

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

## Diseño de una Máquina de Extracción de Humos para Mejorar la Calidad del Aire durante un Proceso de Soldadura

Para Obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Antoni Ricardo Cardenas Castañeda

 0009-0001-1527-1060

Asesor

Dr. Duilio Leoncio Aguilar Vizcarra

 0000-0002-2252-8901

LIMA - PERÚ

2025

---

Citar/How to cite	(Cardenas, 2025)
Referencia/Reference	Cardenas, A. (2025). <i>Diseño de una Máquina de Extracción de Humos para Mejorar la Calidad del Aire durante un Proceso de Soldadura</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar una máquina de extracción de humos para mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura. El sistema propuesto tiene una capacidad de 3 HP y un caudal operativo de 0,63 m<sup>3</sup>/s. La hipótesis plantea que dicho diseño contribuirá significativamente a reducir la contaminación ambiental en la zona de trabajo y en el entorno general. Se utilizó un enfoque cuantitativo con simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) para modelar las condiciones operativas. La metodología incluyó la evaluación de componentes esenciales como la campana de extracción, brazo articulado, colector y ventilador, optimizando su geometría, versatilidad y eficiencia energética.

Los resultados evidenciaron que el diseño propuesto reduce la concentración de contaminantes en la zona de respiración del soldador de 24,9 mg/m<sup>3</sup> a 0,7 mg/m<sup>3</sup> y en el ambiente de 643,7 mg/m<sup>3</sup> a valores indetectables (0 mg/m<sup>3</sup>), validando la hipótesis principal. Asimismo, se evidenció que la máquina representa una alternativa viable y competitiva en el mercado industrial actual. Este estudio no solo contribuye a mejorar la salud ocupacional, sino que también impulsa el desarrollo tecnológico en el sector metalmecánico.

**Palabras clave:** calidad del aire, extracción de humos, soldadura, diseño de máquinas.

## ABSTRACT

This study aims to design a smoke extraction machine to improve air quality during a welding process. The proposed system features a capacity of 3 HP and an operational flow rate of 0.63 m<sup>3</sup>/s. The hypothesis suggests that this design will significantly reduce environmental pollution in the workplace and surrounding areas. A quantitative approach was employed, utilizing computational fluid dynamics (CFD) simulations to model operational conditions. The methodology included evaluating critical components, such as the extraction hood, articulated arm, collector, and fan, optimizing their geometry, versatility, and energy efficiency.

The results demonstrated that the proposed design reduced contaminant concentrations in the welder's breathing zone from 24.9 mg/m<sup>3</sup> to 0.7 mg/m<sup>3</sup> and in the surrounding environment from 643.7 mg/m<sup>3</sup> to undetectable levels (0 mg/m<sup>3</sup>), validating the main hypothesis. Additionally, the machine proved to be a viable and competitive alternative in the current industrial market. This study not only enhances occupational health but also promotes technological advancement in the metalworking sector.

**Keywords:** air quality, fume extraction, welding, machine design.

# Lista de Contenidos

<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO I Generalidades .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes de la Investigación .....	1
1.1.1. Antecedentes Investigativos Internacionales .....	1
1.1.2. Antecedentes Investigativos Nacionales.....	5
1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio.....	9
1.3. Formulación del Problema .....	14
1.3.1. Problema General .....	14
1.3.2. Problemas Específicos .....	14
1.4. Justificación e Importancia .....	14
1.4.1. Justificación.....	14
1.4.2. Importancia .....	15
1.5. Objetivos .....	16
1.5.1. Objetivo General .....	16
1.5.2. Objetivos Específicos .....	16
1.6. Hipótesis .....	16
1.6.1. Hipótesis General.....	16
1.6.2. Hipótesis Específicas .....	16
1.7. Variables y Operacionalización de Variables.....	17
1.7.1. Variables .....	17
1.7.2. Operacionalización de Variables .....	17
1.8. Metodología de la Investigación .....	18
1.8.1. Unidad de Análisis.....	18
1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación .....	18
1.8.3. Diseño de la Investigación.....	20
1.8.4. Fuentes de Información.....	20
1.8.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	20
1.8.6. Análisis y Procesamiento de Datos .....	20
<b>CAPÍTULO II Marco Teórico y Marco Conceptual.....</b>	<b>21</b>
2.1. Bases Teóricas .....	21
2.1.1. Normas y Estándares .....	21
2.1.2. Procesos de Soldadura .....	23

2.1.3. Calidad del Aire .....	28
2.1.4. Sistemas de Extracción Localizada .....	31
2.1.4. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	45
2.2. Marco Conceptual: Definición de Términos o Conceptos .....	47
<b>CAPÍTULO III Desarrollo del Trabajo de Investigación.....</b>	<b>50</b>
3.1. Diseño de la Máquina de Extracción de Humos .....	50
3.1.1. Diseño de la Campana de Extracción.....	52
3.1.2. Diseño del Brazo Articulado .....	99
3.1.3. Diseño del Colector .....	192
3.1.4. Diseño del Ventilador .....	222
3.2. Análisis de la Máquina durante un Proceso de Soldadura.....	285
3.2.1. Simulación Computacional de la Máquina de Extracción de Humos.....	285
3.2.2. Procesamiento de Datos .....	297
<b>CAPÍTULO IV Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados</b>	
.....	<b>302</b>
4.1. Resultados .....	302
4.1.1. Proceso de Soldadura con la Máquina de Extracción Apagada .....	302
4.1.2. Proceso de Soldadura con la Máquina de Extracción Encendida....	303
4.2. Contrastación de Hipótesis.....	304
4.2.1. Verificación de la Hipótesis General .....	306
4.2.2. Verificación de la Primera Hipótesis Específica .....	306
4.2.3. Verificación de la Segunda Hipótesis Específica.....	306
4.3. Discusión de Resultados.....	307
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>308</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>309</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>311</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>318</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	17
<b>Tabla 2</b> Procesos de soldadura usuales.....	26
<b>Tabla 3</b> Producción de humos de soldadura.....	30
<b>Tabla 4</b> Velocidades de captura recomendadas.....	34
<b>Tabla 5</b> Velocidades de aire en los ductos .....	37
<b>Tabla 6</b> Parámetros adimensionales de los ventiladores .....	42
<b>Tabla 7</b> Velocidades del aire en la campana de extracción .....	53
<b>Tabla 8</b> Materiales de fabricación usuales en ventilación .....	58
<b>Tabla 9</b> Matriz de decisión del material de la campana de extracción .....	60
<b>Tabla 10</b> Mangueras flexibles estándar en ventilación.....	63
<b>Tabla 11</b> Tabulación de dimensiones para la apertura rectangular.....	77
<b>Tabla 12</b> Tabulación de dimensiones de la apertura elíptica .....	83
<b>Tabla 13</b> Diámetros de empuñaduras.....	85
<b>Tabla 14</b> Diámetros de fundas ergonómicas .....	85
<b>Tabla 15</b> Geometría de las transiciones de apertura rectangular.....	89
<b>Tabla 16</b> Geometría de las transiciones de apertura elíptica .....	90
<b>Tabla 17</b> Simulación de las transiciones de apertura rectangular.....	95
<b>Tabla 18</b> Simulación de las transiciones de apertura elíptica.....	96
<b>Tabla 19</b> Rangos de movimiento del brazo articulado .....	102
<b>Tabla 20</b> Calibres en ángulos de lados iguales.....	118
<b>Tabla 21</b> Espesor de tubos de Acero al Carbono .....	146
<b>Tabla 22</b> Resistencia a la tracción en alambres de acero.....	175
<b>Tabla 23</b> Caída de presión estática en filtros de cartuchos.....	196
<b>Tabla 24</b> Materiales típicos en filtros de cartuchos .....	197
<b>Tabla 25</b> Catálogo de filtros de cartuchos.....	198
<b>Tabla 26</b> Escala de Beaufort .....	223

<b>Tabla 27</b> <i>Estándares nacionales del nivel de ruido</i> .....	223
<b>Tabla 28</b> <i>Clasificación de motores por velocidad de rotación</i> .....	225
<b>Tabla 29</b> <i>Datos técnicos del motor eléctrico trifásico de 3 HP y 60 Hz en alta</i> .....	269
<b>Tabla 30</b> <i>Conexiones entre el eje de un motor y el cubo de una máquina</i> .....	277
<b>Tabla 31</b> <i>Diámetro del cubo de una máquina respecto al eje de transmisión</i> .....	278
<b>Tabla 32</b> <i>Distribución másica de diversos humos de soldadura en 6 minutos</i> .....	290
<b>Tabla 33</b> <i>Flujos másicos de las partículas ingresadas a la simulación</i> .....	291
<b>Tabla 34</b> <i>Concentración de humos con la máquina de extracción apagada y encendida</i> .....	304

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Zona de trabajo en soldadura .....	9
<b>Figura 2</b> Cabina estándar en soldadura .....	10
<b>Figura 3</b> Extractor de humos de soldadura.....	11
<b>Figura 4</b> Presupuesto de un extractor de humos importado .....	12
<b>Figura 5</b> Presupuesto de un extractor de humos nacional.....	13
<b>Figura 6</b> Procesos de soldadura y de unión .....	24
<b>Figura 7</b> Procesos afines de soldadura .....	25
<b>Figura 8</b> Zona de respiración de una persona.....	30
<b>Figura 9</b> Sistema de extracción localizada .....	32
<b>Figura 10</b> Campanas de extracción.....	33
<b>Figura 11</b> Caudal de aire en una campana de extracción .....	35
<b>Figura 12</b> Tipos de ductos.....	36
<b>Figura 13</b> Componentes de un colector.....	38
<b>Figura 14</b> Filtros de manga .....	39
<b>Figura 15</b> Filtros de cartucho.....	39
<b>Figura 16</b> Colector ciclónico.....	40
<b>Figura 17</b> Curvas características de un ventilador.....	43
<b>Figura 18</b> Ventilador centrífugo y axial.....	44
<b>Figura 19</b> Diagrama de Cordier.....	44
<b>Figura 20</b> Máquina de extracción de humos.....	51
<b>Figura 21</b> Caudal de aire en una campana de extracción .....	52
<b>Figura 22</b> Velocidad de captura en la campana de extracción .....	54
<b>Figura 23</b> Velocidades del aire en la campana de extracción.....	55
<b>Figura 24</b> Zona de influencia.....	56
<b>Figura 25</b> Operación de la campana de extracción .....	57
<b>Figura 26</b> Campo de succión .....	57

<b>Figura 27</b> Componentes de la campana de extracción.....	61
<b>Figura 28</b> Ducto de acople .....	62
<b>Figura 29</b> Mangueras flexibles estándar en ventilación.....	64
<b>Figura 30</b> Conexión entre el ducto de acople y la manguera flexible.....	65
<b>Figura 31</b> Dimensionamiento del ducto de acople.....	68
<b>Figura 32</b> Transición de la apertura.....	68
<b>Figura 33</b> Ángulo de apertura.....	70
<b>Figura 34</b> Ángulo de generación .....	71
<b>Figura 35</b> Apertura rectangular .....	71
<b>Figura 36</b> Apertura elíptica.....	72
<b>Figura 37</b> Definición de la apertura rectangular.....	72
<b>Figura 38</b> Parametrización de la apertura rectangular.....	73
<b>Figura 39</b> Definición de la transición de apertura elíptica .....	78
<b>Figura 40</b> Parametrización de la transición de apertura elíptica .....	79
<b>Figura 41</b> Empuñadura .....	84
<b>Figura 42</b> Funda ergonómica .....	84
<b>Figura 43</b> Dimensionamiento de la empuñadura.....	87
<b>Figura 44</b> Preproceso de la campana de extracción.....	91
<b>Figura 45</b> Mallado de la campana de extracción y del fluido .....	92
<b>Figura 46</b> Postproceso de la campana de extracción.....	94
<b>Figura 47</b> Dimensionamiento de la campana de extracción .....	97
<b>Figura 48</b> Desarrollo de la transición.....	98
<b>Figura 49</b> Modelo tridimensional de la campana de extracción .....	98
<b>Figura 50</b> Configuración del brazo articulado .....	99
<b>Figura 51</b> Diagrama cinemático del brazo articulado.....	100
<b>Figura 52</b> Rangos de movimiento del brazo articulado.....	101
<b>Figura 53</b> Desplazamiento horizontal.....	104
<b>Figura 54</b> Componentes del brazo articulado.....	105

<b>Figura 55</b> <i>Ducto del brazo</i> .....	106
<b>Figura 56</b> <i>Articulación de brazo primario con el secundario</i> .....	108
<b>Figura 57</b> <i>Manguera flexible del brazo principal con el secundario</i> .....	108
<b>Figura 58</b> <i>Soporte articulado del brazo primario con el secundario</i> .....	112
<b>Figura 59</b> <i>Conector para el ducto del brazo principal con el secundario</i> .....	112
<b>Figura 60</b> <i>Conector para la extensión fija del brazo principal con el secundario</i> .....	115
<b>Figura 61</b> <i>Extensión fija del brazo principal con el secundario</i> .....	121
<b>Figura 62</b> <i>Diseño de la articulación del brazo principal con el secundario</i> .....	123
<b>Figura 63</b> <i>Articulación del brazo con la campana de extracción</i> .....	124
<b>Figura 64</b> <i>Soporte articulado del brazo con la campana de extracción</i> .....	125
<b>Figura 65</b> <i>Diseño de la extensión fija del brazo con la campana de extracción</i> .....	127
<b>Figura 66</b> <i>Primera rotación de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> .....	128
<b>Figura 67</b> <i>Segunda rotación de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> .....	128
<b>Figura 68</b> <i>Dimensionamiento de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> .....	131
<b>Figura 69</b> <i>Nuevo dimensionamiento de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> .....	132
<b>Figura 70</b> <i>Fases del desarrollo de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> .....	134
<b>Figura 71</b> <i>Diseño de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i> ....	135
<b>Figura 72</b> <i>Desarrollo de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción</i>	135
<b>Figura 73</b> <i>Dimensionamiento del conector para la campana del brazo con la campana de extracción</i> .....	137
<b>Figura 74</b> <i>Diseño del conector para la campana del brazo con la campana de extracción</i> .....	140
<b>Figura 75</b> <i>Desarrollo del conector para la campana del brazo con la campana de extracción</i> .....	141
<b>Figura 76</b> <i>Articulación de la base giratoria</i> .....	142

<b>Figura 77</b> <i>Soporte articulado de la base giratoria</i> .....	143
<b>Figura 78</b> <i>Conector para el ducto de la base giratoria</i> .....	145
<b>Figura 79</b> <i>Diseño del conector para el ducto de la base giratoria</i> .....	149
<b>Figura 80</b> <i>Diseño del conector para el resorte</i> .....	150
<b>Figura 81</b> <i>Punto de anclaje del resorte en el brazo primario</i> .....	151
<b>Figura 82</b> <i>División del brazo articulado en tramos</i> .....	152
<b>Figura 83</b> <i>Centroides y volúmenes del tramo 1 clasificados por material</i> .....	153
<b>Figura 84</b> <i>Peso y centroide del tramo 1</i> .....	157
<b>Figura 85</b> <i>Centroides y volúmenes del tramo 2 clasificados por material</i> .....	157
<b>Figura 86</b> <i>Peso y centroide del tramo 2</i> .....	161
<b>Figura 87</b> <i>Centroides y volúmenes del tramo 3 clasificados por material</i> .....	162
<b>Figura 88</b> <i>Peso y centroide del tramo 3</i> .....	165
<b>Figura 89</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 0°</i> .....	166
<b>Figura 90</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 15°</i> .....	167
<b>Figura 91</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 30°</i> .....	168
<b>Figura 92</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 45°</i> .....	169
<b>Figura 93</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 60°</i> .....	171
<b>Figura 94</b> <i>Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 75°</i> .....	172
<b>Figura 95</b> <i>Longitud del resorte estirado vs fuerza en el resorte</i> .....	174
<b>Figura 96</b> <i>Dimensiones del resorte helicoidal a tracción sin carga</i> .....	176
<b>Figura 97</b> <i>Diseño del resorte helicoidal a tracción</i> .....	180
<b>Figura 98</b> <i>Soporte giratorio</i> .....	181
<b>Figura 99</b> <i>Ducto giratorio</i> .....	182
<b>Figura 100</b> <i>Brida fija superior</i> .....	183
<b>Figura 101</b> <i>Brida fija inferior</i> .....	185
<b>Figura 102</b> <i>Cargas en las billas de acero</i> .....	186
<b>Figura 103</b> <i>Rodamiento de bolas 6004</i> .....	188
<b>Figura 104</b> <i>Diseño del soporte giratorio</i> .....	189

