flujo de aire paralelo a la entrada de la cabina), otra dificultad muy considerable es que el aire entra en muchas direcciones a la cabina debido a que el comportamiento real

del aire es muy complejo y además hay varias entradas dispersas de aire al cuarto de pintura especial (varias ventanas, y dos puertas) que generan un ingreso muy variable de caudal de aire. Mientras que en el análisis computacional se idealiza al tener una entrada constante y perpendicular del aire (ver Figura 4.28). Por lo tanto el error de 14.6% que se pudo obtener después de muchos intentos de medición es considerablemente bajo, aunque es un valor referencial, por la complejidad de la medición.

6.3.3 MEDICIÓN EN LA ENTRADA DEL CUARTO DE SUCCIÓN

Los resultados de las mediciones en la entrada del cuarto de succión son las siguientes:

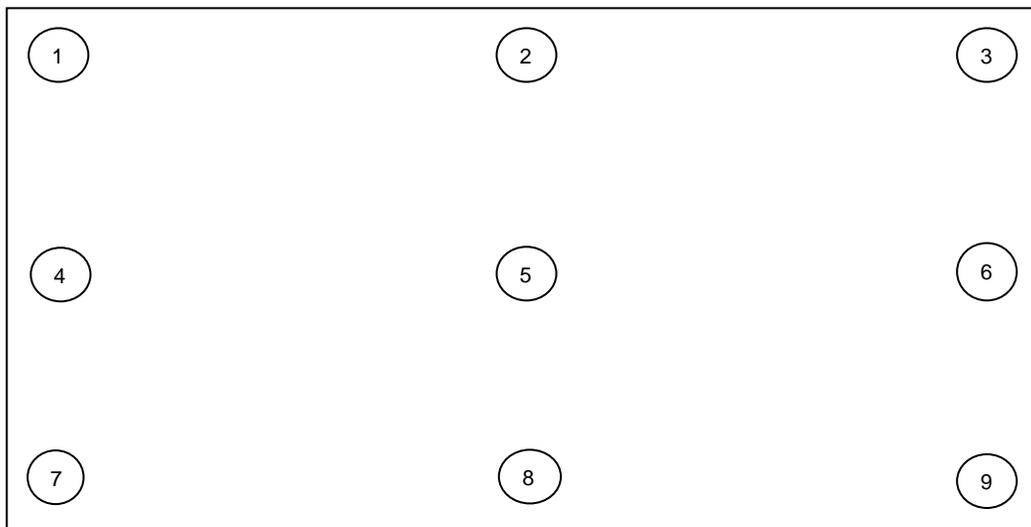


Figura 6.2 Posiciones de medición en la entrada del cuarto de succión

Tabla 6.5 Mediciones de las velocidades del aire en la entrada del cuarto de succión

		Mediciones (m/s)			Promedio
		Nº1	Nº2	Nº3	
Posiciones	1	0,8	0,9	0,9	0,867
	2	3,1	3,1	3,3	3,167
	3	0,9	0,9	1	0,933
	4	0,7	0,8	0,8	0,767
	5	1,3	1,1	1,2	1,200
	6	0,8	0,7	0,7	0,733
	7	0,1	0	0	0,033
	8	0,1	0	0	0,033
	9	0	0	0,1	0,033
Promedio total				0,863	

Valor teórico = 0.8405 m/s que es el promedio de los valores de Ansys Fluent (0.828 m/s) y Flowizard (0.853 m/s) con la malla de mejor calidad.

$$\%Error = \frac{0.863 - 0.8405}{0.8405} * 100 = 2.68\%$$

Conclusión:

De las mediciones obtenidas en la entrada del cuarto de succión, donde se colocan los paneles filtrantes, se consiguieron buenos resultados ya que al comparar el promedio total de las mediciones con el promedio de los 2 programas utilizados se obtuvo un error muy bajo igual al 2.7%, lo que nos indica que el cálculo computacional nos da una muy buena aproximación. El valor del error resultó mucho menor en este caso comparado con el error de las velocidades en la entrada de la cabina debido a que esta es un área controlada que está encerrada por la cabina, por lo que el caudal es constante y no existe cruce de corrientes de aire, por lo que los valores de velocidad medidos son más fiables.

6.4 NORMATIVA DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

Ver en el Anexo K el Manual de operación y mantenimiento de todo el sistema.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

El análisis económico financiero realizado a continuación ofrece la información necesaria para conocer cuál fue el costo real del proyecto, su depreciación en un periodo de tiempo, así como también el período estimado de recuperación de la inversión durante el tiempo que se ponga en funcionamiento el equipo.

7.1 COSTOS EN MATERIALES Y EQUIPOS

Tabla 7.1 Costos de los materiales de la cabina

Ítem	Especificación	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Arandela plana 1/4"	169	\$ 0,05	\$ 8,45
2	Arandelas de presión 3/8" e=3mm	6	\$ 0,05	\$ 0,30
3	Arandelas planas 3/8"	23	\$ 0,06	\$ 1,38
4	Arandelas presión 3/8"	26	\$ 0,05	\$ 1,30
5	Electrodos AGA E-6011 1/8" (kg)	5	\$ 3,00	\$ 15,00
6	Perfil L 20x20x3mm	3	\$ 6,50	\$ 19,50
7	Perfil L 40x40x3mm	5	\$ 9,00	\$ 45,00
8	Perfil L 40x40x6mm	3	\$ 12,00	\$ 36,00
9	Pernos 1/4" x 5/8" UNC	169	\$ 0,10	\$ 16,90
10	Pernos 3/8" x 1 1/4" UNC	32	\$ 0,25	\$ 8,00
11	Plancha acero galvanizado e=0,75	9	\$ 25,00	\$ 225,00
12	Pletina 25x6mm	0,5	\$ 6,50	\$ 3,25
13	Tuerca 1/4" UNC	169	\$ 0,06	\$ 10,14
14	Tuerca 3/8" UNC	32	\$ 0,08	\$ 2,56
			SUBTOTAL	\$ 392,78
			IVA (12%)	\$ 47,13
			TOTAL	\$ 439,91

Tabla 7.2 Costos del cuarto de succión

Ítem	Especificación	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Arandela de presión 3/8"	6	\$ 0,07	\$ 0,42
2	Arandela plana 1/4"	140	\$ 0,05	\$ 7,00
3	Arandela plana 3/8"	6	\$ 0,07	\$ 0,42
4	Banda B-55	1	\$ 7,50	\$ 7,50
5	Breaker trifásico 32 Amp.	1	\$ 20,00	\$ 20,00
6	Cable concéntrico trifásico (mt.)	15	\$ 5,00	\$ 75,00
7	Malla pre-filtrante de acero	6 MT	\$ 3,00	\$ 18,00
8	Marco de madera sujetador del filtro	2	\$ 5,00	\$ 10,00
9	Marco de madera sujetador del prefiltro	1	\$ 10,00	\$ 10,00
10	Perfil L 20x20x3mm	1	\$ 6,50	\$ 6,50
11	Perfil L 40x40x3mm	6	\$ 9,00	\$ 54,00
12	Pernos 1/4" x 1/2" UNC	84	\$ 0,06	\$ 5,04
13	Pernos 1/4" x 1 1/2" UNC	2	\$ 0,05	\$ 0,10
14	Pernos 1/4" x 5/8" UNC	169	\$ 0,10	\$ 16,90
15	Pernos 1/4" x 5/8" UNC	4	\$ 0,08	\$ 0,32
16	Pernos 3/8" x 1 1/2" UNC	6	\$ 0,10	\$ 0,60
17	Plancha acero galvanizado e=0.75	7	\$ 25,00	\$ 175,00
18	Polea aluminio 4"	1	\$ 4,50	\$ 4,50
19	Polea aluminio 6"	1	\$ 6,50	\$ 6,50
20	Silicón ABRO transparente	2	\$ 3,50	\$ 7,00
21	Tela filtrante de sólidos 10 um	2	\$ 251,00	\$ 502,00
22	Tubo cuadrado 20x20x2 mm	1	\$ 5,50	\$ 5,50
23	Tuerca 1/4" UNC	90	\$ 0,06	\$ 5,40
24	Tuerca 3/8" UNC	6	\$ 0,08	\$ 0,48
			SUBTOTAL	\$ 938,18
			IVA (12%)	\$ 112,58
			TOTAL	\$ 1.050,76

Tabla 7.3 Costos de los materiales de la base soporte de muebles

Ítem	Especificación	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Perfil L 20x20x3mm	1	\$ 8,50	\$ 8,50
2	Plancha acero A-36 e=3mm	2	\$ 110,00	\$ 220,00
3	Ruedas en V con rodamiento guías de acero (2")	4	\$ 12,00	\$ 48,00
4	Ruedas en V macizas con rodamiento de soporte (3")	5	\$ 15,00	\$ 75,00
5	Tubo cuadrado 20x20x2mm	9	\$ 5,50	\$ 49,50
6	Tubo cuadrado 25x25x2mm	1	\$ 7,00	\$ 7,00
			SUBTOTAL	\$ 408,00
			IVA (12%)	\$ 48,96
			TOTAL	\$ 456,96

Tabla 7.4 Costos de los equipos

Ítem	Especificación	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Arranque Togami 22A 220V. PAK	1	\$ 85,00	\$ 85,00
2	Motor eléctrico 5HP trifásico	1	\$ 227,68	\$ 227,68
3	Ventilador Centrifugo S&P Tipo Vent-Set Simple	1	\$ 1.686,00	\$ 1.686,00
			SUBTOTAL	\$ 1.998,68
			IVA (12%)	\$ 239,84
			TOTAL	\$ 2.238,52

7.2 COSTOS TOTALES

Tabla 7.5 Costos totales

Ítem	Especificación	Costo
1	Cabina de pintura	\$ 439,91
2	Soporte de muebles	\$ 456,96
3	Sistema de extracción	\$ 1.050,76
4	Equipos	\$ 2.238,52
TOTAL		\$ 4.186,16

7.2.1 COSTO DEL ANÁLISIS COMPUTACIONAL

El costo de la adquisición del software con el cual se trabajó en este proyecto y el análisis del problema planteado no se lo toma en cuenta dentro de los costos totales del sistema en forma global, sin embargo; es necesario mencionarlos para que se tenga una idea del costo real que se genera al realizar un análisis de esta magnitud por cualquier persona que tenga conocimiento del paquete computacional en este caso ANSYS Fluent Inc. V 12.1. Estos costos se detallan a continuación:

Tabla 7.6 Costo del análisis computacional

ITEM	ESPECIFICACIÓN	COSTO
1	Adquisición de programa ANSYS Fluent Inc. V 12.1	\$ 84.576,00
2	Análisis computacional	\$ 3.500,00
TOTAL		\$ 88.076,00

7.3 DEPRECIACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO

Tabla 7.7 Depreciación de los equipos

Ítem	Equipo	Valor	Años de depreciación (10% anual)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Cabina + cuarto de succión	1.947,64	1.752,87	1.577,58	1.419,83	1.277,84	1.150,06	1.035,05	931,55	838,39	754,55	679,10
2	Ventilador Centrifugo S&P Tipo Vent-Set Simple	95,20	85,68	77,11	69,40	62,46	56,21	50,59	45,53	40,98	36,88	33,19
3	Arranque Togami 22A 220V. PAK	1.888,32	1.699,49	1.529,54	1.376,59	1.238,93	1.115,03	1.003,53	903,18	812,86	731,57	658,42
4	Motor eléctrico 5HP trifásico WEG	255,00	229,50	206,55	185,90	167,31	150,58	135,52	121,97	109,77	98,79	88,91
TOTAL		4.186,16	3.767,54	3.390,79	3.051,71	2.746,54	2.471,88	2.224,70	2.002,23	1.802,00	1.621,80	1.459,62

7.4 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Tabla 7.8 Parámetros de cálculo

PARÁMETROS	VALOR	UNIDADES
Costo de pintura en polvo c/lb	2,45	USD
Promedio de pintura utilizada c/día ⁵⁷	12,50	LB
Cantidad de pintura utilizada en 20 días laborables (1 mes)	250,00	LB

Porcentaje promedio de recolección (67.5%)

$$\% = 250 * 0,675 = 168,75 \text{ lb}$$

Ahorro mensual

$$AM = 168,75 * 2,45 = 421,88 \text{ USD}$$

Ahorro anual

$$Aa = 421,88 * 12 = 5062,5 \text{ USD}$$

Cálculo de tiempo de recuperación de la inversión

$$TR = \frac{\text{Inversión total}}{\text{Ahorro mensual}}$$

$$TR = \frac{4186,16}{421,88} = 9,9 \text{ meses} \sim 10 \text{ meses}$$

Conclusión:

El tiempo en el cual la empresa va a recuperar la inversión inicial que hizo en el proyecto es aproximadamente 10 meses. Dentro de este período se tendrá que cubrir todo el rubro de inversión mediante el ahorro mensual debido a la recolección de la pintura en polvo.

⁵⁷ El consumo diario es variable y va de 5 a 20 libras por lo que se utilizó un valor promedio de 12.5 lb.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Al finalizar el proyecto y realizar las pruebas correspondientes de funcionamiento se obtuvo un porcentaje de recolección promedio del 68%, valor que nos permite decir que el resultado es sumamente satisfactorio ya que el proceso de recolección se lo realiza manualmente.
2. El tipo de cabina más apropiado según los costos, el tipo de producción y el espacio físico disponible es del tipo Batch de 3,5x2,2x1,8 metros, ya que esta clase de cabinas son adecuadas para producciones medianas y pequeñas, para cuando se tiene una gran variedad de piezas y colores; o bien, las piezas son pesadas.
3. En la actualidad existen varios tipos de sistemas de extracción con una alta eficiencia en su rendimiento, pero debido a su alto costo, se optó por una solución económica y con alta eficiencia la cual comprende un panel de filtros y un cuarto de succión independiente.
4. Debido a factores como: facilidad de adquisición, costo, rendimiento, facilidad de montaje e instalación, se utilizó un ventilador de tipo centrífugo con álabes tipo Airfoil.
5. Los paquetes computacionales especializados en Mecánica de fluidos que fueron utilizados en la realización de este proyecto, brindaron buenos resultados, cercanos al funcionamiento real del equipo.
6. Mediante el análisis computacional realizado en los 2 programas se obtuvo una velocidad promedio en la cara de 0,5855 m/s. Según las pruebas realizadas de medición de velocidad mediante un anemómetro, se obtuvo un valor promedio de 0,50 m/s, lo que nos permite encontrar un error porcentual del 14.6%, el error se justifica debido a que al momento de realizar la medición el aire ingresaba a la cabina en varias direcciones y el caudal en una misma zona no permanecía constante, lo que hacía sumamente difícil obtener datos fijos, además el anemómetro utilizado en la medición tiene una precisión de $\pm 5\%$ que debe tomarse en cuenta en el error final.