<b>Figura 105</b> <i>Dimensionamiento del brazo articulado</i> .....	190
<b>Figura 106</b> <i>Modelo tridimensional del brazo articulado</i> .....	191
<b>Figura 107</b> <i>Componentes del colector</i> .....	193
<b>Figura 108</b> <i>Funcionamiento de un filtro de cartucho</i> .....	194
<b>Figura 109</b> <i>Caída de presión estática con un filtro de cartucho limpio</i> .....	195
<b>Figura 110</b> <i>Caída de presión estática con un filtro de cartucho sucio</i> .....	196
<b>Figura 111</b> <i>Dimensiones del filtro de cartucho</i> .....	199
<b>Figura 112</b> <i>Método de anclaje del filtro</i> .....	200
<b>Figura 113</b> <i>Ejemplo de la fabricación del anclaje para el filtro</i> .....	201
<b>Figura 114</b> <i>Dimensiones del gancho y del anclaje para el filtro</i> .....	201
<b>Figura 115</b> <i>Ejemplo de la instalación de garruchas</i> .....	202
<b>Figura 116</b> <i>Conductos del cuerpo del colector</i> .....	203
<b>Figura 117</b> <i>Dimensiones de la sección de los conductos del cuerpo del colector</i> .....	205
<b>Figura 118</b> <i>Deflectores del colector</i> .....	206
<b>Figura 119</b> <i>Ejemplo de la fabricación de los deflectores</i> .....	208
<b>Figura 120</b> <i>Dimensiones de los conductos del cuerpo del colector</i> .....	209
<b>Figura 121</b> <i>Maniobra para retirar el filtro</i> .....	210
<b>Figura 122</b> <i>Agujeros para el filtro y el depósito</i> .....	211
<b>Figura 123</b> <i>Tapa para el filtro</i> .....	212
<b>Figura 124</b> <i>Depósito del colector</i> .....	213
<b>Figura 125</b> <i>Ejemplo de la fabricación del depósito para el colector</i> .....	213
<b>Figura 126</b> <i>Sistema de limpieza</i> .....	214
<b>Figura 127</b> <i>Ejemplo de la fabricación del sistema de limpieza</i> .....	215
<b>Figura 128</b> <i>Agujero y tapa para el sistema de limpieza</i> .....	216
<b>Figura 129</b> <i>Dimensionamiento del Colector</i> .....	217
<b>Figura 130</b> <i>Modelo tridimensional del colector</i> .....	218
<b>Figura 131</b> <i>Velocidades del aire en el sistema</i> .....	219
<b>Figura 132</b> <i>Presiones del aire en el sistema</i> .....	220

<b>Figura 133</b>	<i>Caída de presión estática sin el filtro.....</i>	221
<b>Figura 134</b>	<i>Parámetros de diseño de un rotor centrífugo .....</i>	227
<b>Figura 135</b>	<i>Trazado frontal de la aleta del rotor centrífugo .....</i>	236
<b>Figura 136</b>	<i>Velocidades del aire en la aleta.....</i>	237
<b>Figura 137</b>	<i>Trazado lateral de la aleta del rotor centrífugo .....</i>	242
<b>Figura 138</b>	<i>Dimensionamiento del rotor centrífugo.....</i>	244
<b>Figura 139</b>	<i>Trazado de la carcasa.....</i>	245
<b>Figura 140</b>	<i>Dimensiones de la carcasa .....</i>	247
<b>Figura 141</b>	<i>Ducto de succión de la carcasa.....</i>	248
<b>Figura 142</b>	<i>Dimensionamiento de la carcasa del ventilador centrífugo.....</i>	251
<b>Figura 143</b>	<i>Extensión de los ductos de succión y descarga del ventilador centrífugo... </i>	253
<b>Figura 144</b>	<i>Elemento rotacional del ventilador centrífugo.....</i>	253
<b>Figura 145</b>	<i>Geometría de la simulación del ventilador centrífugo.....</i>	254
<b>Figura 146</b>	<i>Volúmenes de control de la simulación del ventilador centrífugo.....</i>	255
<b>Figura 147</b>	<i>Malla de la simulación del ventilador centrífugo .....</i>	256
<b>Figura 148</b>	<i>Variables iniciales de la simulación del ventilador centrífugo.....</i>	257
<b>Figura 149</b>	<i>Resultados de la simulación del ventilador centrífugo .....</i>	260
<b>Figura 150</b>	<i>Curva de caudal vs. presión estática del ventilador centrífugo .....</i>	262
<b>Figura 151</b>	<i>Curva de caudal vs. consumo de potencia del ventilador centrífugo .....</i>	262
<b>Figura 152</b>	<i>Curva de caudal vs. eficiencia del ventilador centrífugo .....</i>	263
<b>Figura 153</b>	<i>Trazado de velocidades en el punto de operación del ventilador centrífugo</i>	264
<b>Figura 154</b>	<i>Trazado de presiones estáticas en el punto de operación del ventilador centrífugo.....</i>	265
<b>Figura 155</b>	<i>Trazado del niveles de ruido en el punto de operación del ventilador centrífugo.....</i>	266
<b>Figura 156</b>	<i>Ejemplo de la fabricación de la malla de protección y el silenciador integrado.....</i>	267
<b>Figura 157</b>	<i>Trazado de esfuerzos mecánicos en el punto de operación del rotor centrífugo.....</i>	268

<b>Figura 158</b> <i>Dimensiones de la carcasa del motor IEC 90S.....</i>	269
<b>Figura 159</b> <i>Ubicación de la bancada del motor .....</i>	272
<b>Figura 160</b> <i>Ejemplo de la fabricación del silenciador integrado a la carcasa .....</i>	272
<b>Figura 161</b> <i>Dimensionamiento de la bancada del motor.....</i>	274
<b>Figura 162</b> <i>Desarrollos de la bancada del motor.....</i>	274
<b>Figura 163</b> <i>Ubicación de la bocamaza del rotor centrífugo.....</i>	277
<b>Figura 164</b> <i>Dimensionamiento de la bocamaza del rotor centrífugo.....</i>	281
<b>Figura 165</b> <i>Modelo tridimensional del ventilador centrífugo.....</i>	282
<b>Figura 166</b> <i>Esquema de la máquina de extracción de humos .....</i>	283
<b>Figura 167</b> <i>Modelo tridimensional de la máquina de extracción de humos.....</i>	284
<b>Figura 168</b> <i>Geometría de la simulación de la máquina de extracción de humos .....</i>	287
<b>Figura 169</b> <i>Volúmenes de control de la simulación de la máquina de extracción de humos.....</i>	288
<b>Figura 170</b> <i>Malla de la simulación de la máquina de extracción de humos .....</i>	289
<b>Figura 171</b> <i>Trazado de velocidades en la máquina de extracción de humos.....</i>	293
<b>Figura 172</b> <i>Trazado de presiones estáticas en la máquina de extracción de humos ....</i>	294
<b>Figura 173</b> <i>Trazado de partículas con la máquina de extracción de humos apagada... </i>	295
<b>Figura 174</b> <i>Trazado de partículas con la máquina de extracción de humos encendida</i>	296

# INTRODUCCIÓN

La presente tesis presenta una investigación distribuida en cuatro capítulos, respaldado por una sólida base de antecedentes, referencias bibliográficas, normas, estándares, criterios de diseño y estudios realizados. El propósito de esta investigación es mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura mediante el diseño de una máquina de extracción de humos, utilizando simulaciones computacionales para replicar las condiciones operativas.

El primer capítulo aborda las generalidades de la investigación, proporcionando una visión integral de los antecedentes investigativos tanto a nivel internacional como nacional. Se identifican y detallan el problema de estudio y su formulación, diferenciando entre el problema general y los problemas específicos. Se justifica la relevancia del estudio y se subraya su importancia, estableciendo claramente los objetivos generales y específicos. Además, se formula la hipótesis principal y sus hipótesis específicas, se definen las variables del estudio y se detalla su operacionalización. Finalmente, se describe la metodología de investigación, que incluye la unidad de análisis, el tipo, enfoque y nivel de investigación, el diseño de la investigación, las fuentes de información, así como las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

El segundo capítulo se dedica al marco teórico y conceptual. Se examinan las bases teóricas fundamentales para el desarrollo de la investigación, abarcando normativas y estándares relevantes, procesos de soldadura, calidad del aire, sistemas de extracción localizada y dinámica de fluidos computacional (CFD). Asimismo, se define el marco conceptual a través de la aclaración de términos y conceptos clave.

El tercer capítulo está enfocado en el diseño de la máquina de extracción de humos. Se calculan, dibujan y especifican a los componentes esenciales de la máquina, que incluyen a la campana de extracción, el brazo articulado, el colector y el ventilador.

El cuarto capítulo se centra en los resultados obtenidos, la contrastación de la hipótesis y la discusión de los resultados. Se analizan los resultados de las simulaciones computacionales para evaluar la reducción en la concentración de contaminantes, validando la hipótesis principal y demostrando la mejora en la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del estudio, junto con recomendaciones pertinentes. Las referencias bibliográficas utilizadas en la elaboración de la tesis se listan al final del documento, seguido por los anexos, los cuales proporcionan información adicional.

# CAPÍTULO I

## Generalidades

### 1.1. Antecedentes de la Investigación

A continuación, se presentan los antecedentes tanto internacionales como nacionales que sirven como de punto de partida de la presente investigación.

#### 1.1.1. Antecedentes Investigativos Internacionales

**Calvopiña Terán & Tituaña Cárdenas (Ecuador, 2021)**, en su tesis *“Diseño e implementación de un sistema articulado de extracción localizada de humos de soldadura en la celda robotizada con brazo KUKA KR5–ARC del Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE–L”* de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, desarrollaron un sistema para la captura de contaminantes generados durante el proceso de soldadura GMAW. El diseño incluyó la implementación de un brazo articulado de 200 mm de diámetro y un caudal de 1200 m<sup>3</sup>/h, lo que resultó en una velocidad en el ducto de 10,6 m/s, insuficiente para arrastrar a todos los contaminantes. Por lo tanto, se evidenció la necesidad de un rediseño basado en cálculos precisos, optimizando el diámetro del ducto o incrementando el caudal para garantizar un transporte eficiente.

El cálculo de las pérdidas en el brazo articulado fue realizado manualmente, bajo la suposición errónea de que la mayor pérdida ocurriría a 90° de flexión, desestimando configuraciones más críticas, como ángulos cercanos a 180°. Además, el ventilador seleccionado operaba con una eficiencia del 25 %, consumiendo 0,124 HP, pero estaba acoplado a un motor de 0,5 HP, lo que refleja un error considerable en la selección de componentes. El brazo articulado, al poseer un único grado de libertad, presentó limitaciones ergonómicas y de versatilidad, mientras que en el análisis estructural no se consideraron las cargas fluidodinámicas, un factor crucial en sistemas de este tipo. Esta investigación subraya la importancia de emplear herramientas modernas, como simulaciones CFD, para optimizar el diseño y garantizar un desempeño eficiente de los sistemas de extracción localizada en entornos industriales.

**Panchi Teran & Tamami Caspi (Ecuador, 2024)**, en su tesis *“Diseño y simulación de un sistema de extracción de gases provenientes de las estaciones de trabajo del taller de soldadura de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH”* de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, desarrollaron un diseño para optimizar la extracción de gases contaminantes en un entorno académico de soldadura. Aunque el proyecto utilizó SolidWorks y su extensión de simulación para validar las propuestas, los autores sugieren profundizar más en el uso de simulaciones CFD para optimizar la distribución y eficiencia del sistema. Asimismo, se identificó un problema significativo en el ducto troncal diseñado, ya que no se consideró un crecimiento progresivo de su sección al incorporar los diez ramales previstos, lo cual podría provocar ineficiencias en el flujo de aire y pérdidas de carga. Por otro lado, aunque no se contempló un sistema de filtración, los autores lo recomiendan para minimizar el impacto ambiental y garantizar un manejo más seguro de los contaminantes extraídos.

En cuanto al ventilador seleccionado, se observó que genera un nivel de ruido de 106 dBA, lo que supera ampliamente el límite normativo de 80 dBA. Se considera que se debió evaluar el uso de un silenciador o la selección de un ventilador más silencioso para cumplir con las normativas y mejorar las condiciones laborales en el taller. Esta investigación destaca la importancia de un diseño eficiente y sostenible, pero también evidencia áreas de mejora clave que permitirían incrementar su funcionalidad.

**Quintero Hernández & Fares Lozano (Ecuador, 2023)**, en su tesis *“Propuesta de diseño de un sistema de extracción de humos metálicos y gases para un taller de soldadura de una empresa camaronera en Guayaquil”* de la Universidad Politécnica Salesiana, propusieron un sistema de ventilación para la extracción de contaminantes generados en procesos de soldadura. Aunque el autor señala que el ducto diseñado no debe presentar fugas, esta afirmación resulta incorrecta, ya que, al tratarse de un ducto de succión con presión negativa, no existen fugas hacia el exterior. En caso de existir una perforación, el aire externo se introduciría al sistema, pero no habría escape de contaminantes hacia el ambiente.

Adicionalmente, el diseño del sistema presenta un problema en los ductos al no considerar un crecimiento progresivo de su sección transversal para incorporar cada uno de los seis ramales previstos, lo cual podría ocasionar ineficiencias en el flujo de aire y pérdidas de carga significativas. También se detectaron deficiencias en los codos diseñados, los cuales tienen un radio de curvatura muy reducido que incrementa la resistencia al flujo, y no se realizó una selección adecuada de filtros, un elemento crucial para tratar los contaminantes antes de liberarlos. Estas deficiencias reflejan la necesidad de ajustes técnicos en el diseño para garantizar la eficiencia del sistema y cumplir con los estándares ambientales.

**Ridwan et al. (India, 2020)**, en su estudio *“Design, modelling and analysis of welding fume extractor”* del departamento de ingeniería mecánica del Bearys Institute of Technology Mangalore, abordan la importancia de implementar sistemas de ventilación localizada en la industria de la construcción para minimizar la exposición a sustancias tóxicas generadas durante un proceso de soldadura, como el cromo hexavalente y el manganeso. Mediante el uso de sistemas de extracción de humos adecuados, se puede reducir hasta un 45% de las emisiones en comparación con la ventilación natural. Los autores destacan la importancia de una instalación adecuada de flujo de escape y flujo de campana, así como la utilización de técnicas de soldadura específicas y procedimientos de trabajo efectivos para controlar la exposición a los humos.

Este estudio proporciona evidencia de la eficiencia de los sistemas de ventilación localizada en la reducción de la exposición a los humos de soldadura y destaca la necesidad de continuar investigando y desarrollando métodos para controlar y reducir los humos durante un proceso de soldadura.

**Cardona Perez (Colombia, 2020)**, en su tesis *“Diseño de dos sistemas de extracción para humos y polvos en la empresa CRISTAR S.A.”* de la Universidad Tecnológica de Pereira, desarrolló un sistema de extracción industrial compuesto principalmente por ciclones, los cuales se destacan por ser una solución económica y eficiente para la separación de partículas sólidas de tamaño moderado. El diseño de estos ciclones está orientado a la captura de contaminantes generados durante los procesos industriales en la empresa, especialmente en el manejo y procesamiento de vidrio. Si bien el ciclón cumple con la función de extraer las partículas de polvo en suspensión y redirigirlas hacia un contenedor, el sistema no contempla el uso de un colector con filtros adicionales, lo que limita su capacidad de filtrar partículas más pequeñas.

Aunque el ciclón contribuye a reducir la concentración de contaminantes en la zona de trabajo, se ha identificado que no resuelve completamente el problema de dispersión de partículas más finas, que son liberadas al ambiente sin una filtración eficaz. Esta dispersión de contaminantes al exterior puede comprometer la calidad del aire y afectar negativamente tanto la salud de los trabajadores como el medio ambiente circundante. Por lo tanto, aunque el sistema de ciclones tiene un impacto positivo en el control de la contaminación a nivel local, la falta de un colector con filtros para la captura de partículas más pequeñas implica que el control total de los contaminantes no se alcanza, lo que representa un área de mejora en el diseño del sistema de extracción propuesto.

### **1.1.2. Antecedentes Investigativos Nacionales**

**Calcina Yucra & Cjuno Yucra (Perú, 2024)**, en su tesis *"Eficacia de un extractor móvil para la reducción de la concentración de humos metálicos en el área operativa de soldadura por arco eléctrico (SMAW), en una empresa metalmecánica, Arequipa 2024"*, de la Universidad Tecnológica del Perú, investigaron la efectividad de un extractor móvil para minimizar la exposición de los trabajadores a humos metálicos. Utilizando la metodología NIOSH 7303, se monitorearon elementos químicos como arsénico, cadmio, cromo, manganeso y níquel, empleando bombas gravimétricas en las evaluaciones inicial y final. Los resultados evidenciaron que, tras la implementación del extractor, las concentraciones de contaminantes se redujeron a niveles por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por el D.S. 015-2005-SA.

No obstante, el diseño del extractor móvil presenta limitaciones significativas. La conexión directa entre el brazo extensible y el ventilador incrementa el riesgo de daño al sistema debido a las proyecciones y el calor generados durante la soldadura, afectando su durabilidad y funcionalidad. Asimismo, la ubicación del filtro en la descarga del ventilador ocasiona una caída de presión considerable, lo cual disminuye la eficiencia del sistema.

Estas observaciones destacan la necesidad de optimizar el diseño de los sistemas de extracción para garantizar su rendimiento, durabilidad y efectividad en el control de contaminantes en ambientes industriales.

**Sánchez Calcina (Perú, 2024)**, en su tesis *"Influencia de un sistema de extracción para la reducción de la concentración de humos metálicos en las actividades de soldadura en el área de mantenimiento de una empresa en Moquegua 2023"*, de la Universidad Tecnológica del Perú, investiga cómo la implementación de un extractor de humos puede disminuir significativamente la exposición de los trabajadores a agentes químicos peligrosos. Se analizaron las concentraciones de metales como el manganeso y el cromo con el uso de bombas gravimétricas, mostrando resultados que destacan la efectividad de un sistema de extracción en la mejora de las condiciones de salud laboral.

El estudio también resalta la importancia de adoptar medidas preventivas en el entorno industrial, enfatizando que la exposición a humos metálicos puede conducir a enfermedades ocupacionales a largo plazo. La investigación demuestra que la implementación de un sistema de extracción no solo reduce las concentraciones de contaminantes, sino que también promueve un ambiente de trabajo más seguro y saludable para los empleados, evidenciando la necesidad de establecer protocolos adecuados en las actividades de soldadura.

**Romero Barboza (Perú, 2023)**, en su tesis *"Implementación de un sistema de aspiración de humos metálicos en la mesa de un pantógrafo CNC de corte por plasma para reducir la concentración de estos humos en la empresa Pitwork S.A.C en Arequipa 2023"*, de la Universidad Tecnológica del Perú, desarrolla un sistema de extracción para reducir la exposición de los trabajadores a agentes químicos cancerígenos generados durante el corte por plasma. Su investigación evidencia una disminución significativa en la concentración de dichos agentes químicos tras la instalación de una campana extractora.

Aunque los resultados resaltan los beneficios para la salud ocupacional, se identifican limitaciones en el diseño del sistema. Entre estas deficiencias se encuentran la omisión de parámetros cruciales como las velocidades de aspiración, la selección apropiada de un extractor de aire y la falta de un sistema de filtración que impida la liberación de contaminantes al ambiente.

La investigación también destaca un problema ambiental, ya que el aire contaminado se descarga directamente al medio ambiente, incrementando la contaminación atmosférica local y afectando la salud de las comunidades cercanas. Esto resalta la necesidad de no solo implementar sistemas de extracción, sino también de integrar tecnologías de filtración para garantizar un tratamiento adecuado de los contaminantes y mitigar sus efectos en la población y el ecosistema local.

**Rojas Alejandro (Perú, 2023)**, en su tesis "*Detección de emanación de gases CO y CO<sub>2</sub> en procesos SMAW, GMAW y GTAW mediante una campana de soldeo*", de la Universidad Nacional Agraria La Molina, concluyó que el proceso de soldadura GTAW genera menores emisiones contaminantes en comparación con los procesos GMAW y SMAW. Esta afirmación, aunque respaldada por sus hallazgos, ya era un conocimiento ampliamente aceptado en la literatura técnica. Asimismo, el autor sugiere que el proceso GTAW podría contribuir al calentamiento global debido a la mayor temperatura alcanzada en el depósito de material, pero esta conclusión es discutible. Si bien el GTAW produce altas temperaturas localizadas, el aporte calorífico es puntual y significativamente menor que en otros procesos como el GMAW, que generan mayores niveles de calor en el entorno.

Por otro lado, el autor resalta la preferencia por el proceso GTAW basado en su baja emisión de contaminantes, aunque esta postura no toma en cuenta otros factores importantes. La elección de un proceso de soldadura depende de las necesidades

específicas de la aplicación, ya que cada proceso tiene sus propias ventajas y limitaciones. En el caso del GTAW, aunque presenta beneficios como precisión y limpieza, también enfrenta desventajas como una baja velocidad de deposición y la necesidad de operadores altamente capacitados. Además, problemas relacionados con la contaminación pueden resolverse mediante sistemas adecuados de extracción de humos, lo que reduce la importancia de este factor como criterio único de selección.

**Qqunta Condori (Perú, 2022)**, en su tesis *“Evaluación del sistema de colector de polvos en la etapa de chancado para minerales cupríferos”*, de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, propone un diseño de equipamiento para optimizar la captación de polvos generados durante el chancado de minerales. Este diseño busca mejorar la eficiencia en la recolección de partículas, con el objetivo de aglomerarlas y reutilizarlas, asegurando además que las concentraciones de polvo respirable e inhalable se mantengan dentro de los límites permisibles. Los resultados mostraron una eficiencia de recuperación de polvo mejorada del 82% al 95%, destacando su contribución al control ambiental y la seguridad ocupacional.

Sin embargo, el estudio presenta una descripción técnica limitada del sistema propuesto, lo que dificulta su replicación en otras operaciones. Asimismo, no se detallan alternativas de mejora del sistema y estrategias para su implementación en distintos contextos. A pesar de estas observaciones, los hallazgos representan un aporte significativo al manejo de emisiones en la minería.

## 1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

La industria metalmecánica comprende espacios donde se llevan a cabo diversas actividades relacionadas con la fabricación, reparación y transformación de metales (Posada, 2019). Estas actividades generan una emisión de diversas sustancias al aire, principalmente humos, debido a los procesos de soldadura y corte de metales. Los trabajadores están expuestos diariamente a partículas de humos de soldadura perjudiciales, la mayoría de las cuales son respirables, lo que implica que estas partículas pueden ingresar a sus pulmones (Donaldson Company, 2024d). Estos humos contienen una variedad de contaminantes que deben ser ventilados adecuadamente (American Welding Society [AWS], 2021). La exposición a estos contaminantes no solo afecta al medio ambiente, sino que también ocasiona graves problemas a la salud humana, dando lugar a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

### Figura 1

*Zona de trabajo en soldadura*



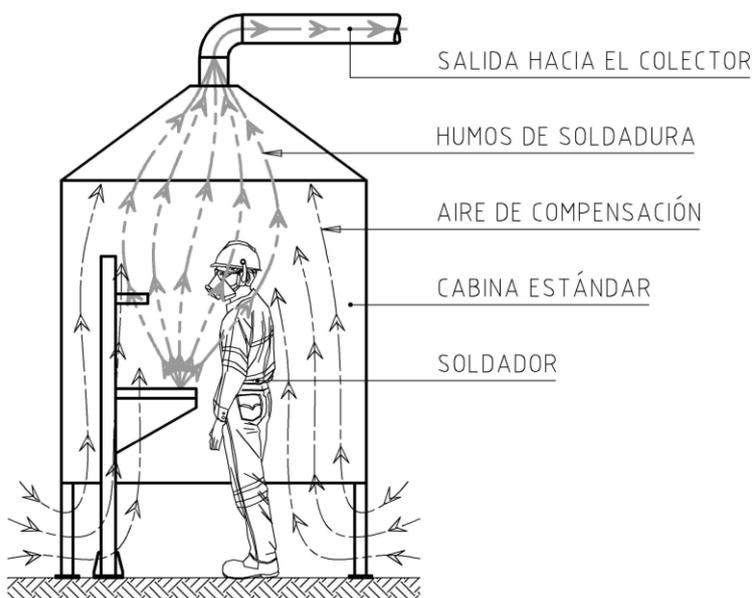
*Nota.* Cabinas para soldadura modelo CA-85, marca Proedissa. *Fuente.* Proedissa, 2024 (<https://proedissa.com/accesorios-para-soldadura/cabina-para-soldadura-ca-85/>).

En muchos países, existen regulaciones y estándares de calidad ambiental que deben ser cumplidos en la industria para limitar las emisiones de contaminantes. El Perú

no es ajeno a esta realidad; en el año 2005, se aprobó el D.S. N° 015-2005-SA el cual establece los valores límite permisibles de agentes químicos presentes en los puestos de trabajo que no representan riesgos y/o daños a la salud y seguridad de los trabajadores. Las faltas de cumplimiento de estos límites se consideran como infracciones administrativas para la empresa involucrada (Ley N°28806, Art. 34, 2011).

## Figura 2

*Cabina estándar en soldadura*



*Nota.* Líneas de corriente en una cabina estándar. *Fuente.* Elaboración propia.

Actualmente las empresas se enfrentan a una constante presión para minimizar la exposición de los trabajadores a sustancias potencialmente perjudiciales en el entorno laboral, como los humos de soldadura (Lincoln Electric, 2024). Esta necesidad surge en un contexto de creciente preocupación por el control de los contaminantes en el aire, por ello resulta imperativo disponer de colectores de humos, sistemas de extracción de humos y filtros de humo de soldadura confiables y de alto rendimiento. Estos equipos se encargarán de recoger los humos antes de que alcancen la zona de respiración del soldador (Donaldson Company, 2024d).

Muchas empresas optan por adquirir colectores de humos de alta capacidad que suelen operar junto con un grupo de cabinas estándar para soldadura ubicadas en una zona de trabajo como se muestra en la Figura 1, lo cual es limitante, ya que no todas las actividades de soldadura, especialmente el trabajo con piezas de gran tamaño, pueden realizarse dentro de estas cabinas. Además, al ser fijas, se restringen futuras expansiones o cambios de disposición en el taller.

En la Figura 2 se evidencia cómo el flujo de humos en este tipo de cabinas para soldadura impacta directamente en el rostro del soldador, lo cual ocurre porque éstas poseen una campana superior que dirige los contaminantes desde la mesa del soldador hacia arriba, cruzando su zona de respiración y perjudicando su salud, incluso teniendo el respirador puesto como su última medida de protección.

### **Figura 3**

*Extractor de humos de soldadura*



*Nota.* Extractor de humos de soldadura modelo Porta-Trunk, marca Donaldson. *Fuente.* Donaldson Company, 2024 (<https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/equipment/fume-collectors/easy-trunk-porta-trunk/>).

Después de revisar diversas investigaciones, se evidenció deficiencias en el desarrollo de estas máquinas, así como también ideas que podrían implementarse para mejorar su desempeño.

Existen máquinas de extracción de humos en el mercado extranjero que pueden capturar con eficacia las emisiones generadas durante un proceso de soldadura (Figura 3), pero su costo elevado, sumado a los gastos de importación, lo hacen una opción poco viable para nuestra creciente industria metalmecánica, como se evidencia en las Figuras 4 y 5, donde se compara el costo de una máquina importada y el de una fabricada en el país; la máquina importada cuesta casi el cuádruple. Sin embargo, las máquinas nacionales, en su mayoría empíricas, pueden ser mejoradas tanto en su diseño y desempeño, manteniendo el costo o incluso disminuyéndolo.

#### Figura 4

##### *Presupuesto de un extractor de humos importado*

Description	Unit Price	Qty	Extended Price (USD)
<b>PORTA-TRUNK</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• To Engineering</li> <li>• FINISH COAT: STANDARD FINISH</li> <li>• ELEMENTS: STANDARD ULTRA-WEB FR</li> <li>• CONTROL BOX: 3 - PHASE 60 HZ (208-230/460/60/3)</li> <li>• POWER PACK: 1.5HP, TEFC</li> <li>• POWER PACK: Comments - Motor derrateado para trabajo en altura 4500 msnm</li> <li>• TRUNK ARM: 6" X 6.5' EXTRACTION ARM WITH HOOD AND LIGHT</li> </ul>	\$9,049.08	1	\$9,049.08
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$9,049.08</b>
<b>Flete marítimo de Monterrey – Mexico a Lima Peru</b>			<b>\$2,100.00</b>
<b>TOTAL USD</b>			<b>\$11,149.08</b>

*Nota.* Presupuesto de un extractor de humos de soldadura modelo Porta-Trunk, marca Donaldson. *Fuente.* Presupuesto de Donaldson Company, 20 de febrero del 2023.

## Figura 5

### Presupuesto de un extractor de humos nacional

Referencia: Aspirador de Humos Soldadura

**COTIZACIÓN N° 2023-0213**

Por suministro de Un (01) Aspirador de Polvo y Humos de soldadura según esquema adjunto con pre cámara lateral y deposito recolector de polvo, con filtro tipo cartucho, extractor centrifugo y brazo extensible Ø 150 mm con las siguientes características.

<b>Modelo:</b>	<b>EAP-TC-36/Ø150/C-280-1, MPR</b>
Tipo:	Portátil
Marca:	Ktperú
Caudal:	0,35 m³/s
Motor Trifásico:	2 HP – 3450 RPM
Filtro Cartucho:	C 045x1 (36 m2)
Tamaño:	700x600x2270 mm
<b>Precio Unitario</b>	<b>USD 3,400.00 + IGV</b>
<b>Descuento:</b>	<b>USD 200.00</b>
<b>Precio Venta:</b>	<b>USD 3,200.00 + IGV</b>

*Nota.* Presupuesto de un extractor de humos de soldadura modelo EAP-TC-36, marca Klimatechnik. *Fuente.* Presupuesto de Klimatechnik SAC, 20 de febrero del 2023.

La búsqueda constante de soluciones eficientes y económicas para mitigar la exposición a humos de soldadura en la industria metalmeccánica plantea un desafío significativo. A pesar de la disponibilidad de colectores industriales, su practicidad y capacidad se ven limitadas en entornos dinámicos, como talleres de soldadura con actividades variadas. Además, la importación de equipos especializados representa un costo elevado para las empresas locales, acentuando la necesidad de desarrollar soluciones de recolección de humos más accesibles y adaptadas a las condiciones particulares de la realidad nacional.

### **1.3. Formulación del Problema**

La industria metalmeccánica en el Perú enfrenta desafíos en la gestión de humos de soldadura, debido a la diversidad de procesos en los talleres y las limitaciones económicas para adquirir nuevos equipos. La carencia de sistemas de limpieza efectivos durante la soldadura afecta la calidad del aire y el rendimiento de los trabajadores, resaltando la necesidad de maquinaria especializada y adaptable diseñada para mejorar la calidad del aire y ajustarse a diversos procesos de soldadura.

#### **1.3.1. Problema General**

La falta de calidad del aire durante un proceso de soldadura requiere de una máquina de extracción de humos.

#### **1.3.2. Problemas Específicos**

- ¿Cómo diseñar una máquina de extracción de humos que mejore la calidad del aire?
- ¿Cómo mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura?

### **1.4. Justificación e Importancia**

#### **1.4.1. Justificación.**

La presente investigación se justifica por la necesidad de desarrollar una solución económica y eficaz para reducir los humos emitidos por los procesos de soldadura en la industria metalmeccánica. Así mismo la necesidad de desarrollar tecnología nacional que sea amigable con el medio ambiente y que pueda competir con equipos importados, en costo y versatilidad para operar en las condiciones de nuestra realidad, lo cual resulta viable para muchas empresas.

Por ello, se requiere el diseño de una máquina de extracción accesible y versátil que se ajuste a los diversos procesos de soldadura. La propuesta no solo mejorará el cuidado de la salud laboral, sino que también optimizará los procesos de soldadura, ofreciendo una alternativa competitiva y promoviendo el desarrollo tecnológico en el sector metalmecánico.

#### **1.4.2. Importancia**

La importancia de esta investigación radica en los beneficios y contribuciones que aportará a diversos niveles:

**Bienestar de los Trabajadores.** Contribuirá a crear un entorno laboral más seguro y saludable, protegiendo la salud de los trabajadores expuestos a humos de soldadura.

**Eficiencia Operativa.** Mejorará la eficiencia de un proceso de soldadura al reducir la interferencia causada por la presencia de humos, lo que se traduce en una mayor calidad y productividad.

**Contribución al Desarrollo Tecnológico.** Aportará conocimientos valiosos al campo de la ingeniería mecánica y la ventilación industrial, fomentando la investigación científica y el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

## **1.5. Objetivos**

A continuación, se describen de manera detallada los objetivos de la investigación, tanto general como específicos.

### **1.5.1. Objetivo General**

Diseñar una máquina de extracción de humos para mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar una máquina de extracción de humos.
- Mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

## **1.6. Hipótesis**

Se describen de manera detallada las hipótesis de la investigación, tanto general como específicas. Las hipótesis se encuentran vinculadas con las variables de estudio.

### **1.6.1. Hipótesis General**

El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

### **1.6.2. Hipótesis Específicas**

- El diseño de una máquina de extracción de humos disminuirá la contaminación del aire para el soldador durante un proceso de soldadura.
- El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire ambiental.

## 1.7. Variables y Operacionalización de Variables

En esta sección se presentan las variables del estudio y sus indicadores. Estos últimos representan medidas cuantificables que permitirán evaluar con precisión la hipótesis, garantizando así la coherencia y validez de los resultados de la investigación.

### 1.7.1. Variables

- **Variable Independiente:** Máquina de extracción de humos.
- **Variable Dependiente:** Calidad del aire durante un proceso de soldadura.

### 1.7.2. Operacionalización de Variables

A continuación, se presenta en la Tabla 1 la operacionalización de variables referidas a las hipótesis con sus respectivos indicadores e índices.

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Hipótesis	Variables	Indicadores	Índices
<b>Hipótesis General:</b>		Velocidad de captura	m/s
El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire durante un proceso de soldadura.	<b>Variable Independiente:</b> Máquina de extracción de humos	Caudal	m <sup>3</sup> /s
		Presión estática	mmca
		Rango de movimiento	m
		Superficie filtrante	m <sup>2</sup>
		Consumo	HP
		Nivel de ruido	dBA
<b>Hipótesis Específicas:</b>			
• El diseño de una máquina de extracción de humos disminuirá la contaminación del aire para el soldador durante un proceso de soldadura.	<b>Variable Dependiente:</b>	Concentración de partículas en la zona de respiración del soldador	mg/m <sup>3</sup>
		Concentración de partículas en el ambiente	mg/m <sup>3</sup>
• El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire ambiental.	Calidad del aire durante un proceso de soldadura		

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

## **1.8. Metodología de la Investigación**

### **1.8.1. Unidad de Análisis**

La unidad de análisis en esta investigación es el diseño de una máquina de extracción de humos, que comprende sus características constructivas, funcionales y de rendimiento. Este diseño será evaluado mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) que permita analizar su capacidad en la captura, transporte, impulsión y filtración de contaminantes durante la simulación de un proceso de soldadura.