7. El valor de la velocidad promedio en la entrada del cuarto de succión mediante el análisis computacional fue de 0,8405 m/s. Mediante las pruebas efectuadas con un anemómetro, la velocidad promedio fue de 0,863 m/s, lo que nos permite encontrar un error porcentual del 2.68%. Como se puede observar el error en este caso es relativamente bajo debido a que el panel de filtros se encuentra en un área más controlada, sin corrientes externas de aire y por lo tanto el caudal permanece uniforme, esto permite que la velocidad se mantenga en todos los puntos.
8. Con respecto al análisis económico-financiero realizado, el ahorro mensual debido al sistema de recolección de pintura en polvo es de \$421,88 esto le permitirá a la empresa recuperar la inversión inicial en aproximadamente 10 meses. Este es un tiempo relativamente corto en comparación con los beneficios del proyecto a largo plazo.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario seguir las recomendaciones de operación y remoción de la pintura para que se logre un porcentaje alto de recolección, además de realizar el mantenimiento apropiado al sistema de filtrado.
2. Si en un futuro el volumen de producción se incrementará considerablemente se recomienda realizar una inversión para mejorar el sistema actual.
3. El mantenimiento del ventilador se debe realizar de forma adecuada y si es posible se debe contratar los servicios de la empresa proveedora del mismo ya que son personal calificado para este tipo de trabajos, esto asegurará una larga vida útil del equipo.
4. Es necesario dar un mantenimiento al sistema global de acuerdo al Manual de operación y mantenimiento, esto permitirá que el equipo funcione en óptimas condiciones y realice el trabajo para el cual fue diseñado.
5. Se recomienda que la ESPE invierta parte de sus recursos en licencias educativas de programas computacionales que ayuden a formar profesionales más competitivos con mayores conocimientos de los avances tecnológicos en la Ingeniería Mecánica.

REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

- **H.H. UHLIG, R.W. REVIE**, Corrosión y Control de Corrosión, J.W. & Sons, Editors. New York,1985.
- **MOTT L. ROBERT**, Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido del inglés por Carlos R. Cordero P., Homero F. Samaniego. Cuarta ed. México. Editorial Pearson. 1996. p.157.
- **NILS R. GRIMM, ROBERT C. ROSALER**, Manual de Calefacción, ventilación y aire acondicionado. Primera ed. España, McGraw Hill / Interamericana de España S.A., 1996. pp.1, 2, 7, 11, 13, 23, 28, 29, 30,32.
- **H.C. METCALFE, J.E. WILLIAMS, J.F. CASTKA**, Química Moderna. Traducido del inglés por el Dr. Ing. Químico Carlos A. Cruz R., María L. Avalos P. Primera ed. México. Nueva editorial Interamericana. 1984. p.204.
- **JOSEPH E. SHIGLEY, CHARLES R. MISCHKE**, Diseño en ingeniería mecánica. Traducido del inglés por Javier León Cárdenas. Sexta ed. México. McGraw Hill 2002. pp.549, 550,553.
- **RODGER TALBERT**. Paint Technology Handbook. Primera ed. Estados Unidos. CRC Press Taylor and Francis Group. 2008. Pp.153-157.
- **CENGEL A. YUNUS**, Transferencia de calor y masa. Traducido del inglés por José H. Pérez C., Javier E. Brito. Tercera ed. México. McGraw Hill 2007. p.863.
- **LEWIS NITHIARASU**, Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. Primera ed. Editorial Wiley. 2004. pp.38-39.
- **MATTIUSSI**, The FV FD FE Methods as Numerical Methods for Physical Field Problems. Primera ed. Italia. Editorial Nirlav. 2000. pp.255-263.
- **B. E. LAUNDER AND D. B. SPALDING**, *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.

- **ROBERT L. MOTT**, Mecánica de fluidos, Traducido del inglés por Javier Enriquez Brito. Sexta ed. México. Pearson. 2006. Pp.167, 522, 572.

CATÁLOGOS Y MANUALES

- **GLOBAL FINISHING SOLUTIONS**, Catálogo Powder Booths, 2006, 6 p.
- **UNITED AIR SPECIALISTS, INC.**, Catálogo Compact media dust collector BDC series. s.f. p.4.
- **GREENHECK**, Catálogo de Ventiladores centrífugos de uso comercial, 2005, pp. 6-7.
- **SOLER & PALAU**, Catálogo Ventiladores Centrífugos serie CM y CMA, 2010. p 51.
- **SOLER & PALAU**, Manual Práctico de Ventilación, s.f. p. 40.
- **GREENHECK**, Manual de instalación, operación y mantenimiento de ventiladores centrífugos industriales, 1999, p.12.
- **NYB**, Engineering letter of the New York Blower Company, "Temperature and altitude affect fan selection", s.f. p.2.
- **ANSYS FLUENT V12.1**, Theory guide, tutorials and user manual.
- **SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE Y CÁLCULO DE CONDUCTOS**, Síntesis anónima de las siguientes referencias: Manual de Aire Acondicionado. Carrier, 1996. Capítulo 2 y 6. Thermal Environmental Engineering. Thomas H. Kuehn, James W. Ramsey, James L. Threlkeld. Ed. Prentice Hall, 1998. Capítulo 18. ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI Edition. ASHRAE, 1997. Capítulo 32. Cálculo de conductos de aire. A. Fontanals. Ed. CEAC, 1997. Ventilación Industrial. E. Carnicer. Ed. Paraninfo, 1994. Capítulos 3 y 4. Cálculos en climatización. Ejercicios Resueltas. E. Torrella, R. Cabello, J. Navarro. Ed. AMV, 2002.

PUBLICACIONES

- **ECUADOR, MINISTERIO DE TRABAJO Y EMPLEO**, Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo. s.f. p.5.
- **BAKKER ANDRÉ**, Lecture 5 - Solution Methods: Applied Computational Fluid Dynamics © Fluent Inc.
- **NORMA AWS D1.1**, Structural Welding Code 2006, Especificaciones mínimas de tamaños de soldadura. s.f. p.69.
- **GABRIEL WĘCEL**, Cyclone Fluent tutorial, 2009.

DIRECCIONES DE INTERNET

- http://www.powdertronic.com/cabinas_polvo/cabinas_polvo.html, Gráficos de cabinas de pintura, 2010.
- <http://libros.redsauce.net/>, Libros de Ingeniería Energética-Pedro Fernández Díez. Español.
- www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=10657, Seguridad ocupacional y administración de la salud, Inglés, 2010.
- <http://toolsusablog.com/2009/07/01/how-much-air-flow-does-my-spray-paint-booth-require/>, Velocidad de aire requerida en cabinas de pintura, 2010.
- www.kmisystemsinc.com/custom-coating/powder-coat/default.html, Velocidad de aire en cabinas de pintura, Inglés, 2010.
- www.canadianmanufacturing.com/plastics-coatings/sustainability/designing-a-powder-spray-booth-6334, Diseño de cabinas de pintura, Inglés, 2010.
- <http://modeanindustries.com/resources/powder-coating-safety/>, Seguridad en cabinas de pintura, Inglés, 2010.
- www.latacunga.gov.ec, Ilustre Municipio de Latacunga – Densidad del aire en la ciudad de Latacunga, 2010.
- www.inahmi.gov.ec, Densidad del aire en la ciudad de Latacunga, 2010.

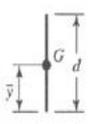
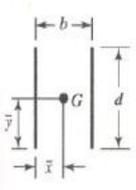
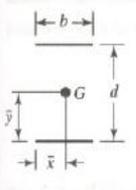
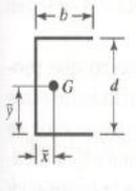
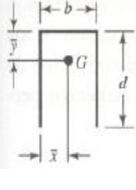
ANEXOS

ANEXO A: Tabla de propiedades a la flexión de soldadura en filete

Tabla 9-3 Propiedades a la flexión de soldaduras de filete. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:549

Tabla 9-3

Propiedades a la flexión de soldaduras de filete*

Soldadura	Área de la garganta	Ubicación de G	Segundo momento del área unitaria
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1.414hb$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$

ANEXO B: Cargas constantes permisible y tamaños mínimos de soldadura de filete

Tabla 9-7 Esfuerzo cortante permisible en la garganta de soldadura de filete o de muesca de penetración parcial. Diseño en ingeniería mecánica. Shigley. Pág:553

Tabla 9-7
Cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete

Programa A: carga permisible para varios tamaños de soldadura de filete								Programa B: tamaño mínimo de soldadura de filete, h	
Nivel de resistencia del metal de aporte (EXX)									
	60*	70*	80	90*	100	110*	120		
Esfuerzo cortante permisible en la garganta, ksi (1 000 psi) de soldadura de filete o soldadura de muesca de penetración parcial									
$\tau =$	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0	33.0	36.0		
Fuerza unitaria permisible en soldadura de filete, kip/pulg lineal									
$f =$	12.73h	14.85h	16.97h	19.09h	21.21h	23.33h	25.45h		
Tamaño del cateto h, pulg	Fuerza unitaria permisible para varios tamaños de soldaduras de filete kip/pulg lineal								
1	12.73	14.85	16.97	19.09	21.21	23.33	25.45		
7/8	11.14	12.99	14.85	16.70	18.57	20.41	22.27		
3/4	9.55	11.14	12.73	14.32	15.92	17.50	19.09		
5/8	7.96	9.28	10.61	11.93	13.27	14.58	15.91		
1/2	6.37	7.42	8.48	9.54	10.61	11.67	12.73		
7/16	5.57	6.50	7.42	8.35	9.28	10.21	11.14		
3/8	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75	9.54		
5/16	3.98	4.64	5.30	5.97	6.63	7.29	7.95		
1/4	3.18	3.71	4.24	4.77	5.30	5.83	6.36		
3/16	2.39	2.78	3.18	3.58	3.98	4.38	4.77		
1/8	1.59	1.86	2.12	2.39	2.65	2.92	3.18		
1/16	0.795	0.930	1.06	1.19	1.33	1.46	1.59		

Esesor del material de la parte unida más gruesa, pulg	Tamaño de la soldadura, pulg
*Hasta 1/4 inclusive	1/8
Mayor que 1/4	A 1/2
Mayor que 1/2	A 3/4
† Mayor que 3/4	A 1 1/2
Mayor que 1 1/2	A 2 1/4
Mayor que 2 1/4	A 6
Mayor que 6	5/8

No se debe exceder el espesor de la parte más delgada.
 † Para tamaño mínimo del filete de soldadura, el programa no va más allá de soldadura de filete de 5/16 pulg por cada 3/4 pulg de material.
 * El tamaño mínimo para aplicaciones en puentes no va más allá de 3/16 pulg.

* Las soldaduras de filete en realidad se ensayaron por el AWS-AWS Task Committee.
 † $f = 0.707h \tau_{shear}$

Fuente: Adaptado de Omer W. Bloodgett (ed.), *Stress Allowables Weldment Design*, D412, The James E. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, mayo, 1991, p. 3.

ANEXO C: Tamaño mínimo de una PJP precalificada

Norma AWS D1.1 Structural Welding Code 2006, Pág. 69. Tabla 3.4, Especificaciones mínimas de tamaños de soldadura.

Table 3.4
Minimum Prequalified PJP Weld Size (E)
(see 3.12.2.1)

Base Metal Thickness (T) ^a	Minimum Weld Size ^b	
	in.	mm
1/8 [3] to 3/16 [5] incl.	1/16	2
Over 3/16 [5] to 1/4 [6] incl.	1/8	3
Over 1/4 [6] to 1/2 [12] incl.	3/16	5
Over 1/2 [12] to 3/4 [20] incl.	1/4	6
Over 3/4 [20] to 1-1/2 [38] incl.	5/16	8
Over 1-1/2 [38] to 2-1/4 [57] incl.	3/8	10
Over 2-1/4 [57] to 6 [150] incl.	1/2	12
Over 6 [150]	5/8	16

^a For non-low hydrogen processes without preheat calculated in conformance with 4.7.4, T equals the thickness of the thicker part joined; single pass welds shall be used. For low-hydrogen processes and non-low hydrogen processes established to prevent cracking in conformance with 4.7.4, T equals thickness of the thinner part; single pass requirement does not apply.

^b Except that the weld size need not exceed the thickness of the thinner part joined.

ANEXO D: Propiedades de la atmósfera a gran altitud

YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa. 3ra ed. Tabla A-17, Pág.863.

TABLA A-17

Propiedades de la atmósfera a gran altitud

Altitud, z , m	Temperatura, T , °C	Presión, P , kPa	Gravedad, g , m/s ²	Velocidad del sonido, c , m/s	Densidad, ρ , kg/m ³	Viscosidad, μ , kg/m · s	Conductividad térmica, k , W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1 000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1 200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1 400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1 600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1 800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2 000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2 200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2 400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2 600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2 800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3 000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3 200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3 400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3 600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3 800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4 000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4 200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4 400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4 600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4 800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5 000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5 200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5 400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5 600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5 800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6 000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6 200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6 400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6 600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6 800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7 000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8 000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9 000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10 000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12 000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14 000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16 000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18 000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Fuente: U. S. Standard Atmosphere Supplements, U. S. Government Printing Office, 1966. Basadas en las condiciones medias redondeadas al año a 45° de latitud y varían con el momento del año y los patrones meteorológicos. Las condiciones al nivel del mar ($z = 0$) se toman como $P = 101.325$ kPa, $T = 15^\circ\text{C}$, $\rho = 1.2250$ kg/m³, $g = 9.80665$ m/s².