### **1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación**

**Tipo.** Investigación aplicada, busca resolver un problema específico mediante la aplicación de conocimientos tecnológicos para mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura y producir un producto tecnológico concreto, la máquina de extracción de humos.

**Enfoque.** Presenta características epistemológicas que se alinean principalmente con la investigación cuantitativa, aunque también incluye algunos elementos de la investigación cualitativa. A continuación, se analizan estas características.

**Percepción de la Realidad.** Se percibe como objetiva excluyente, consistente con una investigación cuantitativa, lo que implica una visión externa y desapegada de los datos, apropiado para la naturaleza técnica del problema a resolver.

**Razonamiento.** La investigación sigue un enfoque deductivo, característico de los estudios cuantitativos, en el que se parte de una hipótesis que se valida mediante datos. En este caso, se plantea que el diseño de la máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire. La validación de esta hipótesis se lleva a cabo mediante simulaciones en

CFD, que permiten evaluar la eficacia del diseño en la captura y reducción de contaminantes. Si las simulaciones muestran una mejora significativa en la calidad del aire, cumpliendo con la normativa vigente, la hipótesis se valida; de lo contrario, se refuta.

**Finalidad.** Es de comprobación, alineándose con la investigación cuantitativa, que busca confirmar o refutar hipótesis a través de la recopilación y el análisis de datos.

**Orientación.** Está centrada en mejorar el proceso de soldadura al reducir la interferencia causada por la presencia de humos. Esta orientación hacia el proceso se asocia con la investigación cualitativa, ya que busca mejorar un proceso específico mediante intervenciones tecnológicas.

**Principio de Verdad.** Es particularizada y estable, coherente con la investigación cuantitativa, donde se busca establecer relaciones causales o patrones consistentes en un conjunto de datos.

**Perspectiva del Investigador.** Es desde afuera, analizando la realidad como agente externo de manera objetiva. Esta perspectiva es común en la investigación cuantitativa, donde se busca mantener distancia del objeto de estudio para garantizar la objetividad en el análisis.

**Causalidad.** Se evalúa la interacción de factores entre un proceso de soldadura y la extracción de humos, una consideración típica de la investigación cualitativa, donde se busca comprender las relaciones entre variables y fenómenos.

**Nivel de Investigación.** Puede ser considerado tanto correlacional como explicativo. Explora la relación entre la presencia de la máquina de extracción de humos y la mejora en la calidad del aire (correlacional), así como también investiga las causas

subyacentes de esta relación mediante la manipulación de variables y diseños experimentales (explicativo).

### ***1.8.3. Diseño de la Investigación***

Experimental, implica la manipulación de variables y la medición de resultados, respaldado por la simulación en CFD para analizar el flujo de aire y la dispersión de humos.

### ***1.8.4. Fuentes de Información***

La investigación se basará en documentos académicos, normativas y estándares de ventilación industrial, publicaciones especializadas, tesis previas, criterios de diseño y manuales de fabricantes. Estas fuentes proporcionarán datos relevantes y actualizados sobre el diseño y funcionamiento de sistemas de extracción.

### ***1.8.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos***

Se utilizará simulaciones computacionales para modelar el flujo de aire y la dispersión de humos, junto con sensores virtuales para medir la concentración de partículas en el ambiente y en la zona de respiración del soldador

### ***1.8.6. Análisis y Procesamiento de Datos***

El análisis comprenderá la evaluación de la concentración de partículas en  $\text{mg}/\text{m}^3$  durante un proceso de soldadura, obtenida mediante simulaciones computacionales. Los resultados se compararán con los valores establecidos en las normas y estándares ambientales vigentes, con el objetivo de determinar la efectividad de la máquina en mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

## **CAPÍTULO II**

### **Marco Teórico y Marco Conceptual**

#### **2.1. Bases Teóricas**

Se integran los fundamentos teóricos y el marco conceptual, que incluyen normativas, estándares y conceptos técnicos relacionados con la calidad del aire, procesos de soldadura, sistemas de extracción de humos y simulación en CFD. Esto proporciona una base sólida de conocimientos para comprender y diseñar de manera racional esta máquina.

##### **2.1.1. Normas y Estándares**

**ISO 21904:2020.** Seguridad e higiene en el soldeo y procesos afines. Equipos para la captura y filtración de humos de soldeo. Establece requisitos generales para equipos de captación y filtración de humos de soldadura en espacios de trabajo, con el fin de proteger la salud de los trabajadores expuestos a estos contaminantes.

**AWS F3.2:2018.** Guía de ventilación para humos de soldadura. Presenta varios tipos de sistemas de ventilación para el control de humos de soldadura. Contiene información sobre contaminantes del aire que se encuentran en los humos de soldadura,

principios de diseño y selección de sistemas, y dibujos que ilustran las técnicas de ventilación.

**ISO 16890:2017.** Filtros de aire para la ventilación general. Establece estándares para la evaluación de filtros de aire utilizados en sistemas de ventilación y climatización. Su objetivo principal es proporcionar un método uniforme para la clasificación de la eficiencia de los filtros en base a la capacidad de retener partículas de diferentes tamaños.

**ANSI Z49.1:2021.** Seguridad de los procesos de soldadura, corte y afines. Proporciona una cobertura integral de seguridad y salud en entornos de soldadura, priorizando los procesos de soldadura con oxígeno y por arco, y haciendo referencias relevantes a la soldadura por resistencia. Ofrece orientación detallada sobre la protección del personal y del entorno, abordando temas como ventilación, prevención de incendios y seguridad en espacios confinados.

**D.S. N°015-2005-SA.** Reglamento sobre valores límite permisibles para agentes químicos en el ambiente de trabajo. Busca proteger la salud de los trabajadores y su descendencia. Se enfoca en la evaluación cuantitativa y control de riesgos, especialmente por inhalación, derivados de la exposición a agentes químicos en el trabajo. Aplica a nivel nacional en todos los ambientes laborales que empleen sustancias químicas o cancerígenas con potencial riesgo para la salud y seguridad de los trabajadores. La implementación de estos valores está a cargo de profesionales con conocimientos en salud e higiene ocupacional.

**D.S. N°023-2017-EM.** Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería. Busca prevenir incidentes, incidentes peligrosos, accidentes de trabajo y enfermedades ocupacionales en la actividad minera. Su objetivo principal es fomentar una cultura de prevención de riesgos laborales, involucrando a trabajadores, empleadores y el Estado en

la promoción, difusión y cumplimiento de medidas preventivas en el sector minero. En el anexo 15 de este decreto se establecen los límites de exposición ocupacional para agentes químicos.

**R.M. N°232-2020-VIVIENDA.** Norma Técnica EM.030: Instalaciones de ventilación del reglamento nacional de edificaciones. Define los requisitos técnicos mínimos para garantizar la calidad, seguridad y cantidad de aire adecuados en los proyectos de construcción, asegurando una apropiada renovación del aire en el interior de las edificaciones. Para edificaciones industriales no peligrosas, como las de manufactura, se requiere la implementación de sistemas individuales de extracción y recolección de polvo en equipos, máquinas y herramientas que generen contaminantes.

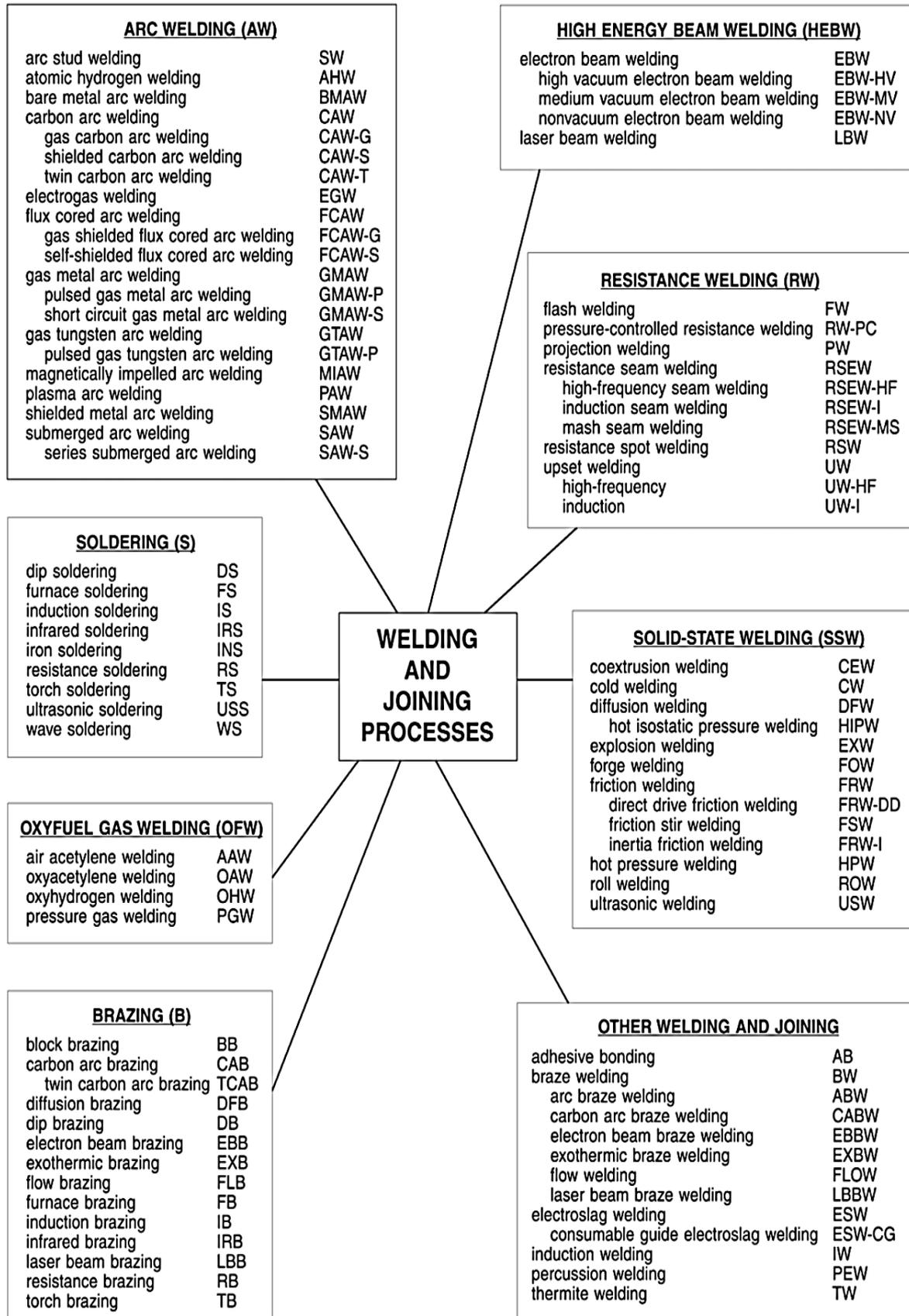
### ***2.1.2. Procesos de Soldadura***

Son métodos empleados para unir dos o más piezas de metal mediante la aplicación de calor y/o presión, con el fin de lograr una unión permanente y resistente. Estos procedimientos posibilitan la fusión de los materiales base o la creación de una unión sólida entre ellos, generando así una continuidad estructural (Hernández Riesco et al., 2016).

Existen diversos tipos de procesos de soldadura, los cuales varían según la fuente de calor utilizada, el tipo de electrodo o material de aporte, así como la protección del arco o la presión aplicada. Según la AWS, las soldaduras se clasifican de acuerdo con lo representado en las Figuras 6 y 7.

**Figura 6**

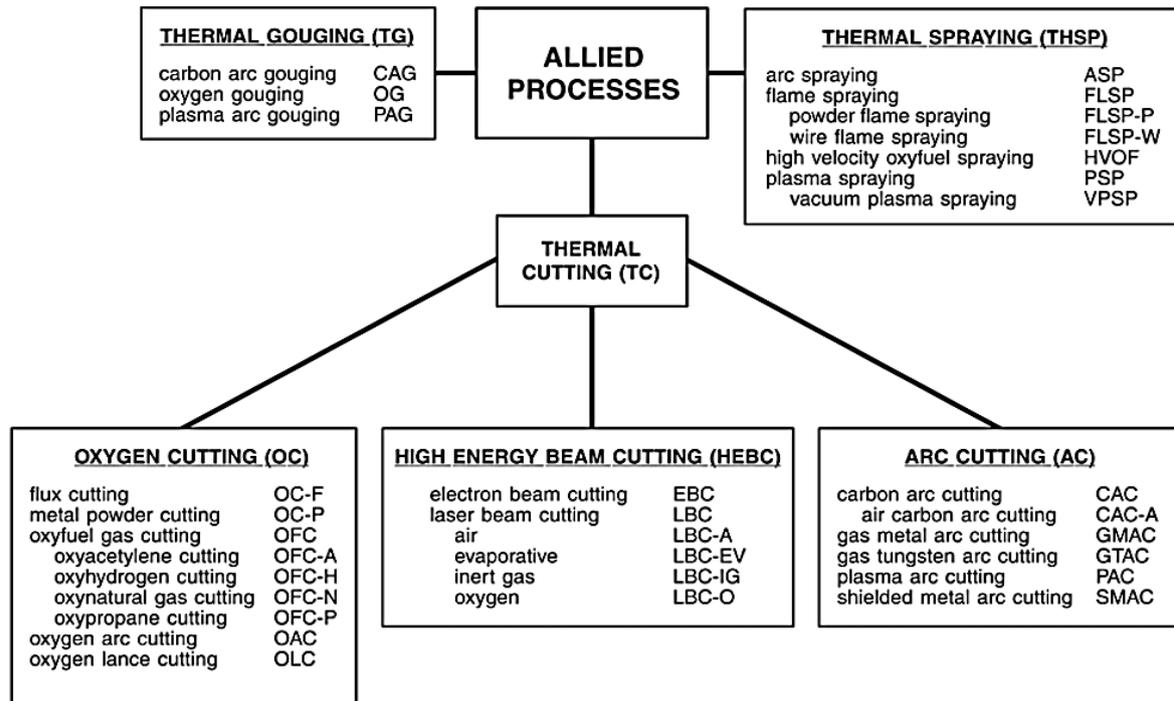
*Procesos de soldadura y de unión*



Nota. Fuente. AWS A3.0M/A3.0:2020: Standard welding terms and definitions, AWS, 2020.

**Figura 7**

*Procesos afines de soldadura*



*Nota. Fuente. AWS A3.0M/A3.0:2020: Standard welding terms and definitions, AWS, 2020.*

Como se muestra en las Figuras 6 y 7, existen más de 100 formas diferentes de soldar. Cada proceso posee características, ventajas y aplicaciones específicas, y la selección adecuada depende de factores como el tipo de material, el espesor de las piezas y las condiciones de la aplicación.

Cada técnica de soldadura está diseñada para abordar diferentes necesidades y desafíos. Por ejemplo, algunos procesos son más adecuados para materiales metálicos delgados, mientras que otros son ideales para piezas de mayor espesor. La elección del proceso también puede verse influenciada por consideraciones como la necesidad de alta resistencia de la soldadura, la velocidad de producción, o la facilidad de automatización. A continuación, se presentan los procesos de soldadura más usuales en la industria metalmeccánica que han sido caracterizados y comparados en la Tabla 2.

**Tabla 2***Procesos de soldadura usuales*

Proceso	Característica	Ventajas	Limitaciones
OAW	Utiliza una llama de oxiacetileno para fundir los materiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja inversión inicial</li> <li>• Puede utilizarse en diferentes tipos de metales</li> <li>• El equipo se puede usar para oxicorte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de soldadura limitada</li> <li>• Requiere habilidad y destreza para controlar la llama</li> <li>• Puede generar deformación y distorsión en las piezas soldadas</li> </ul>
SMAW	Utiliza un electrodo revestido que se consume durante la soldadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplia disponibilidad de electrodos y equipos</li> <li>• Puede utilizarse en diferentes posiciones de soldadura</li> <li>• Adecuado para soldar en exteriores y en condiciones adversas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja productividad debido a la necesidad de cambiar los electrodos</li> <li>• Genera escoria que requiere limpieza después de la soldadura</li> <li>• Requiere habilidad y experiencia para realizar soldaduras de alta calidad.</li> </ul>
GMAW	Utiliza un electrodo de alambre continuo y un gas de protección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidad de soldadura</li> <li>• Puede soldar en diferentes posiciones</li> <li>• Baja generación de escoria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor inversión inicial en equipos</li> <li>• Sensible a la presencia de viento y corrientes de aire</li> <li>• Requiere una protección de gas para evitar la contaminación del cordón</li> </ul>
FCAW	Utiliza un alambre tubular que contiene un fundente interno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidad de soldadura y deposición</li> <li>• Puede utilizarse en diferentes posiciones</li> <li>• Mayor penetración que el GMAW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera más humos y gases de soldadura que otros procesos</li> <li>• Puede requerir una protección de gas para evitar la contaminación del cordón</li> <li>• Requiere mayor limpieza de la escoria después de la soldadura</li> </ul>
GTAW	Utiliza un electrodo de tungsteno y gas de protección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta calidad de soldadura y control del arco</li> <li>• Puede soldar metales de espesores delgados</li> <li>• No genera escoria ni salpicaduras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja velocidad de deposición</li> <li>• Mayor habilidad y destreza requerida</li> <li>• Mayor sensibilidad a la contaminación y defectos de soldadura</li> </ul>
SAW	Utiliza un arco eléctrico sumergido en un lecho de fundente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidad de soldadura</li> <li>• Alta penetración y calidad de soldadura</li> <li>• Baja generación de humos y gases de soldadura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitado a soldaduras en posición plana u horizontal</li> <li>• Requiere una instalación especial para el lecho de fundente</li> <li>• No es adecuado para materiales delgados</li> </ul>

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**OAW (Oxyacetylene Welding).** Soldadura oxiacetilénica. Es un proceso de soldeo por fusión en el que se utiliza una llama generada por la combinación de acetileno y oxígeno para fundir y unir materiales. Es un método ampliamente utilizado en aplicaciones de baja y mediana producción, así como en trabajos de reparación. Permite soldar una amplia variedad de metales y aleaciones, excepto los metales refractarios y los metales activos (Portolés García et al., 2016).

**SMAW (Shielded Metal Arc Welding).** Soldadura por arco con electrodo metálico revestido. Es un proceso en el que se utiliza un electrodo recubierto con un revestimiento especial. Durante la soldadura, se establece un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza de trabajo, generando calor para fundir el metal. El revestimiento del electrodo protege el arco y el baño de fusión, evitando la oxidación y la contaminación. Es un proceso versátil, adecuado para diferentes tipos de aceros y aleaciones, y no requiere equipos adicionales de suministro de gases (Aracil Cadenas & Romero Camacho, 2016).

**GMAW (Gas Tungsten Arc Welding).** Soldadura por arco con electrodo metálico protegida con gas. También conocida como soldadura MIG/MAG, es un proceso de soldadura en el que se utiliza un arco eléctrico para unir metales. Se alimenta un electrodo continuo consumible y se protege el arco y la zona de fusión con gas. Ofrece ventajas como alta velocidad de deposición y calidad de soldadura, y se utiliza en diversas industrias (Aracil Cadenas, 2016b).

**FCAW (Flux Cored Arc Welding).** Soldadura por arco con núcleo de fundente. Es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo continuo en forma de alambre tubular relleno de un polvo llamado fundente. El fundente actúa como agente de limpieza y protección contra la contaminación atmosférica, formando una atmósfera protectora alrededor del arco y el baño de fusión. Este proceso ofrece alta velocidad de deposición y

buena apariencia de la soldadura, siendo adecuado para aceros al carbono y de baja aleación (Aracil Cadenas, 2016a).

**GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).** Soldadura por arco con electrodo de tungsteno protegida con gas. También conocida como soldadura TIG, es un proceso de soldadura en el que se utiliza un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo. Se emplea un gas inerte para proteger la zona de fusión. Es adecuada para unir diversos metales, produce soldaduras de alta calidad y no genera escoria ni proyecciones. Sin embargo, tiene una tasa de deposición más baja, requiere habilidades especializadas y protección contra la radiación ultravioleta (Sanz Cubero & Romero Camacho, 2016).

**SAW (Submerged Arc Welding).** Soldadura por arco sumergido. Es un proceso en el que se utiliza un arco eléctrico y un fundente (flux) para fundir un electrodo continuo y crear una soldadura. La escoria generada por el fundente protege la soldadura. Es un proceso eficiente, automático o semiautomático, que permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de alta calidad. Se utiliza en diversas aplicaciones industriales y ofrece ventajas como altas tasas de deposición y buena calidad de soldadura (Lázaro Martín, 2016).

### **2.1.3. Calidad del Aire**

Es la medida de la pureza y seguridad del aire en términos de la presencia de contaminantes y sustancias que puedan representar riesgos para la salud y el medio ambiente. La Ley 28611 establece el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que define los niveles aceptables de elementos y sustancias en el aire, agua y suelo para preservar la salud humana y el entorno. Es esencial que las concentraciones de contaminantes atmosféricos no excedan el Estándar de Calidad Ambiental para el Aire,

regulado por el Ministerio del Ambiente según el D.S. N°003-2017-MINAM y el D.S. N.º 023-2017-EM.

**Contaminantes del Aire.** Son sustancias o partículas que, al incorporarse al aire interior durante el uso de un espacio, deterioran su calidad, pudiendo causar molestias o enfermedades a los ocupantes. Se comportan como si fueran aire, moviéndose predominantemente con las corrientes de aire y asegurando una dispersión uniforme, salvo en condiciones específicas como operaciones con gran liberación de calor o frío (ACGIH, 2023).

**Material Particulado.** Abreviado como PM (Particulate Matter), comprende a todas las partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, muchas de las cuales representan un riesgo para la salud. Esta mezcla incluye elementos como polvo, polen, hollín, humo y diminutas gotas, entre otros (OMS, 2022).

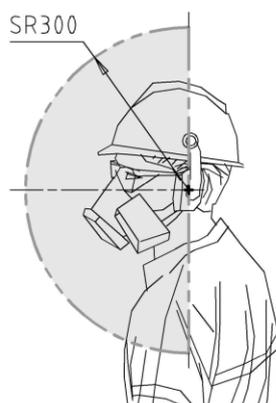
**Humos de Soldadura.** Son partículas sólidas muy pequeñas, generadas durante la soldadura por arco cuando el metal hierve desde el electrodo y las gotas fundidas en el arco se combinan con el oxígeno del aire, solidificándose. Estas partículas, con un tamaño entre 0,2 y 1 micrómetro, provienen principalmente del electrodo, compuestas por óxidos de los metales presentes en él, aleaciones y compuestos de fundente. La composición del humo varía según los metales soldados, incluyendo óxidos específicos como el óxido de hierro en la soldadura de acero o el óxido de zinc en metales chapados. (Lincoln Electric, 2024). Los humos se miden como una concentración de partículas suspendidas en el aire en un espacio dado (ppm) o en microgramos por cada metro cúbico de aire (mg/m<sup>3</sup>). La producción de humo está indicada en la ficha técnica de cada electrodo. Se puede emplear la Tabla 3 para distintos procesos de soldadura.

**Tabla 3***Producción de humos de soldadura*

Proceso de Soldadura		Porcentaje en peso
SMAW	<i>(Shielded Metal Arc Welding)</i> Soldadura por arco con electrodo metálico revestido	1.5 – 3 %
GMAW	<i>(Gas Metal Arc Welding)</i> Soldadura por arco con electrodo metálico protegida con gas	0.3 – 1%
FCAW	<i>(Flux Cored Arc Welding)</i> Soldadura por arco con núcleo de fundente	3 – 4%
GTAW	<i>(Gas Tungsten Arc welding)</i> Soldadura por arco con electrodo de tungsteno protegida con gas	<0.2%
SAW	<i>(Submerged Arc Welding)</i> Soldadura por arco sumergido	<0.3%

*Nota. Fuente.* Extracción de Humos de Soldadura - Una necesidad Actual, por Galeana, 2015.

**Zona de Respiración.** Es el espacio alrededor del rostro de una persona de donde obtiene el aire que respira. Se trata de una semiesfera con un radio de 0.3 metros que se extiende hacia adelante desde el rostro, como se muestra en la Figura 8, donde SR300 es el radio esférico de 300 mm. El centro de esta semiesfera se encuentra en el punto medio de un segmento imaginario que conecta ambos oídos, y su base está definida por el plano que contiene dicho segmento, la parte superior de la cabeza y la laringe (D.S. N°015-2005-SA, 2005).

**Figura 8***Zona de respiración de una persona*

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**Límites de Exposición Ocupacional.** Se definen con base en el tiempo de exposición a agentes químicos. Por lo general, se establecen en 8 horas para exposiciones prolongadas y 15 minutos para exposiciones breves, según lo dispuesto en el D.S. N°023-2017-EM. Estos límites se basan en tres indicadores estandarizados: TWA, STEL y C, los cuales se describen detalladamente en los anexos.

**TWA (Time Weighted Average).** Promedio ponderado en el tiempo. Evalúa el promedio ponderado en el tiempo de la exposición a concentraciones individuales durante la jornada laboral de 8 horas. Requiere correcciones cuando se aplica a diferentes jornadas de trabajo.

**STEL (Short Time Exposure Level).** Nivel de exposición de corto tiempo. Limita las exposiciones a corto plazo, generalmente durante 15 minutos continuos. Se compara con la exposición promedio ponderada en el tiempo acumulada durante este período. Puede ocurrir un máximo de 4 veces por jornada, con descansos de al menos 1 hora entre exposiciones.

**C (Ceiling).** Techo. Establece un límite máximo que no debe sobrepasarse en ningún momento durante la jornada laboral.

#### **2.1.4. Sistemas de Extracción Localizada**

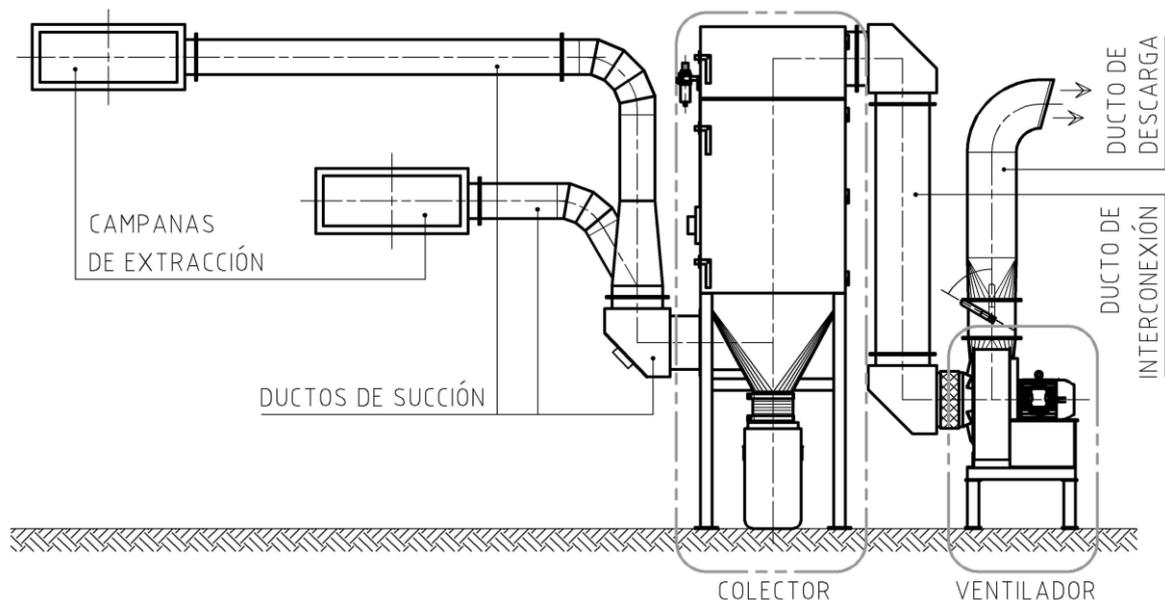
Se fundamentan en la captura del contaminante cerca de su origen, siendo la opción preferida por su alta eficacia y costos más bajos en comparación con los sistemas de extracción general. Dada la creciente importancia del control de la contaminación atmosférica, es crucial emplear equipos de depuración eficaces en los sistemas de ventilación industrial, siendo más económicos los sistemas de extracción localizada debido

a sus menores caudales de aire (ACGIH, 2023). Como se muestra en la Figura 9, estos sistemas constan de cuatro elementos básicos:

- Campana de extracción
- Ductos
- Colector
- Ventilador

**Figura 9**

*Sistema de extracción localizada*



*Nota.* Componentes de un sistema de extracción localizada. *Fuente.* Elaboración propia.

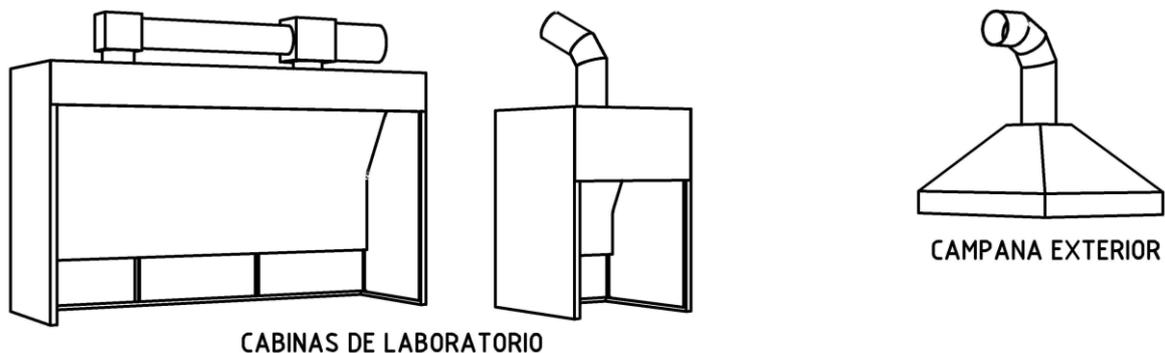
Las campanas capturan el contaminante dirigiéndolo hacia los ductos, los cuales transportan el aire contaminado al colector, donde se separa el contaminante del aire mediante filtros. El ventilador, superando las caídas de presión de todo el sistema, produce el caudal previsto. El aire tratado se descarga mediante un ducto para evitar su reintroducción en el entorno. En ciertos casos, el aire depurado puede reintroducirse en el ambiente (ACGIH, 2023).

**Campana de Extracción.** Es el punto de entrada al sistema de extracción, y recibe dicho nombre independientemente de cuál sea su configuración física. Su función principal radica en generar un flujo de aire que capture de manera efectiva el contaminante y lo transporte. Aunque existen diferentes configuraciones de campanas, se pueden clasificar en dos grupos principales, como se muestra en la Figura 10.

- Cabina de laboratorio
- Campana exterior

**Figura 10**

*Campanas de extracción*



*Nota.* Tipos de campanas de extracción *Fuente.* Elaboración propia.

La elección entre ellas depende de factores como las características físicas del equipo o instalación, el método de generación de contaminantes y la relación espacial entre el equipo y el trabajador (ACGIH, 2023).

**Velocidad de Captura.** Es la velocidad mínima del aire generada por la campana para capturar y dirigir el contaminante hacia ella. Esta velocidad depende del caudal de aire aspirado y la forma de la campana (ACGIH, 2023). En la Tabla 4 se indican estas velocidades, una selección adecuada depende de factores como corrientes de aire en el entorno, toxicidad de los contaminantes, producción de contaminantes y tamaño de la campana.

Se debe tener en cuenta tanto un límite inferior, relacionado con condiciones favorables para la captura y baja toxicidad, como un límite superior, que considera condiciones adversas y alta toxicidad. Para el caso de un proceso de soldadura, la ventilación no debe producir más de aproximadamente 0,5 m/s de velocidad del aire en la zona de trabajo. Es importante reconocer que este valor representa el máximo recomendado para fines de control de calidad en soldadura y corte (American Welding Society [AWS], 2021).

**Tabla 4**

*Velocidades de captura recomendadas*

Condiciones de dispersión del contaminante	Ejemplos	Velocidad de captura, m/s
Liberado prácticamente sin velocidad en aire tranquilo.	Evaporación desde depósitos, desengrase, etc.	0.25 – 0.5
Liberado a baja velocidad en aire moderadamente tranquilo.	Cabinas usadas en la aplicación de pintura, el llenado intermitente de recipientes, la transferencia entre cintas transportadoras a baja velocidad, soldaduras, recubrimientos superficiales y el proceso de pasivado.	0.5 - 1
Producción activa en un área donde el aire se mueve rápidamente.	Recintos de pintura de poca profundidad, actividades de llenado de barriles, operaciones de carga en cintas transportadoras y procesos de trituración.	1 – 2.5
Liberado a una velocidad alta al inicio en una región de aire con movimiento rápido.	Desbarbado; chorreado abrasivo; desmoldeo en fundiciones.	2.5 - 10

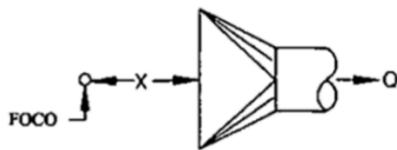
*Nota. Fuente.* Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design, por ACGIH, 2023.

**Caudal de Aspiración.** Se calcula considerando factores como la forma de la campana, el área de las aberturas y la distancia al foco del contaminante. La velocidad de captura en puntos exteriores a la campana se determina por la superficie de igual velocidad correspondiente al caudal de aspiración utilizado. En la práctica, las campanas tienen dimensiones físicas que no se ajustan a formas geométricas simples, y los perfiles de velocidad se establecen experimentalmente. Para campanas de apertura circular o rectangular, los caudales de aspiración se muestran en la Figura 11, donde  $Q$  es el caudal

de aire,  $V$  es la velocidad del aire en el eje de la campana a una distancia  $X$  de la apertura.  
 $X$  es la distancia a la apertura de la campana y  $A$  es el área de la apertura de la campana.  
 Se deduce que la velocidad disminuye inversamente al cuadrado de la distancia a la campana.