ANEXO E: Tablas de factores de corrección de temperatura y altitud

Nyb Engineerin letter. Página 2

Table 1 - Corrections for Temperature

Air Temperature °F.	Factor	Air Temperature °F.	Factor
-50	0.77	275	1.39
-25	0.82	300	1.43
0	0.87	325	1.48
+20	0.91	350	1.53
40	0.94	375	1.58
60	0.98	400	1.62
70	1.00	450	1.72
80	1.02	500	1.81
100	1.06	550	1.91
120	1.09	600	2.00
140	1.13	650	2.09
160	1.17	700	2.19
180	1.21	750	2.28
200	1.25	800	2.38
225	1.29	900	2.56
250	1.34	1000	2.76

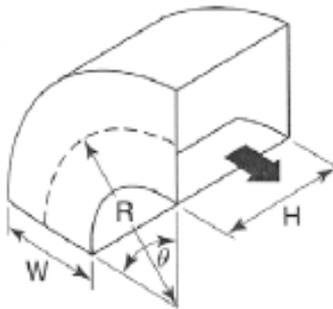
Table 2 - Corrections for Altitude

Altitude Feet Above Sea Level	Factor	Altitude Feet Above Sea Level	Factor
0	1.00	5000	1.20
500	1.02	5500	1.22
1000	1.04	6000	1.25
1500	1.06	6500	1.27
2000	1.08	7000	1.30
2500	1.10	7500	1.32
3000	1.12	8000	1.35
3500	1.14	8500	1.37
4000	1.16	9000	1.40
4500	1.18	10000	1.45

ANEXO F: Pérdidas en codos rectos

Sistema de distribución de aire, Cálculo de conductos. Página 10

TABLAS DE COEFICIENTES DE PÉRDIDA EN ACCESORIOS (CONDUCTOS DE AIRE)



$$\theta = 90^\circ$$

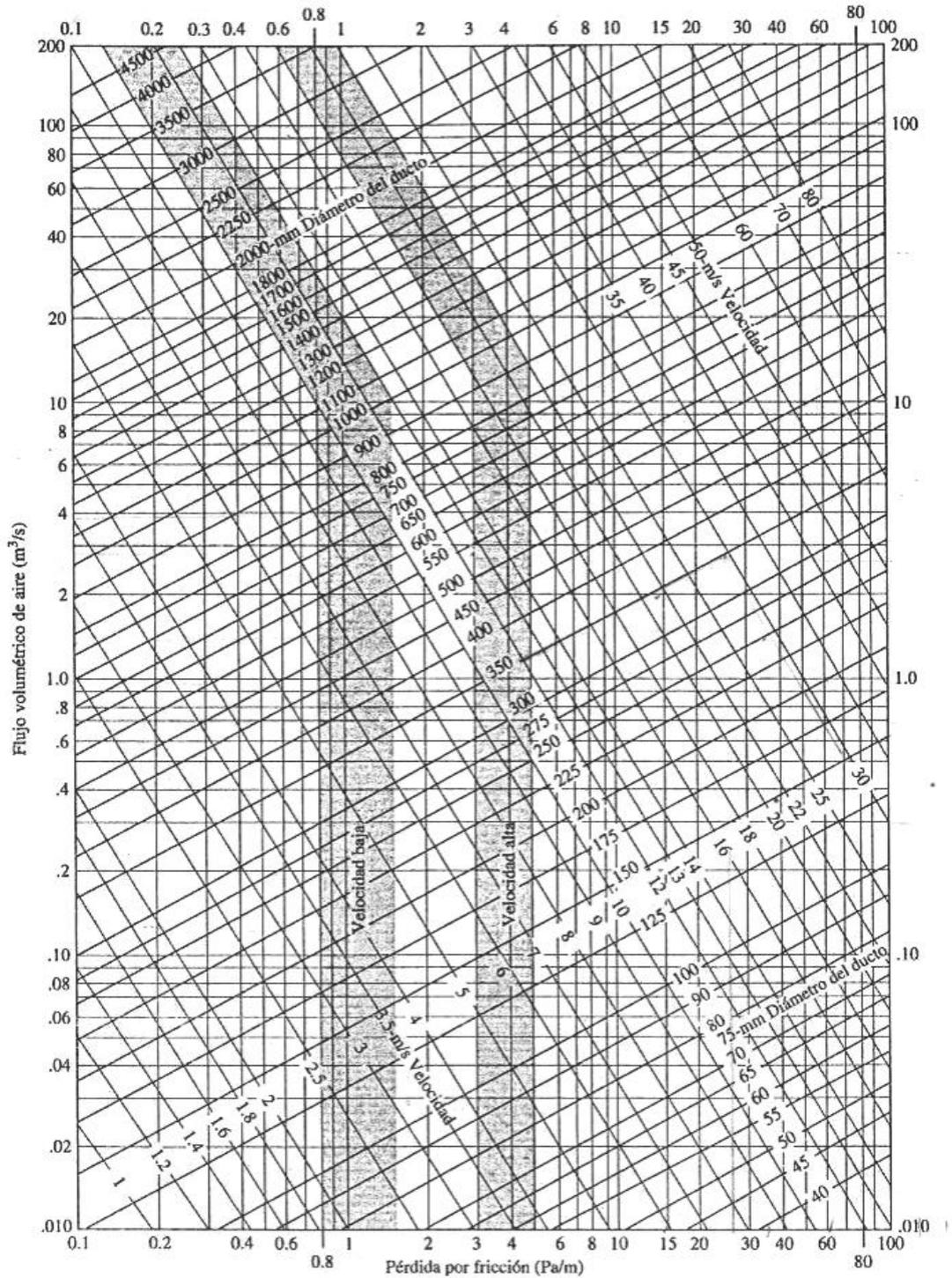
r/W	H/W										
	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	8
0,5	1,5	1,40	1,30	1,20	1,10	1,10	0,98	0,92	0,89	0,85	0,83
0,75	0,57	0,52	0,48	0,44	0,40	0,39	0,39	0,40	0,42	0,43	0,44
1	0,27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,18	0,19	0,20	0,27	0,21
1,5	0,22	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17
2	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15

Codo rectangular (radio suave)

ANEXO G: Pérdidas en ductos rectos

Mecánica de Fluidos de Robert L. Mott. Página 572

Capítulo 19 Flujo de aire en ductos



ANEXO H: Hoja Técnica del motor trifásico



W21

Potência		Carga	rpm	Corrente nominal em 220 V (A)	Corrente com rotor bloqueado I _b / I _n	Conjugado nominal C _n (kgm)	Conjugado com rotor bloqueado C _b / C _n	Conjugado máximo C _{max} / C _n	Rendimento η %			Fator de potência Cos φ			Fator de serviço F S	Momento de inércia J (kgm ²)	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão sonora d _B (µ)	Peso aprox. (kg)
cv	KW								% da potência nominal										
									50	75	100	50	75	100					
4 Pólos - 60 Hz																			
0,16	0,12	63	1720	0,801	4,5	0,07	3	3,2	47	55	67	0,46	0,55	0,62	1,15	0,0004	31	48	6,0
0,25	0,18	63	1710	1,14	4,5	0,10	2,8	3	55	63	64	0,47	0,57	0,65	1,15	0,00045	18	48	7,4
0,33	0,25	63	1710	1,44	4,5	0,14	2,0	2,0	50	64	67	0,48	0,50	0,58	1,15	0,00068	20	48	7,0
0,6	0,37	71	1700	2,04	4,3	0,21	2,3	2,5	58	65	70	0,45	0,58	0,68	1,15	0,00070	9	47	10,4
0,75	0,55	71	1680	2,78	4,8	0,32	2,5	2,5	65	60	72	0,40	0,62	0,72	1,15	0,00095	9	47	10,6
1	0,75	80	1720	3,02	7,2	0,42	2,5	2,0	75,3	70	70,5	0,52	0,74	0,82	1,15	0,00294	8	48	14,5
1,5	1,1	80	1720	4,43	7,8	0,52	2,0	3,2	76	70	70,5	0,6	0,73	0,82	1,15	0,00328	6	48	13,8
2	1,5	90S	1740	6,07	6,4	0,82	2,5	3	81	83,1	83,1	0,6	0,72	0,78	1,15	0,0056	7	51	10,7
3	2,2	90L	1725	8,68	6,8	1,25	2,5	2,8	83,1	84	83,1	0,64	0,75	0,8	1,15	0,00672	6	51	22,0
4	3	100L	1725	11,7	7,5	1,56	2,5	2,8	82,5	84,1	84,1	0,51	0,73	0,8	1,15	0,00018	7	54	30,0
5	3,7	100L	1715	14	7,2	2,00	2,0	3,1	85,1	85,5	85,5	0,53	0,75	0,81	1,15	0,00095	7	54	33,2
6	4,5	112M	1745	16,7	7,4	2,46	2,2	2,8	86	85,5	85,2	0,56	0,77	0,82	1,15	0,01741	15	58	41,6
7,5	5,5	112M	1740	20	7,0	3,00	2,2	2,8	85,5	88	88	0,53	0,74	0,82	1,15	0,01741	15	58	44,8
10	7,5	132S	1760	26,5	8,0	4,07	2,2	3	87	88	80	0,56	0,77	0,83	1,15	0,04662	7	61	61,5
12,5	9,2	132S	1755	33,3	8,7	5,10	2,5	2,0	85,3	87,8	88,5	0,52	0,73	0,82	1,15	0,05427	7	61	72,0
12,5	9,2	132M	1755	33,3	8,7	5,10	2,5	2,0	87	89,2	88,5	0,52	0,73	0,82	1,15	0,05427	7	61	66,1
16	11	132M	1755	39,3	8,3	6,12	2,3	2,8	87	88,5	88,5	0,58	0,8	0,83	1,15	0,05815	7	61	71,4
20	15	160M	1760	52,5	6,3	8,14	2,3	2,2	90,5	90,2	90,2	0,50	0,70	0,83	1,15	0,06635	13	60	115,1
25	18,5	160L	1755	64,3	6,3	10,20	2,3	2,4	90	91	91	0,7	0,70	0,83	1,15	0,11542	15	60	120,7
30	22	180M	1765	75,4	7,5	12,17	2,8	2,8	90,2	91	91,1	0,7	0,8	0,84	1,15	0,16145	12	68	158,3
40	30	200M	1770	101	6,6	16,18	2,3	2,5	91	91,5	91,8	0,72	0,82	0,85	1,15	0,27570	10	71	210,5
60	37	200L	1770	122	6,6	20,23	2,3	2,3	92	92,3	92,5	0,75	0,83	0,86	1,15	0,33095	16	71	236,2
60	45	225SM	1780	146	7,2	24,13	2,5	3	91,5	93	93,1	0,75	0,83	0,87	1,00	0,54738	20	75	353,4
75	55	225SM	1775	176	7,4	30,25	2,5	3	92,5	93	93,1	0,75	0,84	0,88	1,00	0,76085	15	75	381,7
100	75	250SM	1780	242	8,0	40,22	3	3,3	92,7	93,5	93,5	0,75	0,85	0,87	1,00	1,01481	12	75	456,8
125	90	280SM	1785	293	7,8	50,14	2,5	2,0	92,7	93,8	93,8	0,74	0,82	0,86	1,00	1,23711	23	80	632,5
150	110	280SM	1785	353	8,0	60,17	2,5	2,7	93	94	94,1	0,77	0,84	0,87	1,00	2,56047	20	80	706,7
175	132	315SM	1785	428	7,2	70,20	2,5	2,7	93	94,1	94,2	0,78	0,84	0,86	1,00	2,64077	15	82	810,1
200	150	315SM	1785	484	7,5	80,22	2,4	2,5	93	94,5	94,5	0,75	0,83	0,86	1,00	3,21184	10	82	910,4
250	185	315SM	1785	597	8,3	100,28	2,8	2,8	93	94,5	94,5	0,76	0,84	0,86	1,00	3,77391	17	82	997,5
300	220	355MFL	1790	699	7,0	120	2,2	2,3	94,5	94,7	95	0,77	0,84	0,87	1,00	5,70795	48	83	1434
350	260	355MFL	1790	825	7,3	140	2,2	2,4	94,5	95,1	95,1	0,76	0,84	0,87	1,00	6,85703	32	83	1658
400	300	355MFL	1790	939	6,6	160	2,1	2,1	95,1	95,3	95,3	0,81	0,86	0,88	1,00	8,12015	37	83	1738
450	330	355MFL	1790	1030	7,1	180	2,1	2,1	95,1	95,4	95,4	0,77	0,85	0,88	1,00	9,0224	30	83	1854
600	370	355MFL	1790	1160	6,6	200	2,1	2,2	95,3	95,4	95,4	0,70	0,85	0,88	1,00	9,92464	31	83	1940

ANEXO I: Hoja Técnica del ventilador centrífugo: Catalogo Ventiladores Centrífugos serie CM y CMA. Soler & Palau S.A

Pág. 51



CMA 630

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Tipo de turbina: Airfoil

Diámetro de rodete: 640 mm. (25 3/16 inch).

Diámetro del eje: Clase I 38.1 mm (1 1/2 inch).

Área de salida: 0.346 m² (3.727 ft²).

BHP máximos: Clase I 10.72.

Armazón máximo de motor: Clase I 254 T.

RPM máximas: Clase I 1600.

Peso del equipo: 158 Kg 348 Lbs

CFM m ³ /hr	Vel salida PPM	PRESION ESTÁTICA mmca - inwg																	
		12.7 mm / 0.50"		25.4 mm / 1.0"		38.1 mm / 1.5"		50.8 mm / 2.0"		76.2 mm / 3.0"		101.6 mm / 4.0"		127.0 mm / 5.0"		152.4 mm / 6.0"		177.8 mm / 7"	
		RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP	RPM	BHP
2804	700	477	0.28	808	0.54	729	0.83	848	1.15	1042	1.82	1200	2.50	1338	3.40	1483	4.20	1580	5.14
4427		57		61		66		71		77		79		81		83		84	
2978	800	506	0.35	827	0.60	737	0.90	842	1.30	1039	2.00	1203	2.60	1342	3.60	1487	4.50	1582	5.00
5069		59		62		67		72		77		81		83		84		85	
3348	900	537	0.40	851	0.70	752	1.00	848	1.40	1033	2.20	1201	3.00	1345	3.90	1471	4.60	1568	5.80
5682		61		64		67		71		77		81		84		85		86	
3720	1000	568	0.50	878	0.80	773	1.20	862	1.60	1032	2.40	1195	3.30	1343	4.20	1473	5.20	1560	6.20
6324		64		66		69		71		77		81		84		86		86	
4082	1100	601	0.60	707	0.90	797	1.30	880	1.70	1038	2.60	1191	3.50	1338	4.50	1471	5.60	1591	6.80
6668		68		68		70		72		77		82		85		86		86	
4464	1200	635	0.70	737	1.00	823	1.46	903	1.90	1051	2.80	1193	3.60	1332	4.60	1466	6.00	1565	7.00
7589		68		70		72		73		77		82		86		87		88	
4638	1300	669	0.80	767	1.20	852	1.60	928	2.00	1069	3.00	1202	4.00	1332	5.20	1460	6.30	1563	7.50
8221		70		71		73		75		77		80		86		88		89	
5208	1400	704	0.90	799	1.40	881	1.80	955	2.30	1090	3.20	1216	4.30	1338	5.50	1469	6.70	1577	7.90
8854		71		73		75		78		78		80		84		88		90	
5580	1500			832	1.50	911	2.00	983	2.50	1113	3.50	1234	4.60	1350	5.80	1483	7.00	1575	8.40
9488				75		78		77		79		81		83		87		90	
5952	1600			865	1.70	942	2.20	1012	2.60	1139	3.80	1255	4.90	1365	6.00	1473	7.50	1579	8.80
10118				76		77		78		80		81		83		89		89	
6324	1700			899	1.90	972	2.50	1042	3.00	1165	4.00	1278	5.30	1384	6.60	1487	7.60	1568	9.30
10751				78		79		79		81		82		84		88		88	
6688	1800			933	2.20	1008	2.70	1073	3.30	1193	4.50	1302	5.70	1405	7.00	1504	8.30		
11383				79		80		80		82		83		85		88			
7068	1900			968	2.50	1039	3.00	1105	3.60	1222	4.80	1329	6.00	1428	7.40	1524	8.60		
12018				80		81		81		83		84		85		87			
7440	2000					1073	3.30	1137	4.00	1252	5.20	1356	6.50	1453	7.90	1546	9.30		
12648						82		82		83		85		86		88			
7812	2100					1107	3.60	1169	4.30	1285	5.60	1384	7.00	1479	8.40	1569	9.60		
13280						83		83		84		86		87		88			
8184	2200					1141	4.00	1202	4.80	1313	6.00	1413	7.50	1506	8.00	1594	10.4		
13613						84		84		85		87		88		89			
8568	2300					1176	4.40	1235	5.00	1344	6.50	1443	8.00	1534	9.50				
14545						85		85		86		87		89					
8928	2400					1211	4.80	1269	5.50	1376	7.00	1473	8.50	1562	10.0				
15178						86		86		87		88		89					
9300	2500					1247	5.30	1304	6.00	1408	7.50	1504	9.10	1592	10.7				
15810						87		87		88		89		90					
9672	2600							1338	6.46	1441	8.00	1535	9.60						
16442									88		89		90						

ANEXO J: Fotografías del proceso de construcción y montaje



Taller metal-mecánico del Centro de Producción ESPE Latacunga



Techo terminado



Perforación de perfiles



Ensamble de las planchas a los perfiles



Construcción del techo de la cabina



Ensamble de la cabina



Construcción del soporte móvil



Cabina de pintura ensamblada



Soporte móvil de muebles metálicos instalado en la cabina



Materiales para el soporte móvil



Construcción del cuarto de succión



Cuarto de succión ensamblado



Vista posterior del cuarto de succión



Poleas y banda de transmisión



Arrancador del motor



Construcción del ducto de salida



Configuración del ducto de salida instalado



Detección de fugas del cuarto de succión



Marco de filtros



Luminarias de la cabina



Vista lateral



Cabina completa



Ducto de salida completo

ANEXO K: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA CABINA DE PINTURA ELECTROSTÁTICA



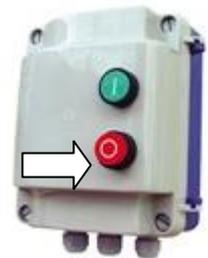
OPERACIÓN PARA UN MISMO COLOR:

1. Encender las luces internas de la cabina y verificar que los *paneles filtrantes* y la *malla de seguridad* estén correctamente ubicados y sujetos. 
2. Calibrar adecuadamente el *equipo de pintado* y la *boquilla* de la pistola para que la dispersión de la pintura esté acorde a la geometría del mueble a pintar y así evitar desperdicios innecesarios de pintura⁵⁸. Usar los correspondientes dispositivos de seguridad como mascarilla, gafas.