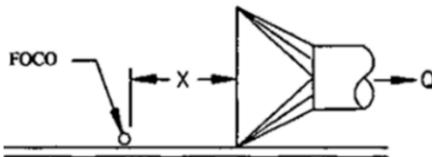
**Figura 11**

*Caudal de aire en una campana de extracción*



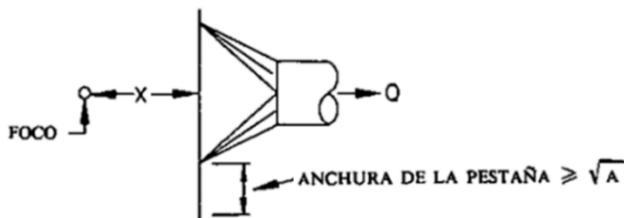
CAMPANA LIBREMENTE SUSPENDIDA

$$Q = V(10X^2 + A)$$



CAMPANA APOYADA SOBRE UNA MESA O EL SUELO

$$Q = V(5X^2 + A)$$



CAMPANA CON PESTAÑA ANCHA

$$Q = V 0.75(10X^2 + A)$$

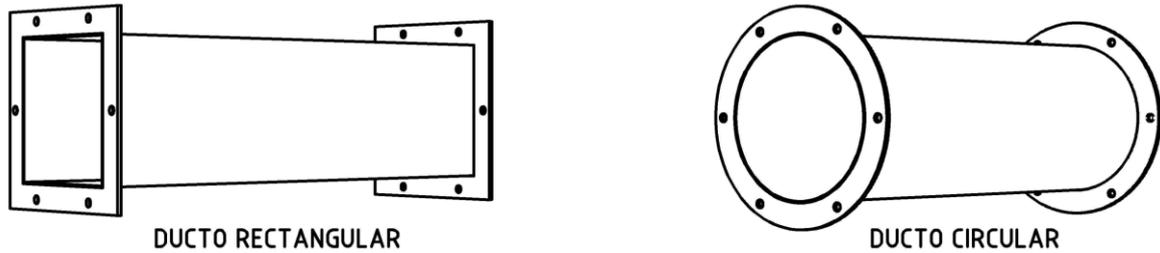
*Nota.* Fórmulas aplicadas al diseño de campanas de extracción. *Fuente.* *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design*, por ACGIH, 2023.

**Ductos.** Están diseñados para transportar un volumen determinado de aire de la manera más eficiente y silenciosa posible, lo que reduce el consumo de energía y el ruido. La velocidad de aire en los ductos, la selección de accesorios y la acústica son aspectos

importantes en el diseño de ductos (Behls, 2021). Como se muestra en la Figura 12, los ductos más usuales en la industria son los rectangulares y los circulares.

**Figura 12**

*Tipos de ductos*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Velocidad del Aire en los Ductos.** Se elige en función de los contaminantes capturados en la campana. Se selecciona una velocidad apropiada para transportar el material particulado, evitando depósitos en los ductos y permitiendo su llegada al colector. Esta velocidad es esencial para prevenir la sedimentación y las obstrucciones. Una velocidad mínima evita el asentamiento de partículas, mientras que velocidades muy altas pueden causar desgaste. Las velocidades recomendadas en el diseño de conductos se indican en la Tabla 5 y son superiores a los valores experimentales como precaución (ACGIH, 2023). La ecuación que relaciona el caudal y la velocidad de aire dentro del ducto se indica en la Ecuación 2.1.

$$Q = v \cdot A \quad (2.1)$$

Donde:

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$v$  = Velocidad del aire en el ducto, m/s

$A$  = Área interior del ducto, m<sup>2</sup>

**Tabla 5***Velocidades de aire en los ductos*

<b>Naturaleza del contaminante</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Velocidad de diseño, m/s</b>
Vapores, gases, humos de combustión	Todos los vapores, gases y humos	5 – 10
Humos de soldadura	Soldadura	10 – 12.5
Polvo muy fino y ligero	Hilos de algodón, harina de madera, polvo de talco	12.5 – 15
Polvos secos	Polvo fino de caucho, baquelita en polvo para moldeo, hilos de yute, polvo de algodón, virutas (ligeras), polvo de detergente, raspaduras de cuero.	15 – 20
Polvo ordinario	Polvo de desbarbado, hilos de muela de pulir (secos), polvo de lana de yute (residuos de sacudidor), polvo de granos de café, polvo de cuero, polvos de granito, harina de sílice, manejo de materiales pulverulentos en general, corte de ladrillos, polvo de arcilla, fundiciones (en general), polvo de caliza, polvo en el embalado y pesado de amianto en industrias textiles	17.5 – 20
Polvos pesados	Polvo de aserrado (pesado y humero), viruta metálica, polvo de desmoldeo en fundiciones, polvo en el chorreado con arena, pedazos de madera, polvo de barrer, virutas de latón, polvo en el taladrado de fundición, polvo de plomo	20 – 22.5
Polvo pesado húmedo	Polvo de plomo con pequeños pedazos, polvo de cemento húmedo, polvo del corte de tubos de amianto- cemento, hilos de muela de pulir (pegajosos)	> 22.5

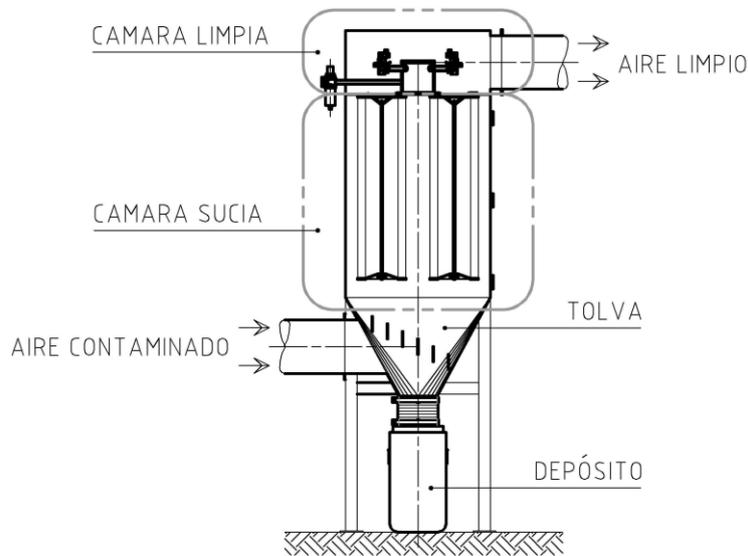
*Nota. Fuente. Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design, por ACGIH, 2023.*

**Colector.** Es el componente central del sistema, generalmente construido en acero y compuesto por dos cámaras, la cámara de aire sucio y la cámara de aire limpio, como se muestra en la Figura 13. Los elementos filtrantes dividen estas cámaras, permitiendo que el aire contaminado entre, retenga el polvo y luego libere el aire limpio al ambiente. En la parte inferior, cuenta con una tolva para transferir el polvo acumulado a un depósito de almacenamiento. Existen diversos tipos y tamaños de estos dispositivos con distintos modos de operación, los más habituales en la industria son:

- Colector de mangas
- Colector de cartuchos
- Colector ciclónico

**Figura 13**

*Componentes de un colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Colector de Mangas.** Es un dispositivo utilizado en sistemas de filtración industrial para capturar partículas del aire contaminado. Consiste en un conjunto de mangas dispuestas verticalmente que filtran el aire mientras retienen las partículas de polvo. Estas mangas (Figura 14), típicamente fabricadas con materiales como poliéster, son eficaces para atrapar partículas de diversos tamaños y pueden adaptarse a diferentes exigencias de calidad del aire. Además, gracias al agitador automático que poseen, los filtros se limpian sin necesidad de invertir en aire comprimido. Sin embargo, es importante tener en cuenta que se trata de un modelo antiguo que podría no cumplir con los estándares actuales de filtración y podría sufrir desgaste por abrasión, lo que reduciría su vida útil y eficiencia.

## Figura 14

### Filtros de manga



*Nota. Fuente.* Donaldson Company, 2024a (<https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/filters-parts/baghouse-filters/fabric/>).

**Colector de Cartuchos.** Es un sistema de recolección de polvo utilizado en entornos industriales. Está diseñado con filtros de mangas plisadas, similares a cartuchos alargados (Figura 15), que ofrecen una amplia variedad de opciones de filtración. Estos filtros reemplazan a las mangas convencionales y sus jaulas de soporte, simplificando el mantenimiento y reduciendo el tiempo de inactividad. El colector de cartuchos proporciona una mayor área filtrante, menor pérdida de presión y una mayor resistencia a la abrasión, lo que mejora la eficiencia del filtro y prolonga su vida útil.

## Figura 15

### Filtros de cartucho

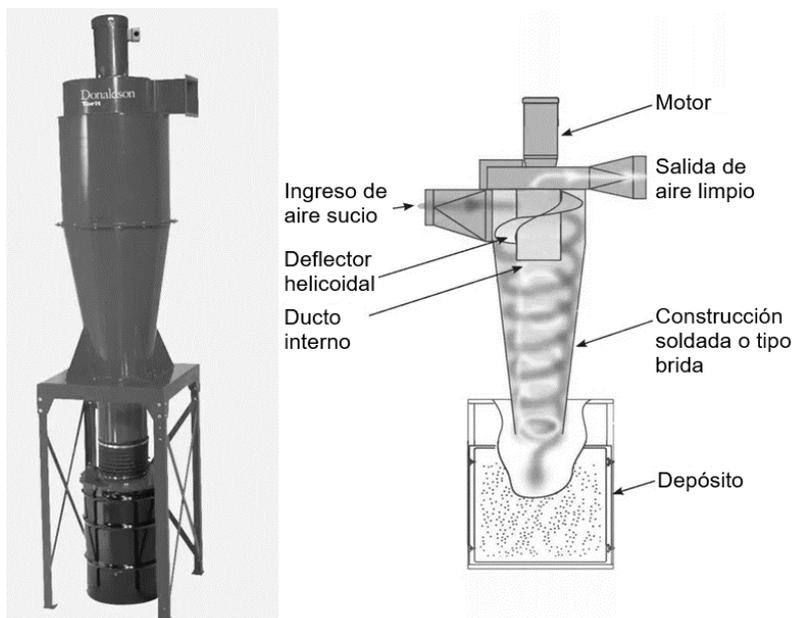


*Nota. Fuente.* Donaldson Company, 2024d (<https://www.donaldson.com/es-es/industrial-dust-fume-mist/filters-parts/cartridge-filters/>).

**Colector Ciclónico.** Está diseñado para entornos industriales con alta carga de contaminantes y altas temperaturas, utiliza la fuerza centrífuga para separar polvo de gran tamaño. Este sistema, conocido por su eficiencia en la recuperación de productos, se basa en un separador mecánico que aprovecha la fuerza centrífuga para eliminar el polvo pesado, como se muestra en la Figura 16. Además, puede funcionar como un sistema previo al colector de cartuchos, formando así un sistema integral de recolección que abarca desde polvos grandes hasta finos.

**Figura 16**

*Colector ciclónico*



*Nota. Fuente.* Donaldson Company, 2024c (<https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/equipment/dust-collectors/cyclone/>).

**Ventilador.** Es una turbomáquina utilizada para desplazar aire y otros gases. A diferencia de un compresor, que también maneja gases, este no aumenta la presión lo suficiente como para incrementar la densidad del fluido en más del 5%. Los ventiladores generan aumentos de presión muy pequeños, medidos en milímetros de columna de agua (mmca), y por ello, los ligeros cambios en la densidad se ignoran. (Sultanian & Logan, 2019). Los ventiladores más habituales en la industria son los centrífugos y los axiales.

**Parámetros de Rendimiento.** Los parámetros más importantes de un ventilador son el caudal volumétrico  $\dot{V}$  del fluido gaseoso transportado por el ventilador y el incremento de la presión total  $\Delta p_t$ . El fluido gaseoso se considera incompresible (Carolus, 2022). Dada su densidad  $\rho$ , los parámetros de rendimiento equivalentes del ventilador son:

- El flujo másico a través del ventilador:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (2.2)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo másico, kg/s

$\rho$  = Densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

$\dot{V}$  = Caudal volumétrico, m<sup>3</sup>/s

- El trabajo específico realizado por el ventilador al fluido:

$$Y_t = \Delta p_t / \rho \quad (2.3)$$

Donde:

$Y_t$  = Trabajo específico, J/kg

$\Delta p_t$  = Incremento de la presión total, Pa

- La potencia en el eje que un motor debe suministrar al impulsor del ventilador es calculada con el torque en el eje  $M_s$  y la velocidad del eje del impulsor  $n$ .

$$P_s = M_s \cdot 2\pi n / 60 \quad (2.4)$$

Donde:

$P_s$  = Potencia en el eje, W

$M_s$  = Torque en el eje, N-m

$n$  = Velocidad de giro del impulsor, RPM

Los parámetros adimensionales del ventilador, expresados en función del diámetro exterior del impulsor ( $D$ ) los cuales indican la naturaleza del ventilador y su comportamiento operativo, como se indica en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Parámetros adimensionales de los ventiladores*

Designación	Definición
Coeficiente de caudal volumétrico	$\varphi = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi^2}{4} D^3 n} \quad (2.5)$
Coeficiente de aumento de presión	$\psi_t = \frac{Y_t}{\frac{\pi^2}{2} D^2 n^2} = \frac{\Delta p_t}{\frac{\pi^2}{2} \rho D^2 n^2} \quad (2.6)$
Coeficiente de potencia	$\lambda = \frac{P_s}{\frac{\pi^4}{8} \rho D^5 n^3} \quad (2.7)$
Velocidad específica	$\sigma = \frac{n}{(2\pi^2)^{-1/4} Y_t^{3/4} \dot{V}^{-1/2}} \quad (2.8)$
Diámetro específico	$\delta = \frac{D}{(8/\pi^2)^{1/4} Y_t^{-1/4} \dot{V}^{1/2}} \quad (2.9)$
Eficiencia total	$\eta = \frac{\dot{m} Y_t}{P_s} = \frac{\dot{V} \Delta p_t}{P_s} \quad (2.10)$

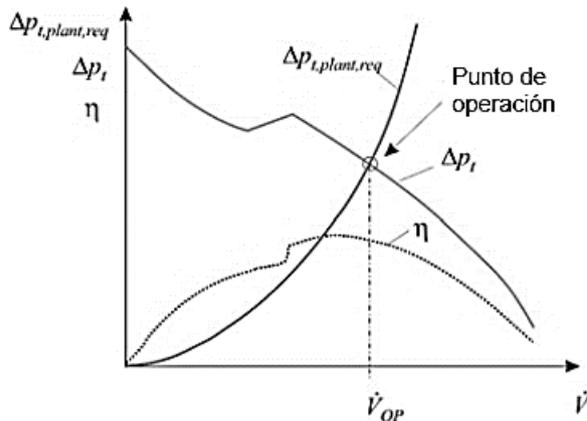
*Nota. Fuente. Logan's turbomachinery: Flowpath design and performance fundamentals (p. 6), por T. Carolus, 2022, Springer Vieweg Verlag.*

**Curvas Características.** Describen el comportamiento operativo del ventilador en relación con el caudal y se determinan mediante un banco de pruebas con la velocidad del eje constante. La Figura 14 ilustra a la curva del ventilador, la eficiencia y la curva del sistema en función del caudal.

**Curva del Ventilador.** Se muestra como la mitad derecha decreciente de una parábola invertida en la Figura 17, muestra la presión total del ventilador en relación con el caudal que puede suministrar.

**Figura 17**

*Curvas características de un ventilador*



*Nota. Fuente. Logan's turbomachinery: Flowpath design and performance fundamentals (p. 5), por T. Carolus, 2022, Springer Vieweg Verlag.*

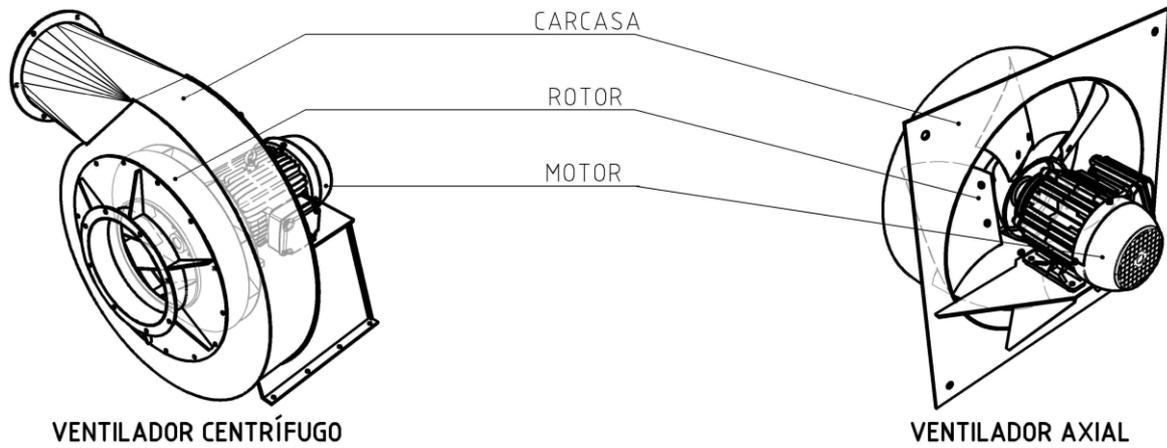
**Curva de Eficiencia.** Se muestra como una parábola invertida completa en la Figura 17, cuyo punto más alto representa al punto óptimo, el lugar donde el ventilador opera con su máxima eficiencia; la operación a carga parcial a la izquierda y la operación a sobrecarga a la derecha se definen en función de este punto. La carga parcial puede generar flujos estancados, causando inestabilidad, ruido y vibraciones (Carolus, 2022). Por ello se prefiere trabajar a sobrecarga.

**Curva del Sistema.** Se muestra como la mitad derecha de una parábola creciente en la Figura 17, muestra el aumento de presión del sistema para un caudal requerido. La intersección de esta curva con la curva del ventilador da como resultado al punto de operación del ventilador; aunque lo ideal es que coincida con el punto óptimo, en la práctica, esto es complicado de conseguir (Carolus, 2022).

**Clasificación.** Los ventiladores se clasifican, principalmente en Centrífugos y Axiales como se muestra en la Figura 18. Los ventiladores centrífugos son adecuados para un trabajo que requiere un gran aumento de presión total y bajos caudales volumétricos, mientras que los ventiladores axiales se caracterizan típicamente por altos caudales volumétricos con bajo aumento de presión (Carolus, 2022).

**Figura 18**

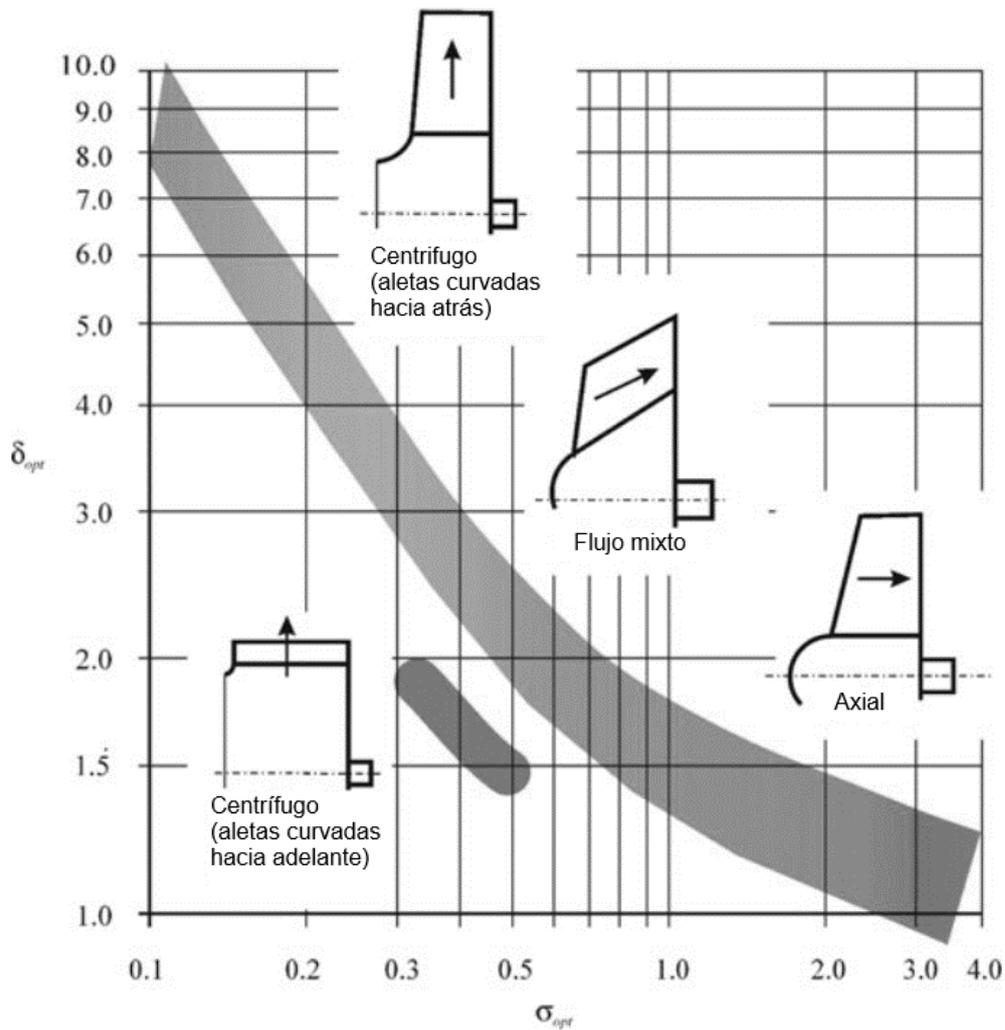
Ventilador centrífugo y axial



Nota. Ventiladores de transmisión directa. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 19**

Diagrama de Cordier



Nota. Tipos de ventiladores en el diagrama de Cordier. Fuente. Logan's turbomachinery: Flowpath design and performance fundamentals (p. 9), por T. Carolus, 2022, Springer Vieweg Verlag.

El diagrama de Cordier, mostrado en la Figura 19, donde  $\delta_{opt}$  es el diámetro específico en el punto óptimo y  $\sigma_{opt}$  es la velocidad específica en el punto óptimo, es útil para seleccionar el tipo de ventilador más adecuado, su tamaño, la velocidad del eje y, si es necesario, el número de etapas en serie o en paralelo para una tarea determinada. Los ventiladores centrífugos con las palas curvadas hacia atrás son turbomáquinas de baja velocidad específica, típicamente con valores de  $\sigma_{opt}$  (velocidad específica en el punto óptimo) entre 0,1 y 0,6. Por el contrario, los ventiladores axiales con  $\sigma_{opt} > 0.6$  son turbomáquinas de alta velocidad específica. Los ventiladores de flujo mixto están en el medio. Sólo el ventilador centrífugo con las palas curvadas hacia adelante (Ventilador Siroco) se encuentra fuera de esta banda.

#### **2.1.4. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

Consiste en el uso de computadoras y técnicas numéricas para resolver problemas físicos asociados al movimiento de los fluidos, y en ocasiones, otros fenómenos como la transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, entre otros. En general, el CFD abarca una amplia gama de disciplinas científicas, destacando las matemáticas, la programación, las ciencias físicas y la ingeniería. Estas disciplinas se unen para desarrollar un código capaz de resolver las ecuaciones del flujo de manera satisfactoria (Fernández Oro, 2012).

**Ecuaciones de Gobierno de la Mecánica de Fluidos.** Formuladas por Claude Navier y George Stokes al introducir los términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler, dieron lugar a las famosas ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones no tienen una solución analítica general, pero pueden ser discretizadas y resueltas numéricamente si el dominio se divide en un número finito, generalmente muy grande, de volúmenes de control (Fernández Oro, 2012). Para lograr esto, se plantea en cada celda la ecuación general de transporte, que se representa en la Ecuación 2.11.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint_A \Gamma \nabla_{\phi} d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (2.11)$$

Donde:

$t =$  Tiempo

$\rho =$  Densidad del fluido

$A =$  Área superficial

$V =$  Volumen

$\Gamma =$  Difusividad de la variable

$S_{\phi} =$  Fuente o sumidero de  $\phi$

$\phi =$  Variable genérica transportada, puede adoptar los siguientes valores para cada ecuación de transporte:

- Ecuación para la masa (continuidad):  $\phi = 1$
- Ecuación para la cantidad de movimiento:  $\phi = u, v, w$   
(componentes en  $x, y, z$  de la velocidad)
- Ecuación para la energía  $\phi = h$  (entalpía)

El primer término de la Ecuación 2.11 representa el transporte transitorio de  $\phi$ . El segundo término, el transporte por convección; el tercer término representa el transporte de  $\phi$  por difusión, y el cuarto término denota la fuente o sumidero de  $\phi$ .

**Estructura de un Software CFD.** La mayoría de los softwares comerciales utilizan el método de volúmenes finitos, el cual discretizan y linealizan para obtener un sistema algebraico de ecuaciones que se resuelve numéricamente para obtener una solución final (Fernández Oro, 2012). Actualmente presentan la siguiente estructura:

- Preproceso
- Solver (Solucionador)
- Postproceso

**Preproceso.** En esta fase, se introducen los datos de entrada al programa y se convierten a un formato compatible para el solver. Incluye la definición de la geometría del dominio, la generación de la malla, la identificación de fenómenos físicos y químicos a modelar, la definición de propiedades del fluido, y la especificación de condiciones iniciales y de contorno. La generación de la malla es crucial, ya que afecta la calidad de los resultados, requiriendo un equilibrio entre finura y eficiencia computacional (Fernández Oro, 2012).

**Solver (Solucionador).** Constituye la parte central del programa y resuelve de manera iterativa las ecuaciones previamente activadas en el preproceso. Aunque es la parte más importante, el usuario solo inicia la ejecución, y la duración varía según los modelos y el tamaño de la malla (Fernández Oro, 2012).

**Postproceso.** En este módulo, se incluyen herramientas gráficas que permiten analizar los resultados y gestionar la gran cantidad de información generada. Incluye representación gráfica del dominio y la malla, mapas de contornos, gráficas y distribuciones, gráficos de superficies bidimensionales y tridimensionales, así como animaciones y exportación de resultados a otros formatos. Es esencial para interpretar y comunicar eficazmente los resultados obtenidos (Fernández Oro, 2012).

## **2.2. Marco Conceptual: Definición de Términos o Conceptos**

**Aire.** Mezcla de gases que conforma la atmósfera terrestre y es esencial para la vida y los procesos naturales en el planeta.

**Aire Standard.** Aire seco a 20°C de temperatura y 1 atm de presión barométrica, con una densidad de 1,2 kg/m<sup>3</sup>, se utiliza como referencia en ingeniería.

**Calidad del aire.** Estado que describe la pureza y composición del aire en un entorno específico, evaluando la concentración de contaminantes atmosféricos.

**Caudal.** Cantidad de fluido que circula por un sistema durante un intervalo de tiempo determinado.

**Concentración de partículas.** Cantidad de partículas sólidas o líquidas presentes en un volumen específico, generalmente expresado en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) o partículas por millón (ppm)

**Contaminantes Atmosféricos.** Sustancias presentes en el aire en concentraciones con efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente.

**Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).** Disciplina que emplea métodos numéricos para analizar y resolver problemas relacionados con el movimiento de fluidos.

**Extracción.** Proceso de remover algo de un lugar, usualmente para propósitos específicos como limpieza, purificación o separación.

**Filtro.** Dispositivo que remueve partículas o contaminantes de un fluido mediante un medio poroso que permite el paso del fluido mientras retiene las impurezas.

**Gas.** Fluido sin forma que tiende a ocupar uniformemente todo el espacio disponible a temperatura y presión normales.

**Humo.** Aerosol generado por combustión, sublimación o condensación de vapores de materiales sólidos.

**Máquina.** Dispositivo que utiliza la energía para realizar una tarea específica mediante trabajo mecánico.

**Nivel de Ruido.** Medida del sonido en un lugar, generalmente expresado en decibelios ponderados de frecuencia A (dBA), usado para evaluar el impacto ambiental y proteger la salud auditiva.

**Polvo.** Partículas sólidas diminutas originadas por la ruptura de partículas más grandes mediante procesos mecánicos.

**Presión Dinámica.** Presión cinética necesaria para inducir el flujo de un fluido en reposo a una velocidad específica.

**Presión Estática.** Presión potencial ejercida en un fluido, medida perpendicular al flujo, indica la tendencia a dilatar o colapsar el conducto.

**Presión Total.** Combinación de las presiones estática y dinámica, considerando el signo de cada una en una suma algebraica.

**Soldadura.** Proceso de unión de materiales, logrado mediante el calentamiento, que puede implicar presión o el uso de un material de aporte.

**Ventilación.** Sistema que provee aire fresco y elimina el aire viciado o contaminado de un espacio cerrado.

## **CAPÍTULO III**

### **Desarrollo del Trabajo de Investigación**

En la primera parte de este capítulo se diseñará a cada componente de la máquina mediante cálculos y simulaciones computacionales para analizar y dimensionar. Estos componentes se muestran en la Figura 20 y son, en el siguiente orden:

- Campana de extracción
- Brazo articulado
- Colector
- Ventilador

En la segunda parte, se realizarán simulaciones computacionales para evaluar el comportamiento integral de la máquina en un entorno controlado con la presencia de humos durante un proceso de soldadura

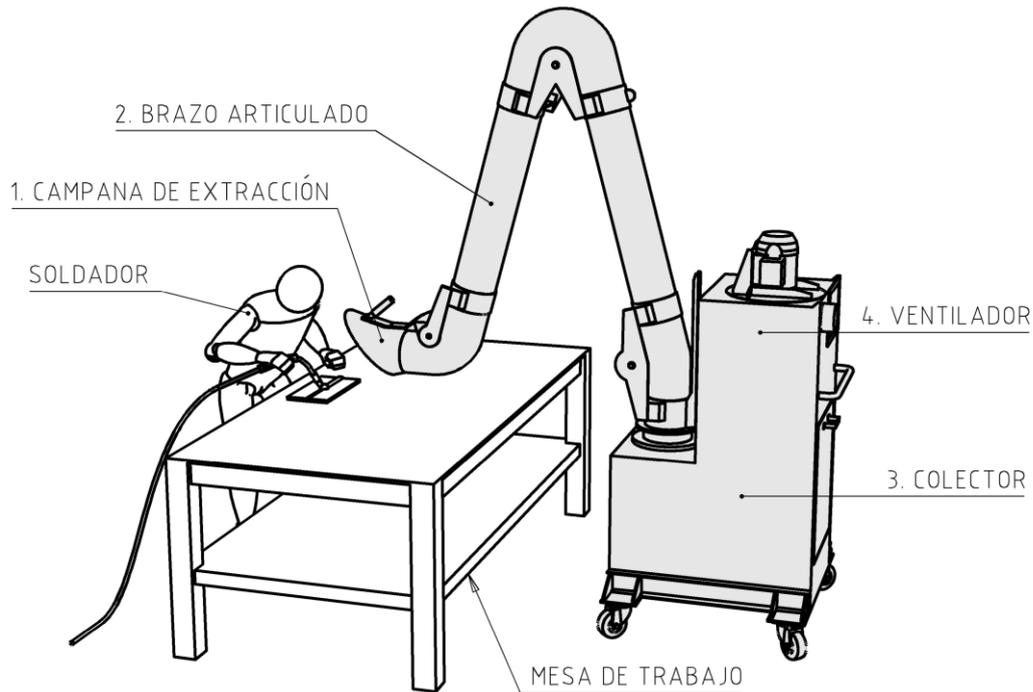
#### **3.1. Diseño de la Máquina de Extracción de Humos**

La máquina de extracción de humos estará diseñada para situarse, al igual que una máquina de soldar, junto a la mesa de trabajo de un soldador como se muestra en la Figura

20, y opera sobre su superficie, cuyas dimensiones típicas son de 2,4 m de largo por 1,2 m de ancho.

### Figura 20

Máquina de extracción de humos



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Durante la operación, el soldador acercará manualmente la campana de extracción a una distancia de aproximadamente 0,3 m de la pieza que está soldando para garantizar una captura efectiva de humos. Para llevar a cabo esta tarea, la máquina estará equipada con un brazo articulado que guiará los humos, impulsados por un ventilador, hacia un filtro que separe los contaminantes del aire, recolectándolos. El filtro deberá limpiarse ocasionalmente mediante un pulso de aire comprimido. Para ello, la máquina estará equipada con un sistema de limpieza interno.

Para su traslado, la máquina estará equipada con un juego de ruedas y unas dimensiones que no excedan los 0,9 m de ancho por 2 m de altura, para asegurar su paso por cualquier obstáculo hacia otras mesas de trabajo o entornos donde se le requiera.

Para facilitar su mantenimiento, la máquina estará equipada con compuertas para el ventilador, el sistema de limpieza, la sustitución del filtro y la recolección de contaminantes.

### 3.1.1. Diseño de la Campana de Extracción

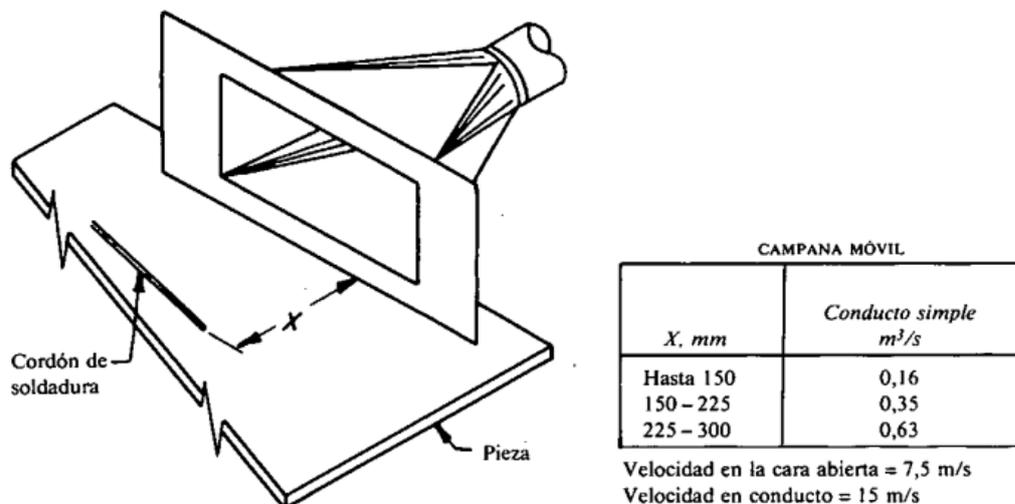
**Especificaciones de Desempeño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran que debe hacer la campana de extracción.