⁵⁸ Nota: aunque el exceso de pintura sea captado por los filtros, esta ya no es de la misma calidad que la pintura nueva, por esto se realiza una mezcla de 70% de pintura nueva y 30% de pintura recolectada.



3. Encender el ventilador centrífugo *sólo* cuando los muebles ya estén colocados *dentro* de la cabina y el operario esté listo para empezar el proceso de pintado.
4. Proceder a pintar los muebles de manera *pausada y ordenada* para evitar que se genere turbulencia con el flujo de aire con pintura que sale de la pistola ya que esto genera desperdicio. *Evitar dentro de lo posible*, pintar directamente hacia el suelo, techo o paredes de la cabina ya que toda la pintura que toca dichas partes metálicas quedará adherida a las mismas, lo que se considerará también como desperdicio por su difícil recuperación.⁵⁹
5. Al terminar el proceso de pintado inmediatamente *apagar* el ventilador para evitar que aire con impurezas que viene del exterior contamine la pintura de los muebles, así como la pintura recuperada en los filtros.
6. *Sólo si es necesario* recuperar la pintura de los filtros por encontrarse estos con una capa considerable de pintura y percibir que la capacidad de captación ha *disminuido bastante*, limpiar *sólo la malla de seguridad con el ventilador encendido* para que la pintura que se encuentra allí se adhiera a los filtros, posteriormente apagar el ventilador y proceder a extraer lentamente con una brocha o escoba de cerdas suaves la pintura de los filtros y recuperarla en el canal para depositarla en el recipiente de acero galvanizado ubicado allí.



OPERACIÓN PARA CAMBIO DE COLOR:

1. Si los filtros tienen pintura del anterior proceso realizar la recuperación respectiva como se detalla en el paso 6 descrito en la sección anterior. Después de recuperar la pintura limpiar el canal y el recipiente de

⁵⁹ Mantener la plancha de la base limpia antes de pintar para poder recuperar la pintura que se deposita allí.

- pintura con aire comprimido (NO con los filtros colocados), con brocha o una escoba limpia de cerdas suaves.
2. Realizar la limpieza del interior de la cabina para evitar la mezcla de colores y tener un ambiente limpio de trabajo que proteja al operador y al sistema de filtrado.
 3. Realizar el cambio de los paneles filtrantes al color correspondiente a utilizarse.
 4. Repetir pasos del 2 al 5 de la *operación para un mismo color*.

MANTENIMIENTO

- Realizar una *limpieza general* de la cabina (interna y externa), la base móvil y el cuarto de succión (interna y externa) 1 vez por mes.
- Revisar el templado de la tela filtrante y que su sujeción esté en buenas condiciones, para que la tela no llegue a desgarrarse de los clavos que la sujetan. Realizar esta operación 1 vez por mes.
- Revisar que no existan hendiduras o huecos que no estén debidamente sellados con silicón en el cuarto de succión, lo que afecta considerablemente al rendimiento del sistema de extracción. Sellar adecuadamente cualquier hendidura encontrada y dejar secar antes de operar la cabina nuevamente. Realizar esta operación 1 vez por mes.
- APAGAR OBLIGATORIAMENTE EL BREAKER TRIFÁSICO  para realizar lo siguiente:
 - Una limpieza del ventilador centrífugo externa e interna y del motor, con aire comprimido y un paño seco.
 - Engrasar las chumaceras del eje del ventilador.
 - Revisar el estado de la *banda código B55* para realizar el cambio si se encuentran rajaduras grandes o un excesivo desgaste que puedan producir su rotura repentina al momento

de operar. Si la banda está en buenas condiciones *limpiarla* con un paño seco, revisar su tensión y templarla si es necesario.

- Revisar que todos los pernos de las chumaceras del eje del ventilador y los pernos de anclaje del motor estén correctamente apretados, tampoco no exceder el apriete normal.
- Revisar el ajuste y alineación de las poleas.

Realizar TODAS estas operaciones cada 3 meses.



ADVERTENCIA: Antes de poner a funcionar el ventilador nuevamente, asegúrese de que todas las piezas estén bien apretadas, de que todas las herramientas y los materiales se hayan removido y de que el personal se ha retirado.

- Revisar las conexiones internas (ajuste de tornillos de sujeción de los cables) del tablero de arranque 1 vez al año.
- Revisar las conexiones eléctricas cada 6 meses.

ADVERTENCIAS PARA LA CABINA Y EL CUARTO DE SUCCIÓN



- **NO PISAR** donde las planchas de acero galvanizado están suspendidas, sino sólo donde están sujetas con perfiles (Cabina) o a su vez en los perfiles visibles para el caso del cuarto de succión, para evitar deformaciones y daños en los agujeros de las planchas.
- La capacidad máxima del techo es de **90 Kg**, *sólo puede estar 1 persona en el techo* para cualquier labor de limpieza o mantenimiento, el exceder este límite resultará en daños en la estructura y techo de la cabina, y posibles accidentes.
- La capacidad recomendable máxima del cuarto de succión para operaciones de limpieza y mantenimiento es de **140 Kg**, *sólo pueden estar 2 personas subidas en la estructura* para evitar daños y posibles accidentes.



- La capacidad máxima recomendable de la base es de **210 kg** para que *sólo 2 personas y un mueble grande de hasta 132 lb o 60 Kg se ubiquen sobre la base simultáneamente.*

ADVERTENCIAS PARA EL SISTEMA DE FILTRADO



- NO LIMPIAR LOS FILTROS CON AIRE COMPRIMIDO, ya que se daña su característica filtrante al cambiar el tamaño de sus poros.



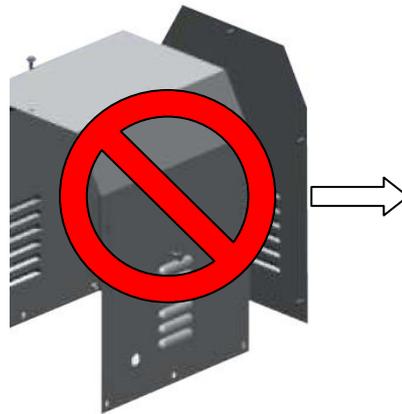
- NO pintar con otro color que no sea el correspondiente a los filtros colocados para no contaminar la tela filtrante, ya que no es posible remover el 100% de pintura que se adhiere a los filtros, la tela queda manchada y la nueva pintura que se fija se contamina.
- NO poner los filtros removidos en un área muy contaminada de gases, polvo e impurezas o a su vez donde existan riesgos de rasgaduras o perforaciones de la tela filtrante.
- NO realizar limpiezas innecesarias de los filtros, ya que esto acorta su vida útil considerablemente porque se dañan las fibras de la tela.
- NO realizar desmontajes innecesarios de los paneles filtrantes ya que esto deteriora la madera y pueden producirse daños en la tela filtrante y/o en los marcos.
- NO realizar limpiezas del área de pintura especial, como el área del horno o circundantes a la cabina *cuando el ventilador está encendido* ya que el polvo y cualquier impureza pequeña se levantan y son atraídas por la corriente grande de aire que entra a la cabina, lo que ensuciará la cabina y los filtros los cuales se deteriorarán.



ADVERTENCIAS PARA EL VENTILADOR CENTRÍFUGO Y MOTOR



- APAGAR el ventilador a la primera indicación de problema o de vibración, revise todo el sistema, ajuste de poleas, templado de banda, base del motor, estructura y planchas del cuarto de succión y de la cabina.
- NO UTILIZAR la cabina cuando los filtros no están colocados.
- NO operar el sistema sin la tapa protectora de la base del motor o si esta se encuentra sin pernos por motivos de seguridad y cuidado del equipo. Los acoplamientos deben tener la guarda de protección. NO ponga a funcionar el ventilador cuando se haya quitado la guarda.

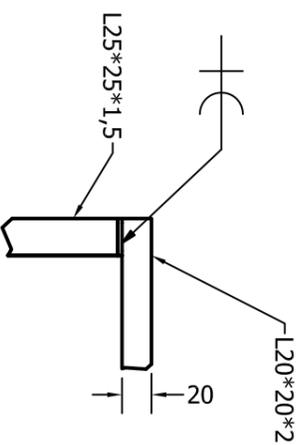


- NUNCA revisar el motor y/o ventilador, dar mantenimiento o limpiar cuando el breaker o interruptor principal está en posición ON.

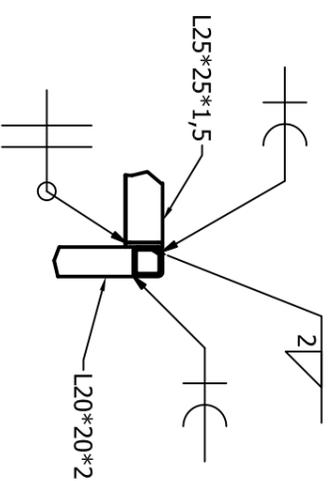


- NO manipular e inspeccionar el tablero de arranque si no es una persona especializada.

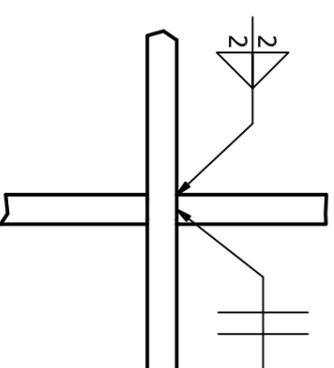
ANEXO L: PLANOS



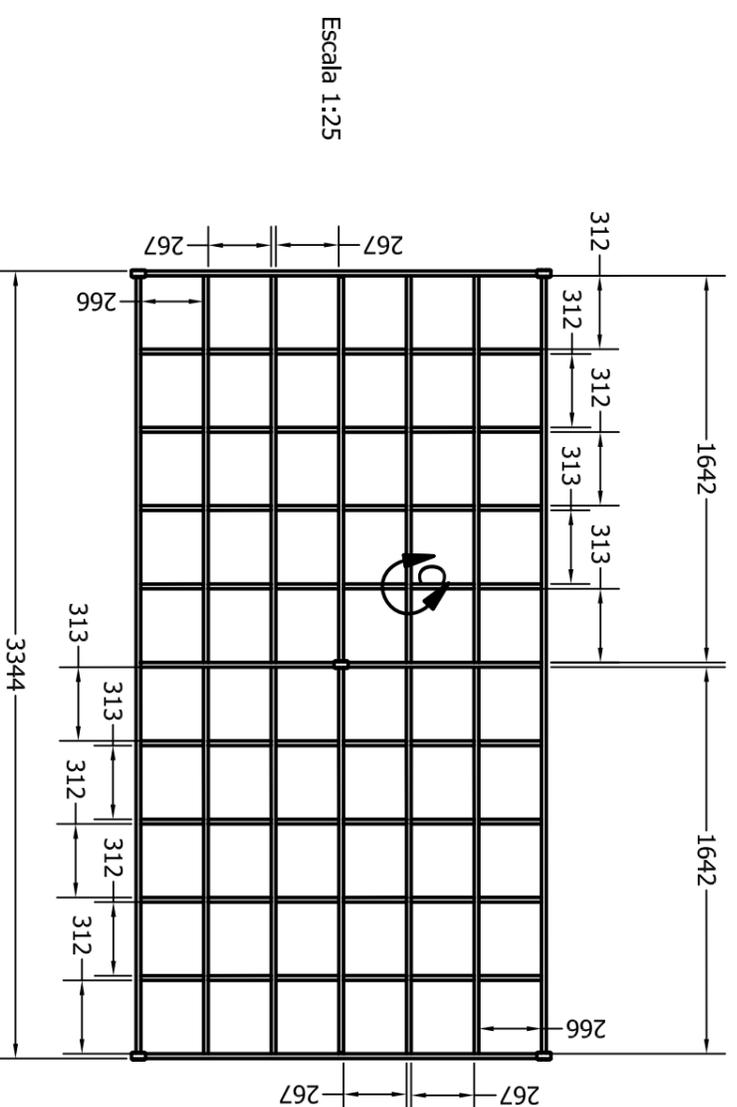
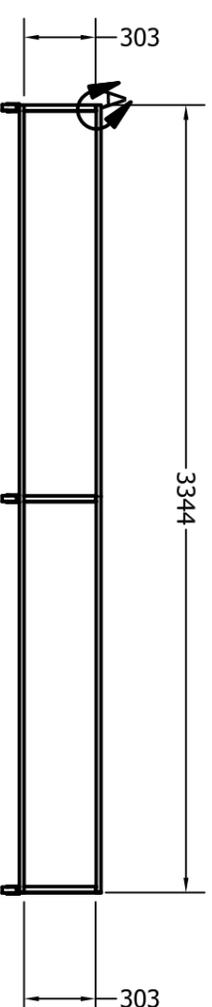
DETALLE A
ESCALA 1:4



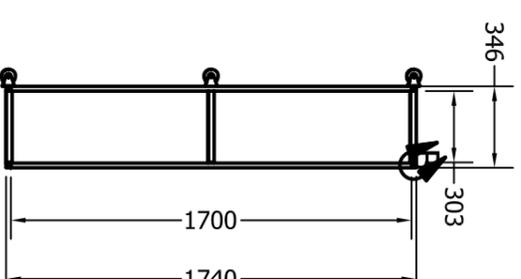
DETALLE B
ESCALA 1:4



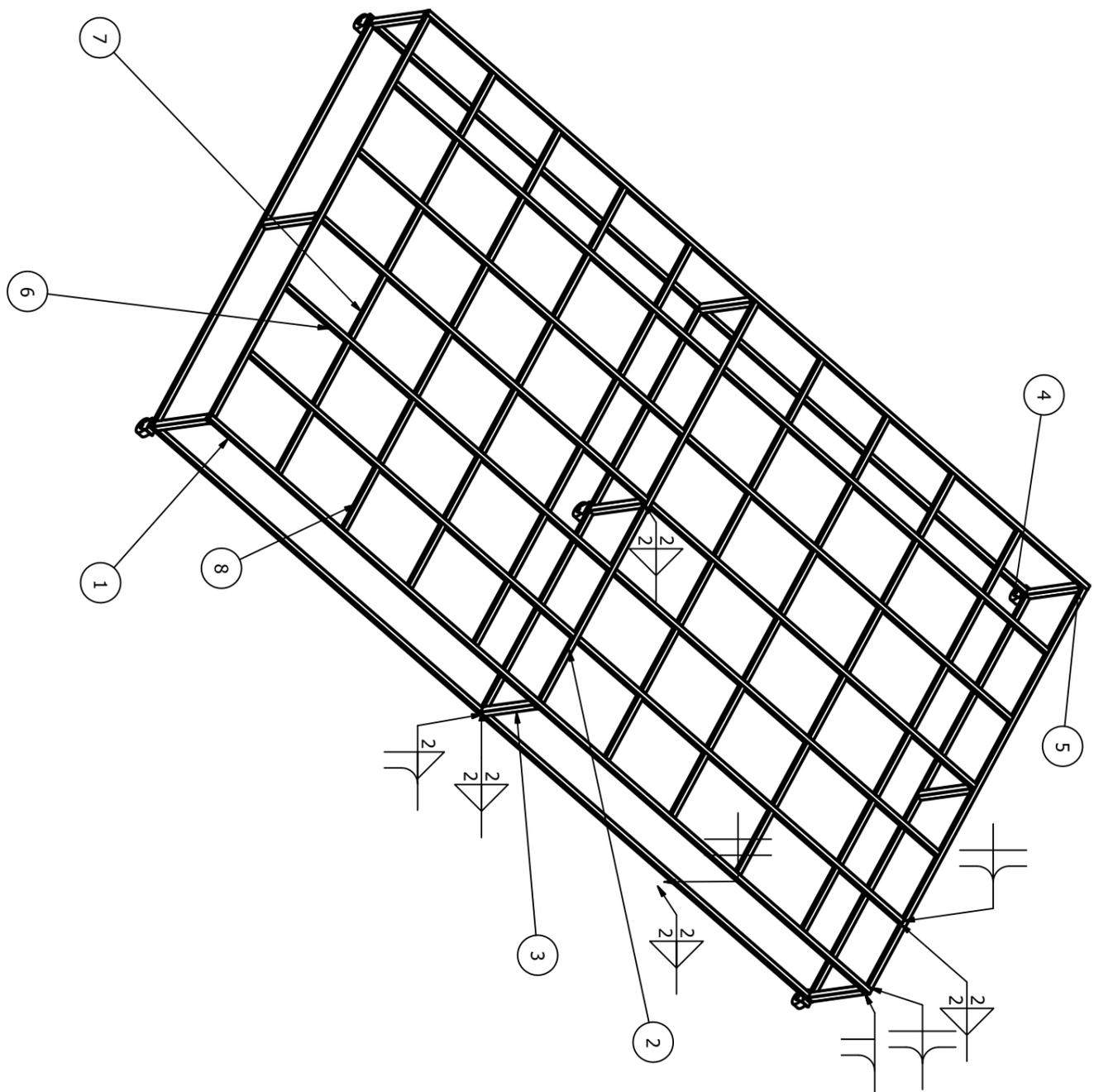
DETALLE C
ESCALA 1:4



Escala 1:25



Fecha	Nombre	Firma:	Material:	Cantidad:
01/12/10	David Espinoza.		VARIOS	N/A
15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Escala:
10/01/11	Franisco Temeus		Lista de materiales base	1:30
10/01/11	Edgardo Fernández		Código:	
ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			Sustituye a:	
			LMB-01	
				Hoja: 16/

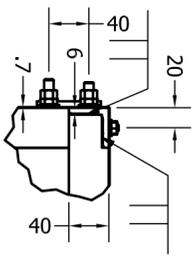


Escala 1:20

Parts List				
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS
1	13376,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 3344	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	3,604 kg
2	10200,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 1700	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	1,832 kg
3	2727,000 mm	ISO 657/14 - 25x25x2 - 303	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	0,422 kg
4	5	rueda base_CPY		0,083 kg
5	9	placa unión_CPY		0,002 kg
6	16420,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 1642	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	1,770 kg
7	8544,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 267	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	0,288 kg
8	4256,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 266	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	0,287 kg

Fecha	Nombre	Firma:	Material:	Cantidad:
01/12/10	David Espinoza.		VARIOS	N/A
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.	Denominación:	Escala:
Revisado	10/01/11	Franisco Temeus	Lista de materiales base	1:20
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández	Código:	
ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO			LMB-01	
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			Sustituye a:	
				Hoja: 24/

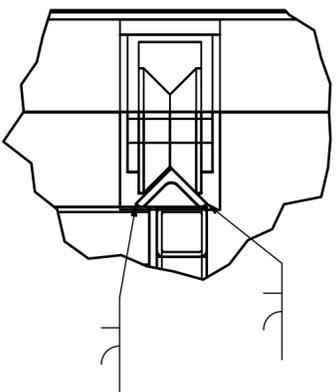




DETALLE L

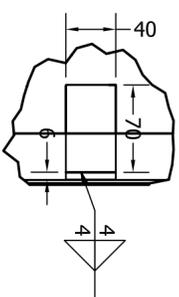
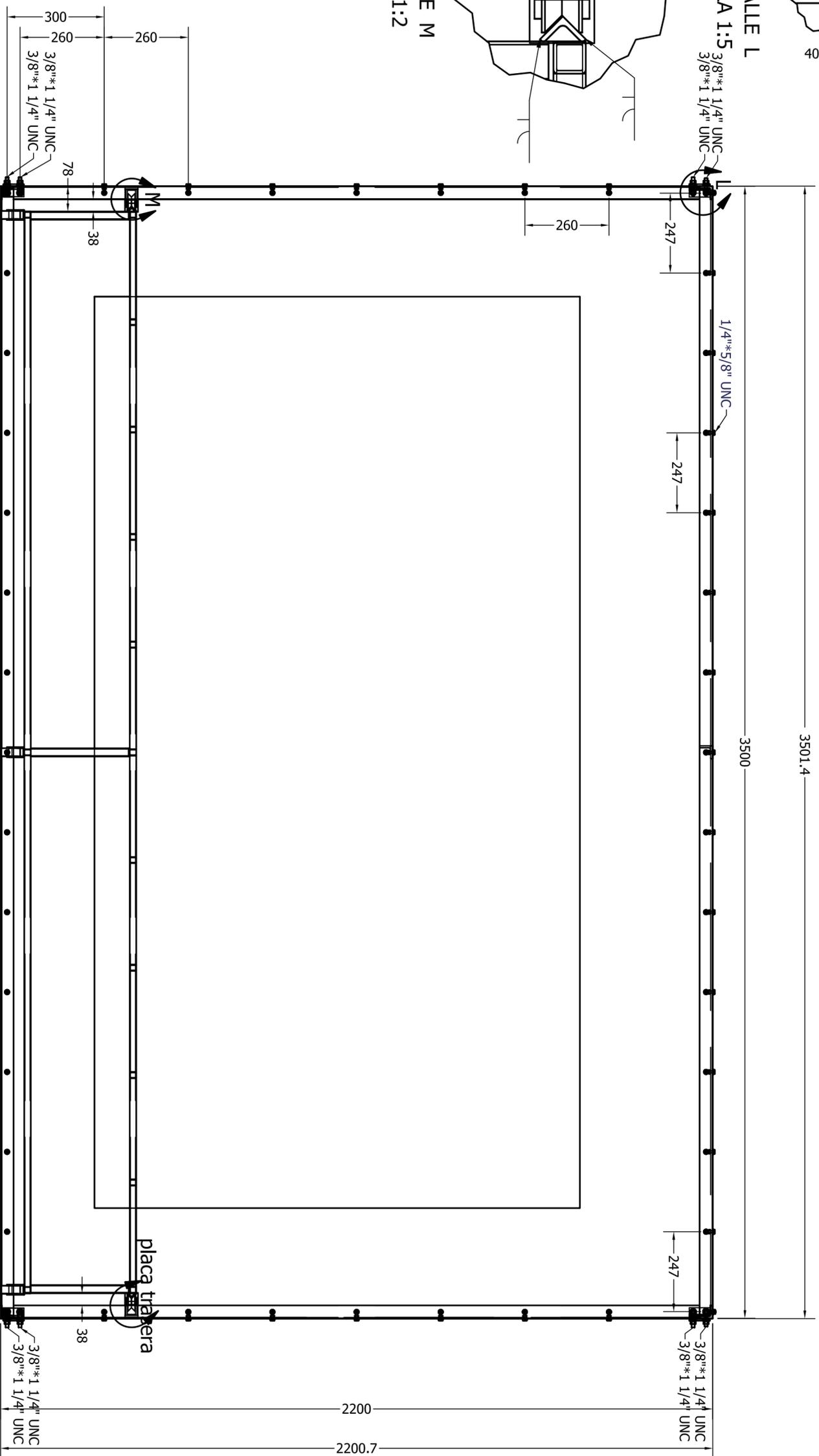
ESCALA 1:5

3/8" * 1 1/4" UNC



DETALLE M

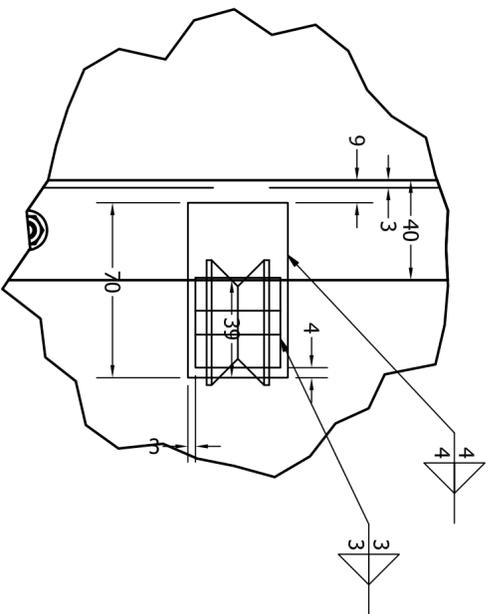
ESCALA 1:2



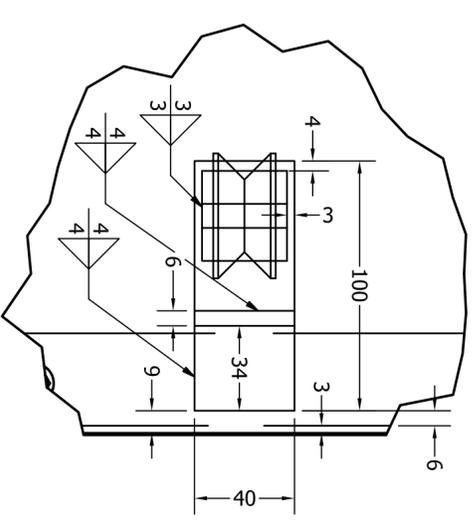
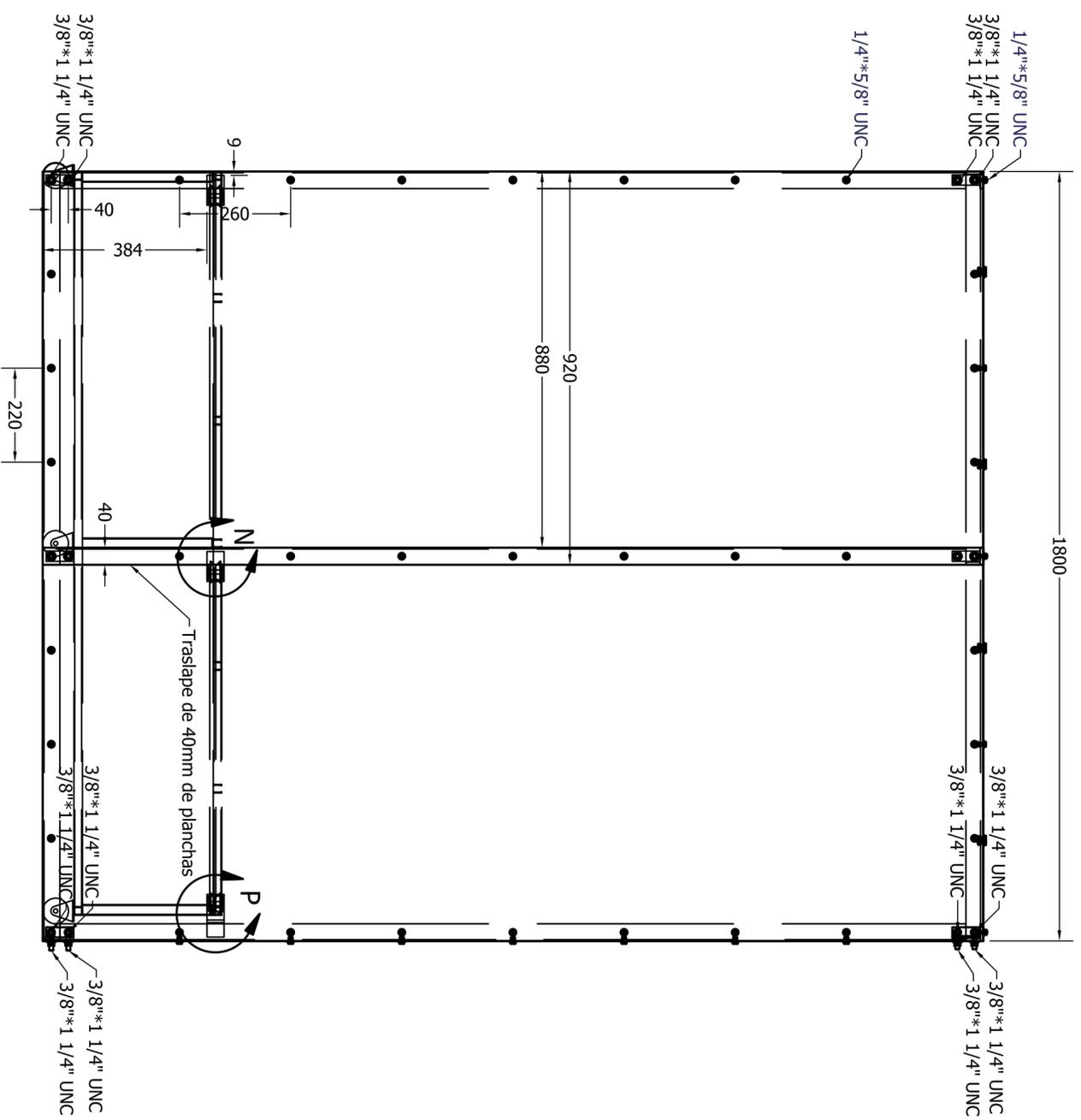
DETALLE placa trasera

ESCALA 1:4

Proyectado	Fecha	Nombre	Firma:	Material:	Cantidad:
01/12/10	01/12/10	David Espinoza		VARIOS	N/A
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Escala:
Revisado	10/01/11	Francisco Ternaus		Vista frontal cabina de pintura	1:10
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Código:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO				Sustituye a:	VFC-01
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA					Hoja: 25/



DETALLE N
ESCALA 1:2

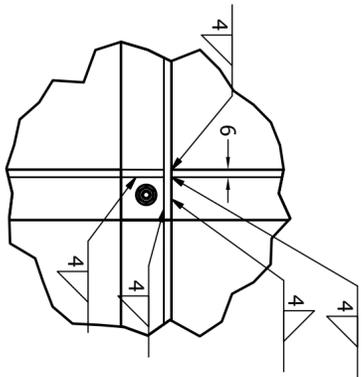


DETALLE P
ESCALA 1:2

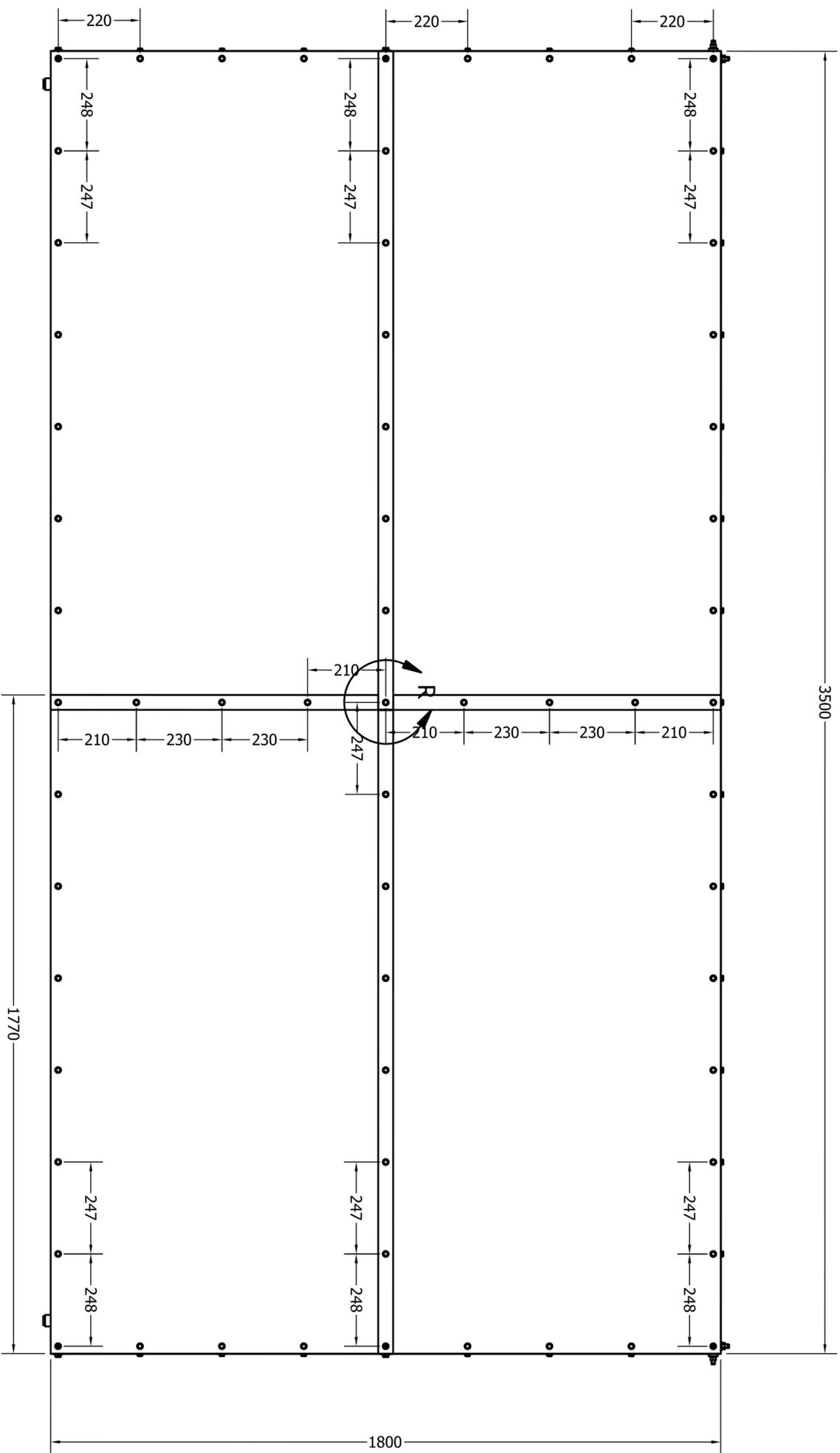
Fecha	Nombre	Firma:	Material:	Cantidad:
01/12/10	David Espinoza.		VARIOS	N/A
15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Escala:
10/01/11	Francisco Ternus		Vista lateral cabina de pintura	1:10
10/01/11	Edgardo Fernández		Código:	
			VL-C-01	

ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sustituye a:	
Hoja:	29/



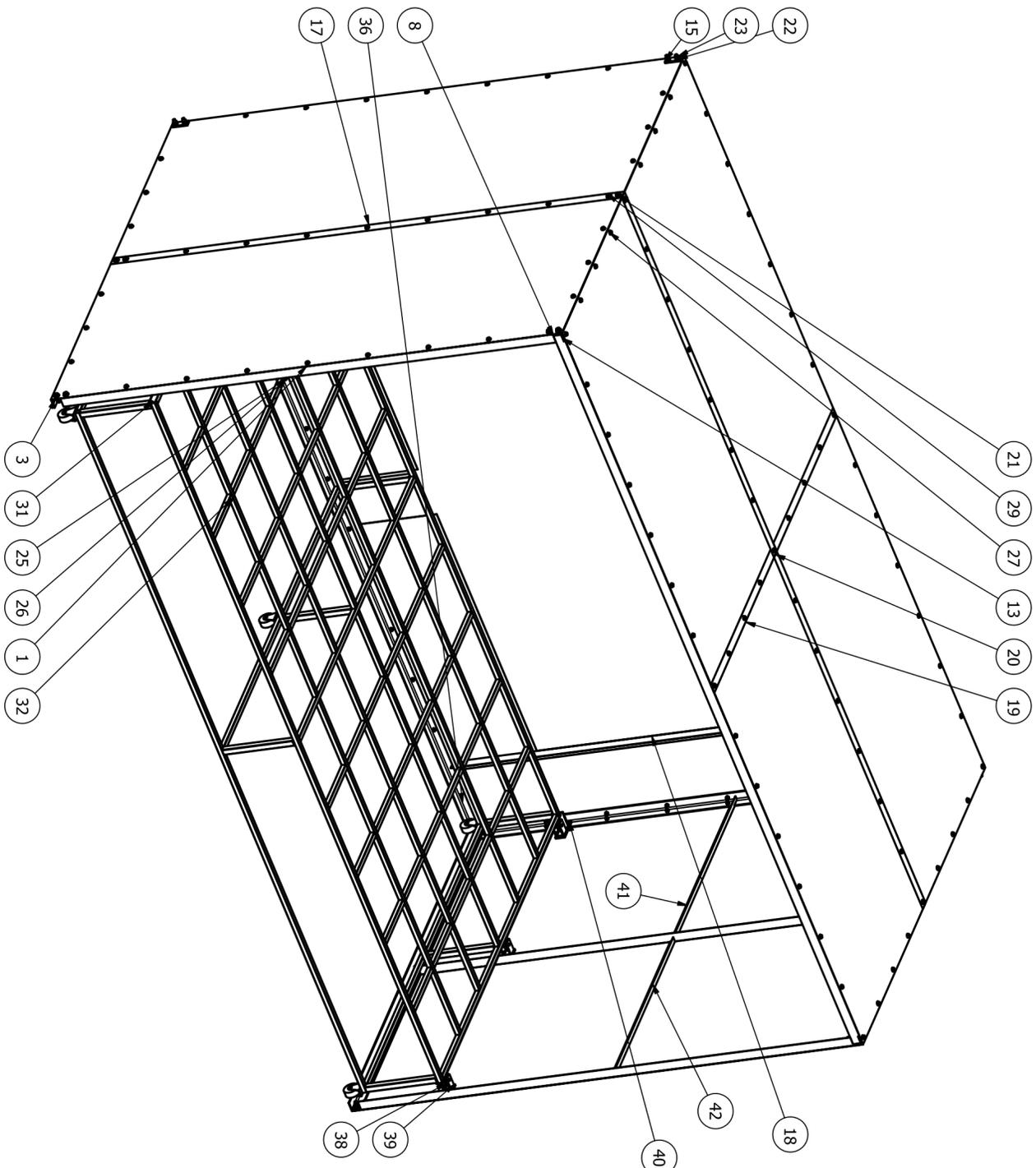
DETALLE R
ESCALA 1:4



Proyectado	Fecha	Nombre	Firma:	Materia:	Cantidad:
	01/12/10	David Espinoza.		VARIOS	N/A
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Escala:
Revisado	10/01/11	Francisco Tenneus		Vista superior cabina de pintura	1:10
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Código:	
				VL-C-01	

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO		Código:	VL-C-01	Hoja: 30/
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		Sustituye a:		





Escala 1:15

ITEM	QTY	PART NUMBER	MASS	DESCRIPTION
1	12720,000 mm	ISO 657-1 - L40x40x3-2120	*Varies*	Hot-rolled steel sections - Part 1: Equal-leg angles
3	3600,000 mm	ISO 657-1 - L40x40x3-1800	3,313 kg	Hot-rolled steel sections - Part 1: Equal-leg angles
8	10500,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 6 - 3500	*Varies*	Angle Steel
13	3600,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 6 - 1800	6,304 kg	Angle Steel
14	908,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 6 - 908	3,059 kg	Angle Steel
15	16	placa ángulos	0,008 kg	Angle Steel
16	874,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 6 - 874	3,006 kg	Angle Steel
17	4	pared lateral	1,416 kg	
18	1	pared trasera	2,387 kg	
19	2	pared superior	1,139 kg	
20	2	pared superior con corte	1,138 kg	
21	22	ASTM F436 - 3/8	0,009 lbmass	Washer A
22	26	ASME B18.21.1 - 3/8 Regular Lock Washers (Inch Series) Regular Helical Spring Lock Washers	0,007 lbmass	Lock Washers (Inch Series) Regular Helical Spring Lock Washers
23	32	AS 2465 - 3/8 UNC	0,019 lbmass	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)
25	169	AS 2465 - 1/4 UNC	0,009 lbmass	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)
26	169	AS 2465 - 1/4 x 5/8 UNC	0,016 lbmass	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)
27	169	ASTM F436 - 1/4	0,006 lbmass	Washer A
28	6	ASME B18.21.1 - 3/8 Heavy Lock Washers (Inch Series) Heavy Helical Spring Lock Washers	0,008 lbmass	Lock Washers (Inch Series) Heavy Helical Spring Lock Washers
29	32	AS 2465 - 3/8 x 1 1/4 UNC	0,058 lbmass	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)
31	3480,000 mm	SS 212711 - L 20 x 20 x 3 - 1740	1,531 kg	Angle Steel
32	1	Cabina_Cpy	61,135 kg	
36	3500,000 mm	ISO 657-1 - L40x40x3-3500	6,363 kg	Hot-rolled steel sections - Part 1: Equal-leg angles
38	6	rueda guía	0,052 kg	
39	6	placa rueda guía	0,017 kg	
40	2	placa rueda guía trasera	0,024 kg	
41	1828,000 mm	SS 212711 - L 20 x 20 x 3 - 914	0,767 kg	Angle Steel
42	1754,000 mm	SS 212711 - L 20 x 20 x 3 - 877	0,753 kg	Angle Steel
44	4240,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 2120	3,909 kg	Angle Steel
45	2800,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 2800	5,165 kg	Angle Steel

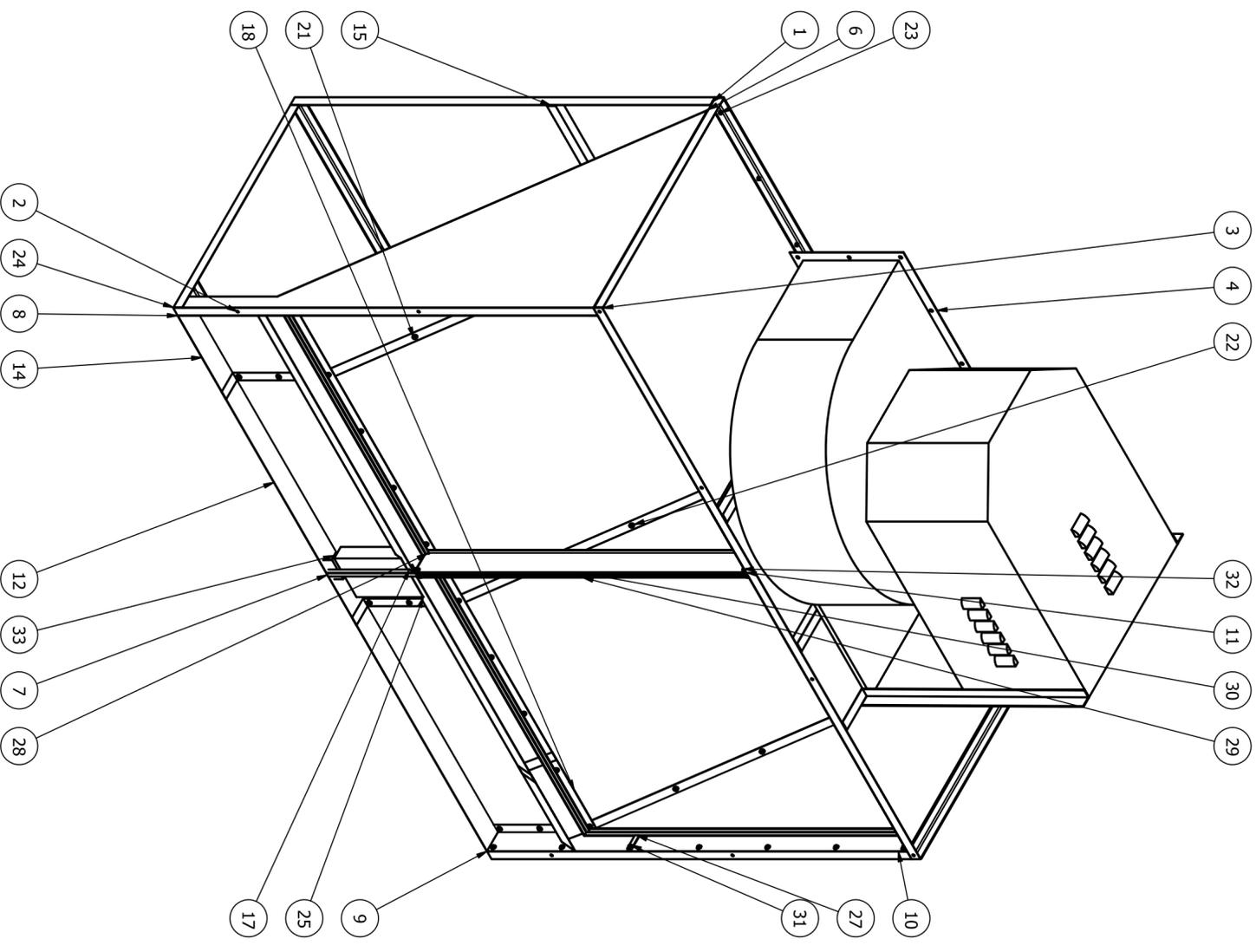
Parts List

Proyectado	01/12/10	David Espinoza	Firma:	Materia:	VARIOS	Cantidad:	N/A
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Lista partes cabina de pintura	Escala:	1:15
Revisado	10/01/11	Francisco Ternus		Código:	LMT-01		
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Sustituye a:			

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



Hoja: 32/



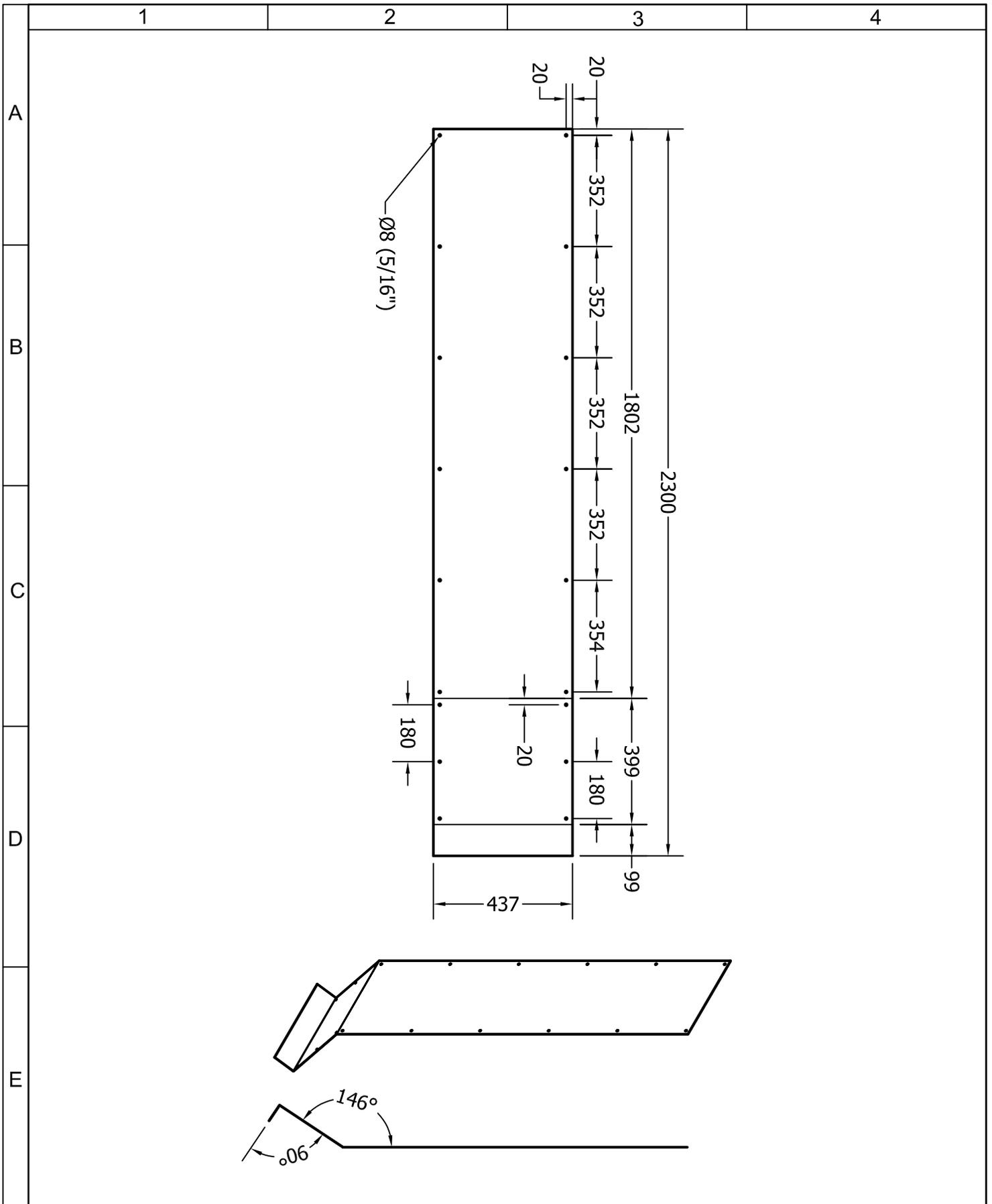
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION	MASS
1	8640,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 2880	Angle Steel	*Varies*
2	7600,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 1900	Angle Steel	*Varies*
3	5470,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 1094	Angle Steel	2,020 kg
4	1	ventiladorcentrifugo		158,033 kg
5	1416,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 708	Angle Steel	1,234 kg
6	1	pared superior csuc		6,931 kg
7	1900,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 1900	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	2,046 kg
8	1	pared lateral csuc lzd		0,717 kg
9	1	pared lateral csuc der		0,717 kg
10	1	pared superior csuc der		6,940 kg
11	1	pared superior csuc centro		0,360 kg
12	2	pared inclinada1 csuc		1,964 kg
13	3880,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 1940	Angle Steel	3,581 kg
14	1	pared inclinada2 csuc		0,703 kg
15	5748,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 2874	Angle Steel	5,305 kg
16	60,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 30	Angle Steel	0,055 kg
17	1	canal polvo1		0,406 kg
18	1	canal polvo2		0,067 kg
19	2082,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 694	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	0,748 kg
20	2200,000 mm	ISO 657/14 - 20x20x2 - 1100	Hot-rolled steel sections - part 14: hot-finished structural hollow sections - Dimensions and sectional properties	1,186 kg
21	84	AS 2465 - 1/4 x 1/2 UNC	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)	0,014 lbmass
22	140	ANSI B18.22.1 - 1/4 - Regular - Type B	Plain Washer (Inch)Type A and B	0,006 lbmass
23	90	AS 2465 - 1/4 UNC	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)	0,009 lbmass
24	2114,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 1057	Angle Steel	*Varies*
25	1	caja paredes		0,117 kg
26	1	caja base		0,015 kg
27	1	Panel filtros interno1		5,133 kg
28	1	Panel filtros interno		4,974 kg
29	1	plancha sellado1		0,111 kg
30	1	plancha sellado2		0,111 kg
31	4	AS 2465 - 1/4 x 5/8 UNC	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)	0,016 lbmass
32	2	AS 2465 - 1/4 x 1 1/2 UNC	Unified hexagon bolts, screws and nuts (UNC and UNF threads)	0,028 lbmass
33	100,000 mm	SS 212711 - L 40 x 40 x 3 - 100	Angle Steel	0,185 kg

Proyectado	01/12/10	David Espinoza.	Firma:		Materia:	VARIOS	Cantidad:	N/A
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.			Denominación:	Lista partes cuarto de succión	Escala:	1:15
Revisado	10/01/11	Francisco Ternus			Código:	LCS-01		
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández			Sustituye a:			

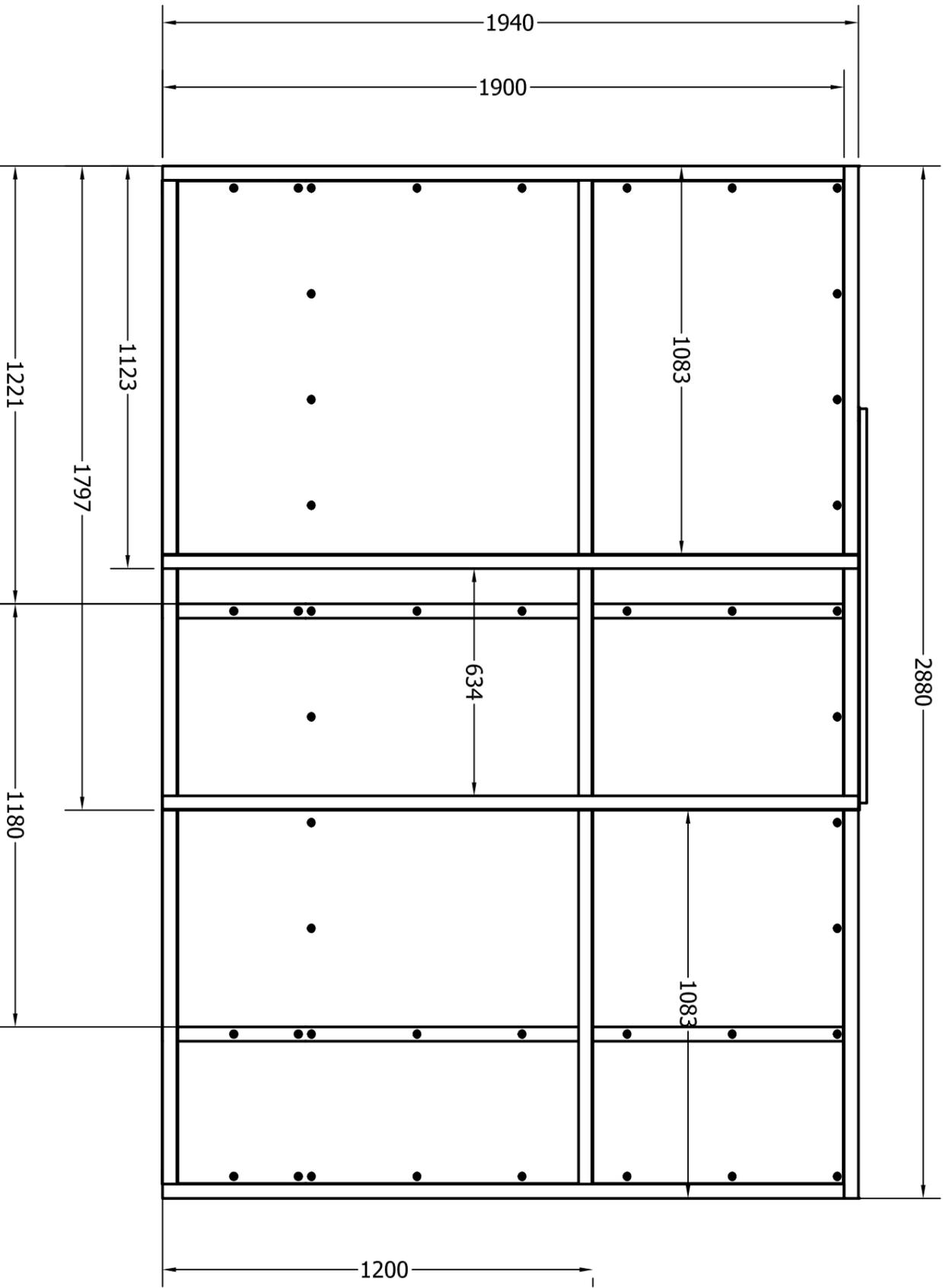
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
 FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



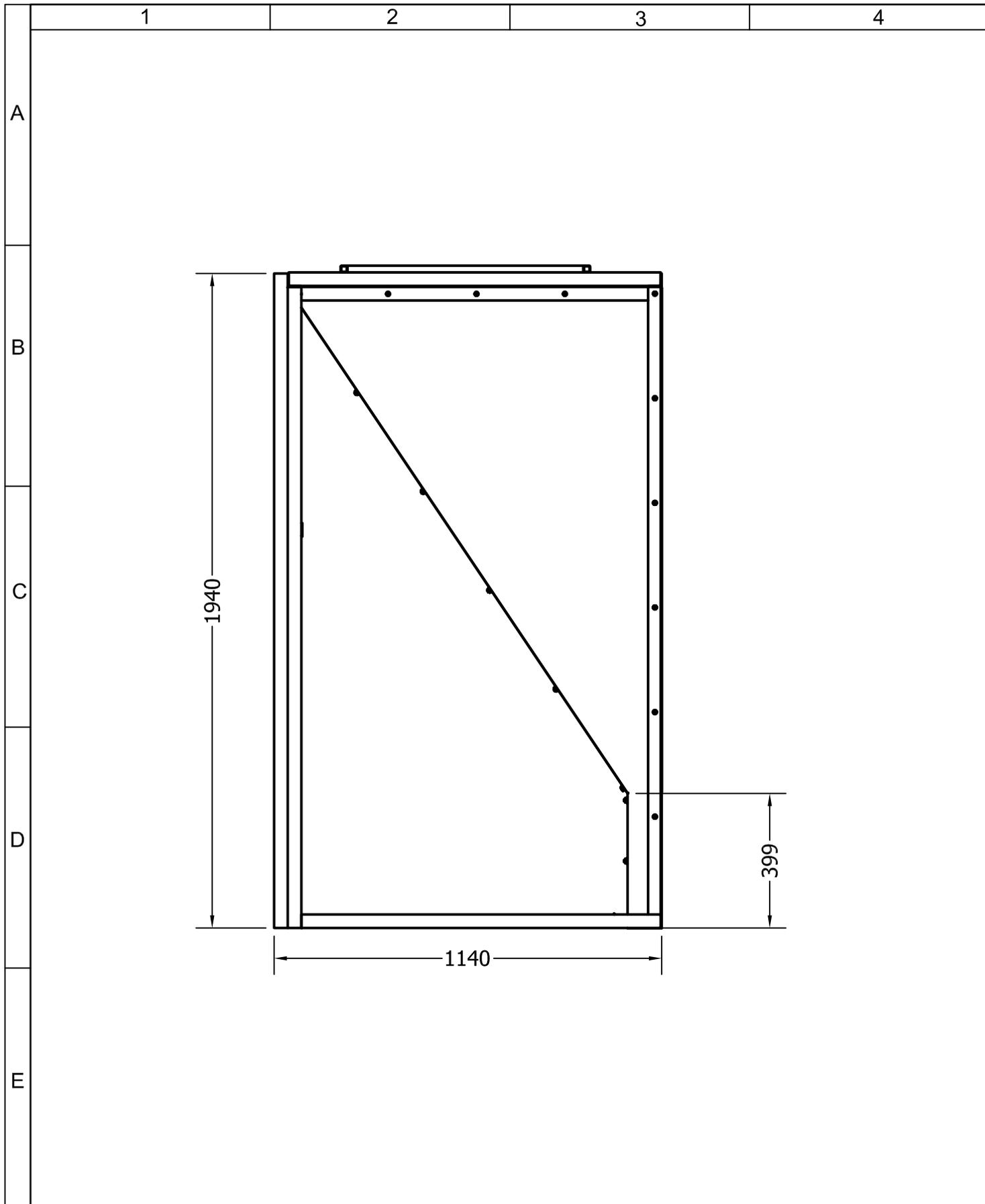
Hoja: 35/

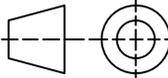


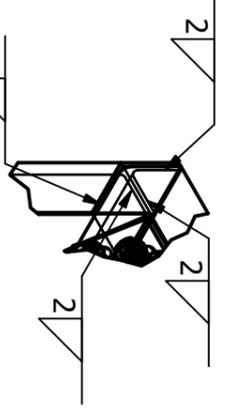
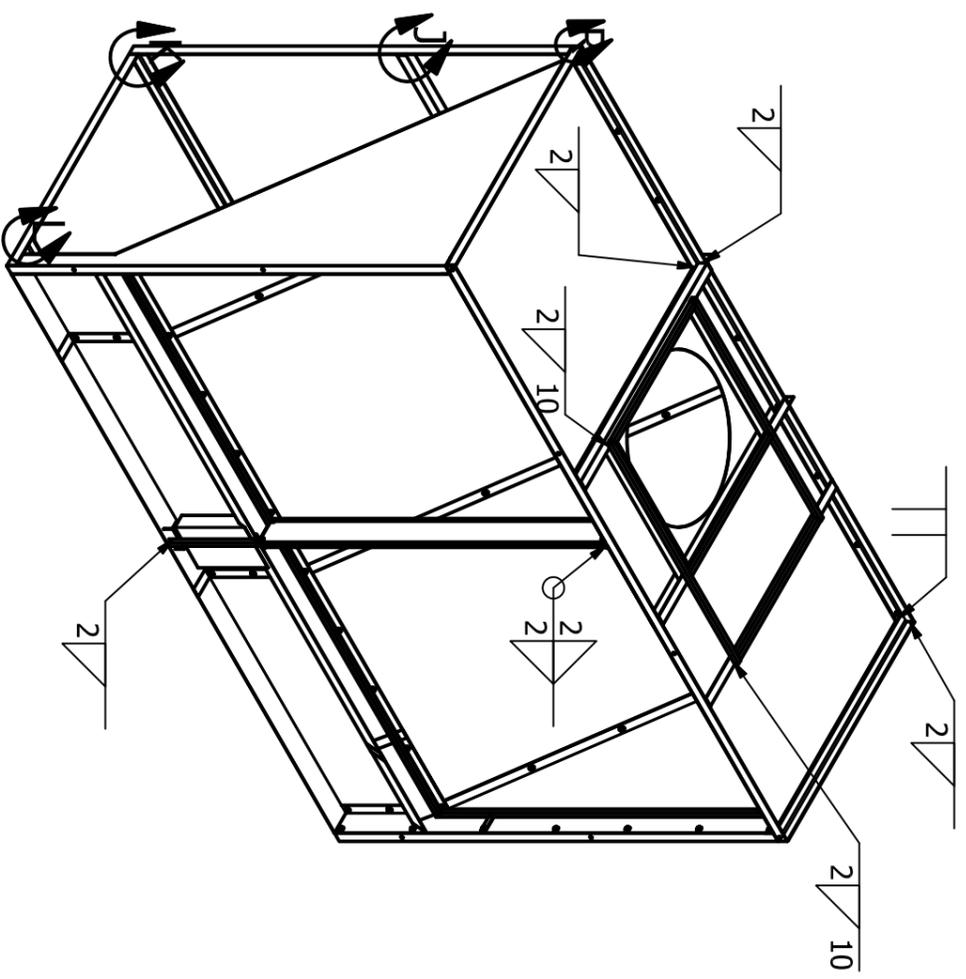
	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Proyectado	01/12/10	David Espinoza.		Acero galvanizado	1
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.			
Revisado	10/01/11	Francisco Terneus		Tapa posterior 2	Escala. 1:15
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA				Código:	
				SUSTITUYE A:	
					Hoja 47 /



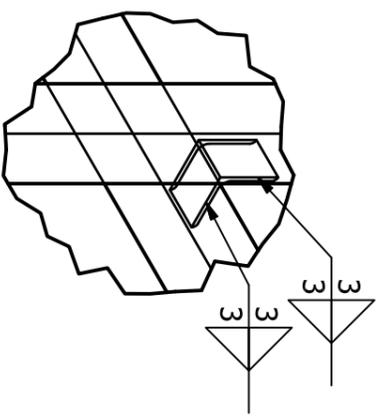
1	2	3	4	5	6	7	8																																
A	B	C	D	E	F																																		
<table border="1"> <tr> <td>Proyectado</td> <td>01/12/10</td> <td>David Espinoza.</td> <td>Firma:</td> <td>Material:</td> <td>Varios</td> <td>Cantidad:</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Dibujado</td> <td>15/12/10</td> <td>Alan Arrieta B.</td> <td></td> <td>Denominación:</td> <td>Vista posterior</td> <td>Escala:</td> <td>1:15</td> </tr> <tr> <td>Revisado</td> <td>10/01/11</td> <td>Francisco Terneus</td> <td></td> <td>Código:</td> <td>VIP-01</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprobado</td> <td>10/01/11</td> <td>Edgardo Fernández</td> <td></td> <td>Sustituye a:</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								Proyectado	01/12/10	David Espinoza.	Firma:	Material:	Varios	Cantidad:	1	Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Vista posterior	Escala:	1:15	Revisado	10/01/11	Francisco Terneus		Código:	VIP-01			Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Sustituye a:			
Proyectado	01/12/10	David Espinoza.	Firma:	Material:	Varios	Cantidad:	1																																
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Vista posterior	Escala:	1:15																																
Revisado	10/01/11	Francisco Terneus		Código:	VIP-01																																		
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Sustituye a:																																			
<p>ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																							
				Hoja: 73/																																			



	Fecha	Nombre	Firma	Material:	Cantidad:
Proyectado	01/12/10	David Espinoza.		Varios	1
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación: Vista lateral	Escala. 1:15
Revisado	10/01/11	Francisco Terneus			
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA				Código: VLA-01	
				SUSTITUYE A:	



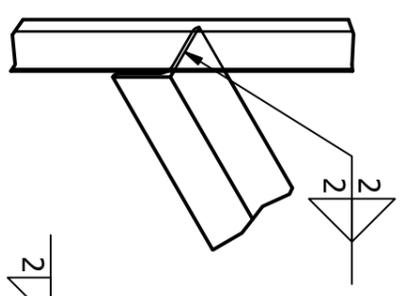
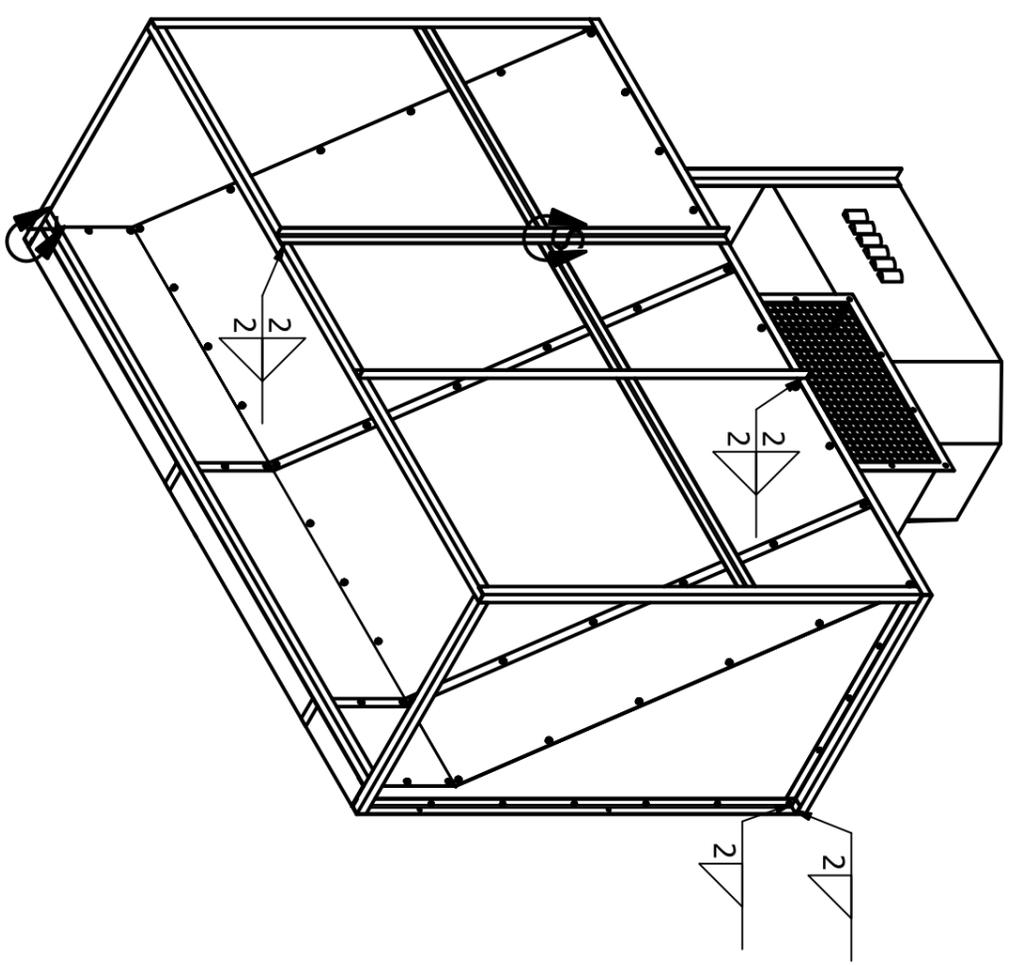
DETALLE R
ESCALE 1:4



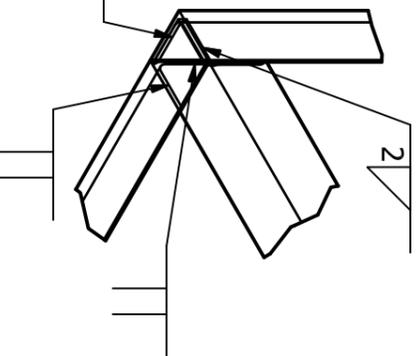
DETALLE S
ESCALA 1:4



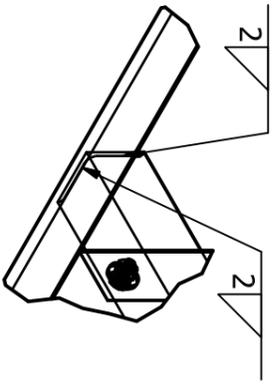
DETALLE T
ESCALA 1:4



DETALLE J
ESCALA 1:4



DETALLE K
ESCALA 1:4



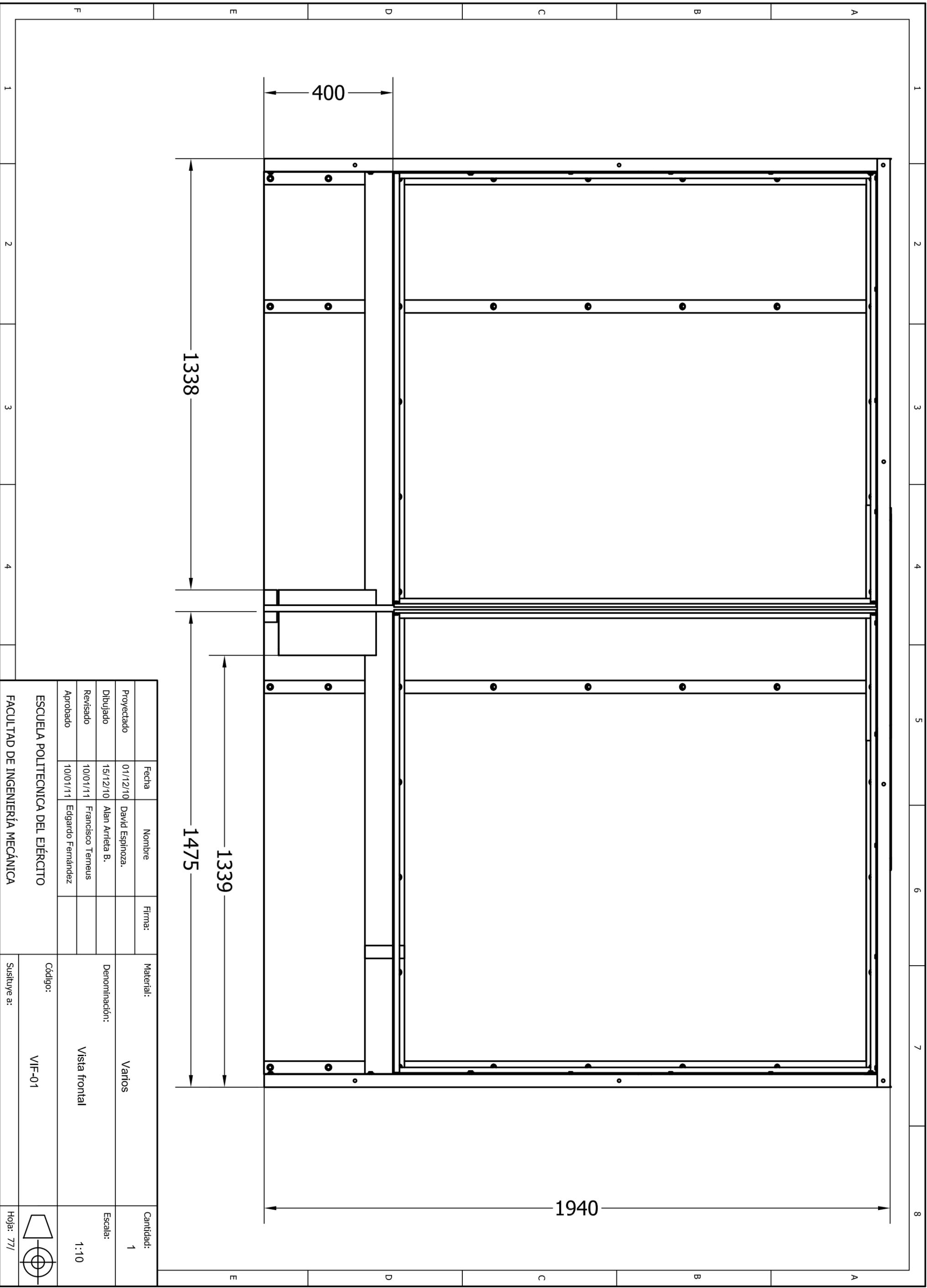
DETALLE L
ESCALA 1:4

1 2 3 4 5 6 7 8

A B C D E F

Proyectado	01/12/10	David Espinoza.	Firma:	Material:	Varios	Cantidad:	1
Dibujado	15/12/10	Alan Arrieta B.		Denominación:	Detalle de soldadura	Escala:	1:25
Revisado	10/01/11	Francisco Ternus		Código:	DTA-01		
Aprobado	10/01/11	Edgardo Fernández		Sustituye a:			
ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO							
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA							
			Hojá: 76/				

E D C B A



ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		Fecha: 01/12/10 Nombre: David Espinoza. Firma:	Material: Varios Denominación: Vista frontal Código: VIF-01	Cantidad: 1 Escala: 1:10
Proyectoado: 01/12/10 Dibuñado: 15/12/10 Revisado: 10/01/11 Aprobado: 10/01/11	Nombre: David Espinoza. Nombre: Alan Arrieta B. Nombre: Francisco Ternus Nombre: Edgardo Fernández	Firma:	Denominación: Vista frontal Código: VIF-01	Cantidad: 1 Escala: 1:10
Sustituye a:		Hoja: 77/		