**Caudal de Aire (Q).** La campana de extracción debe estar lo más alejada posible del soldador para no interrumpir su labor. Se tomará como referencia un alejamiento horizontal ( $x$ ) de 300 mm del cual se obtiene un caudal de aire de  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$  respecto a lo mostrado en la Figura 21.

$$Q = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Figura 21**

*Caudal de aire en una campana de extracción*



*Nota.* Alejamiento horizontal y caudal en una campana de extracción de humos de soldadura. Fuente. *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design*, por ACGIH, 2023.

**Velocidades del Aire.** La campana de extracción posee tanto en su interior como exterior una serie de velocidades del aire que son consecuencia de su operación normal.

Estas velocidades están normadas y fueron establecidas por criterios experimentales. En la Tabla 7 se presentan a estas velocidades junto a los valores que serán calculados posteriormente y mostrados en la Figura 23.

**Tabla 7**

*Velocidades del aire en la campana de extracción*

<b>Velocidad del aire</b>	<b>Simbología</b>	<b>Valor en m/s</b>
Velocidad de captura	$v_c$	0,3
Velocidad de captura máxima	$v_{cmáx}$	0,5
Velocidad del aire en la apertura	$v_a$	7,5
Velocidad del aire en el ducto	$v_d$	20

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

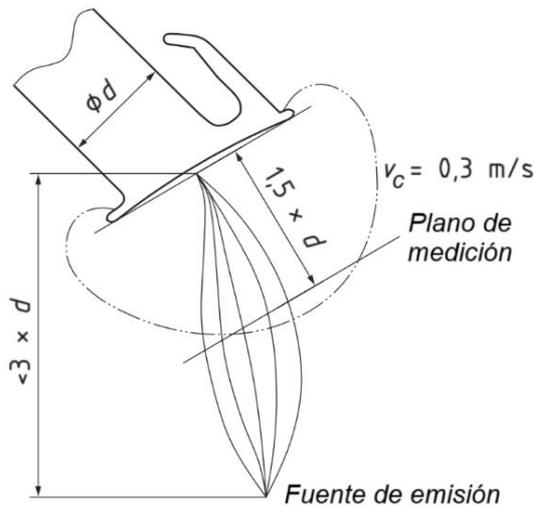
**Velocidad de Captura ( $v_c$ ).** Las campanas de extracción que se conectan a brazos articulados requieren una velocidad del aire en la captura de 0,3 m/s para garantizar una extracción adecuada del humo (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020). Esta condición puede alcanzarse mediante la medición o a través de una simulación numérica computacional.

$$v_c = 0,3 \text{ m/s}$$

Esta velocidad se mide en un plano imaginario denominado plano de medición, el cual es paralelo a la apertura de la campana y alejado una distancia equivalente a 1,5 veces el diámetro interior del ducto, como se muestra en la Figura 22, donde  $v_c$  es la velocidad de captura y  $d$  es el diámetro interior del ducto.

**Figura 22**

*Velocidad de captura en la campana de extracción*



Nota. Fuente. ISO 21904-1:2020, por Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020.

**Velocidad de Captura Máxima ( $v_{cm\acute{a}x}$ ).** El flujo de aire no debe perturbar el arco o la llama en la zona de trabajo. Se recomienda que se capturen los contaminantes desde la zona de trabajo con una velocidad máxima de 0,5 m/s (American Welding Society [AWS], 2021).

$$v_{cm\acute{a}x} = 0,5 \text{ m/s}$$

**Velocidad del Aire en la Apertura ( $v_a$ ).** Se recomienda que la velocidad del aire en la apertura de la campana de extracción sea de 7,5 m/s (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2023)

$$v_a = 7,5 \text{ m/s}$$

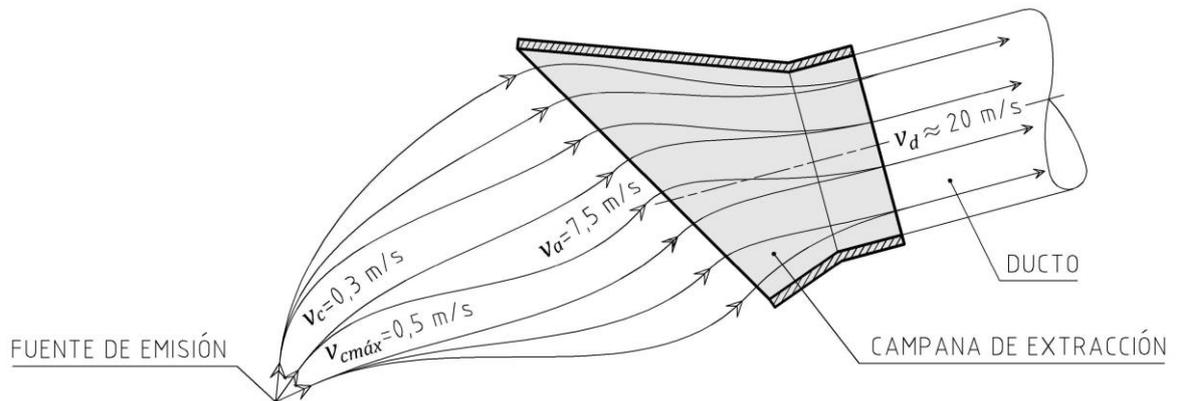
**Velocidad del Aire en el Ducto ( $v_d$ ).** Se recomienda que la velocidad del aire en el ducto sea de 15 m/s (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2023). Sin embargo, se incrementará esta velocidad hasta aproximadamente 20 m/s como una garantía de funcionamiento, debido a las pérdidas que experimentará la máquina a lo largo de su vida útil. Velocidades superiores a 25 m/s producirán un ruido indeseable en el ducto (Soler & Palau, 2024a) como se muestra en la Figura 23, donde  $v_c$

es la velocidad de captura,  $v_{cm\acute{a}x}$  es la velocidad de captura máxima y  $v_a$  es la velocidad del aire en la apertura.

$$v_d \approx 20 \text{ m/s}$$

### Figura 23

Velocidades del aire en la campana de extracción

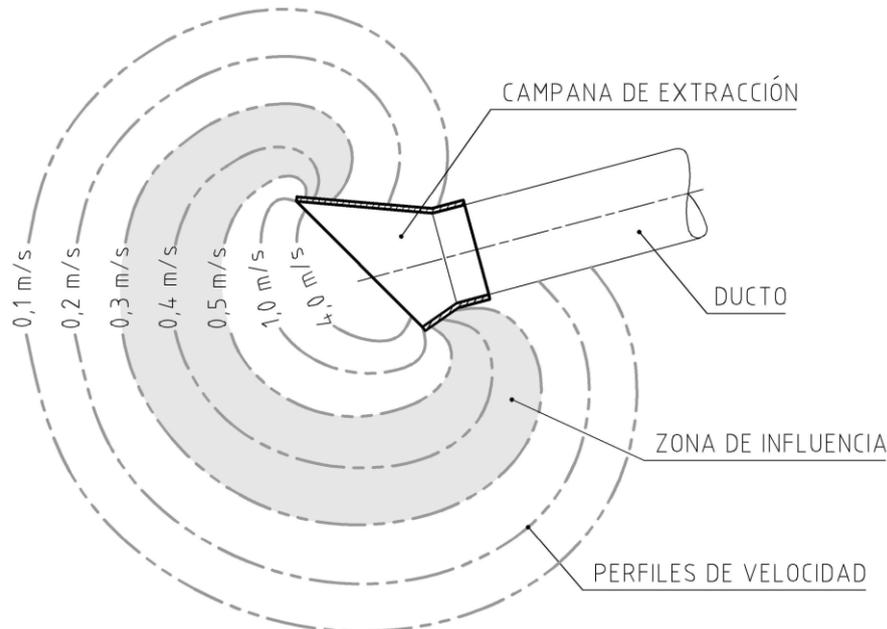


Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Zona de Influencia.** Es una región espacial comprendida entre los perfiles de velocidad de captura ( $v_c = 0,3 \text{ m/s}$ ) y de velocidad de captura máxima ( $v_{cm\acute{a}x} = 0,5 \text{ m/s}$ ), según las normas ISO 21904:2020 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020) y ANSI Z49.1:2021 (American Welding Society [AWS], 2021) respectivamente, como se muestra en la Figura 24. Representa el lugar geométrico donde se pueden capturar los contaminantes de manera efectiva y sin perturbar el proceso de soldadura.

**Figura 24**

*Zona de influencia*



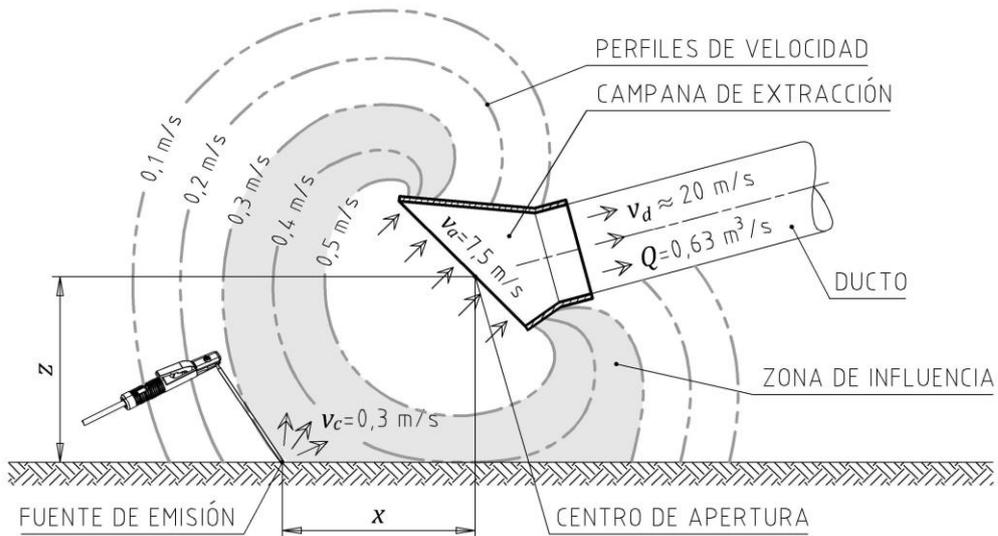
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Alejamiento Vertical ( $z$ ).** Es la distancia vertical que el soldador, manualmente, debe acercar la campana de extracción a la mesa de trabajo, como se muestra en la Figura 25, donde  $v_c$  es la velocidad de captura,  $v_a$  es la velocidad de apertura,  $v_d$  es la velocidad del aire en el ducto y  $Q$  es el caudal de aire.

**Alcance Horizontal ( $x$ ).** Es una distancia generada como consecuencia de la operación normal de la campana de extracción, al intersectar la zona de influencia con la mesa de trabajo como se muestra en la Figura 25. Representa el espacio adecuado donde el soldador puede realizar su trabajo sin interferir con la campana.

**Figura 25**

*Operación de la campana de extracción*

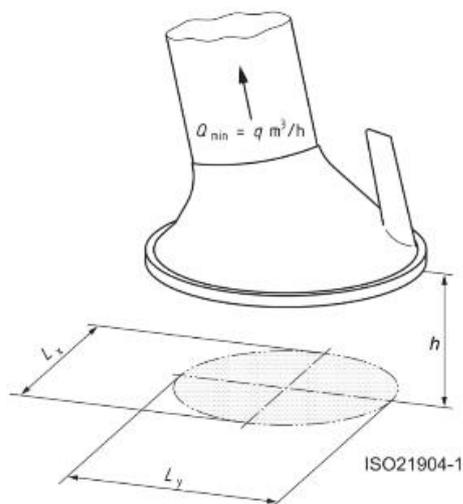


Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Campo de Succión.** Es la región plana generada con la intersección del plano de medición y el perfil de la velocidad de captura ( $v_c = 0,3 \text{ m/s}$ ) como se muestra en la Figura 26, donde  $h$  es una altura equivalente a 1,5 veces el diámetro del ducto,  $L_x$  es el ancho del campo de succión y  $L_y$  es largo del campo de succión. Establece la capacidad de captura de una campana de extracción mediante el cálculo de su área

**Figura 26**

*Campo de succión*



Nota. Fuente. ISO 21904-1:2020, por Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020.

**Especificaciones de Diseño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran cómo debe ser la campana de extracción.

**Material de Fabricación.** En la Tabla 8 se presentan a los materiales de fabricación más usuales en ventilación y sus características principales. Los costos aproximados fueron obtenidos de compras realizadas en el año 2023, el costo de la fibra de vidrio es orientativo y depende de la complejidad geométrica.

**Tabla 8**

*Materiales de fabricación usuales en ventilación*

<b>Material</b>	<b>Densidad aprox. (kg/m3)</b>	<b>Resistencia a la tracción (Mpa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (Gpa)</b>	<b>Costo aprox. (USD/kg)</b>	<b>Acabado superficial típico</b>
PVC: Policloruro de vinilo	1395	50	2.8	3,5	Pulido
Fibra de vidrio	2000	1000	54	30	Gelcoat
Aluminio 1050 (99.5Al)	2710	55	69	8	Pulido
Acero ASTM A36 (0.26máx. C)	7850	400	200	1,3	Base y pintura epóxica
Acero galvanizado (0.26máx. C)	7850	400	200	1,5	Base y pintura epóxica
Acero inoxidable AISI-304 (18Cr-8Ni)	7930	517	193	5,5	Pulido y decapado
Acero inoxidable AISI-316 (16Cr-12Ni-2Mo)	7980	517	193	7,9	Pulido y decapado

*Nota. Fuente. ASME B31.3-2022: Process Piping, por American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2022a. Iniciativas comerciales e industriales S.L., 2024 (<https://icei.es/wp-content/uploads/2015/06/ALEACION-1050.pdf>). Fiber Dowels, 2024 (<https://fiberdowels.com/es/fibra-de-vidrio-vs-acero/>). Plasticbages Industrial S.L., 2024 (<http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>).*

La campana debe ser capaz de soportar las condiciones térmicas y mecánicas presentes en el entorno donde se pretende utilizar (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020). Además, la campana de extracción debe ser ligera, económica y de fácil fabricación. Por tanto, se obtienen las siguientes especificaciones para la elección del material de fabricación más adecuado.

- Peso
- Costo
- Fabricación
- Resistencia térmica
- Acabado

**Peso.** Se prefiere que sea ligero; en caso de ser un material pesado, deberá ser muy delgado, lo cual puede afectar su integridad estructural o requerir dobleces adicionales como refuerzo, evitando así el riesgo de lesiones por corte, pero acrecentando su costo de fabricación.

**Costo.** No debe ser excesivamente costoso, pero tampoco tan barato como para comprometer el desempeño de sus funciones.

**Fabricación.** No debe presentar muchas dificultades en su proceso de fabricación respecto a procesos como el doblado, rolado o soldeo.

**Resistencia Térmica.** Debe soportar temperaturas del orden de los 100°C debido a la presencia de humos de soldadura.

**Acabado.** No estará expuesto a condiciones corrosivas, pero se prefiere que no requiera un tratamiento o recubrimiento adicional que incremente su costo.

Se elabora una matriz de decisión (Tabla 10) con las cinco especificaciones, con la cual se seleccionará al material de fabricación más adecuado para la campana de extracción. Cada material ocupa una fila en la matriz y a las columnas se les asignan

especificaciones con un factor de ponderación y un puntaje del 1 al 10 para ser evaluados, ejemplo:

$$PVC = 0,30 \cdot 10 + 0,25 \cdot 9 + 0,20 \cdot 2 + 0,15 \cdot 1 + 0,10 \cdot 9$$

$$PVC = 6,70$$

**Tabla 9**

*Matriz de decisión del material de la campana de extracción*

Factor de ponderación	Peso	Costo	Fabricación	Resistencia térmica	Acabado	Total
	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	1,00
PVC	10	9	2	1	9	6,70
Fibra de vidrio	9	2	10	8	9	7,30
Aluminio 1050	9	7	8	8	9	8,15
Acero ASTM A36	2	10	10	9	3	6,75
Acero galvanizado	2	10	10	9	4	6,85
Acero inoxidable AISI-304	2	8	8	10	7	6,40
Acero inoxidable AISI-316	2	7	8	10	7	6,15

*Nota. Fuente. Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos (p.10), por R. Norton, 2020, McGraw-Hill Interamericana.*

De lo expuesto en la Tabla 9, se elige al material de fabricación con mayor puntaje total, es decir al aluminio 1050 y por la misma razón, también será el material del brazo articulado.

El aluminio 1050 es un material conocido por ser ligero y de buena resistencia a la corrosión (Ibars Almonacil & Compte Valls, 2016). Además, es capaz de resistir temperaturas por encima de los 100°C y puede soldarse mediante GTAW a tope sin aporte de material para espesores que van desde 0,3 hasta 4 mm (Sanz Cubero & Romero Camacho, 2016).

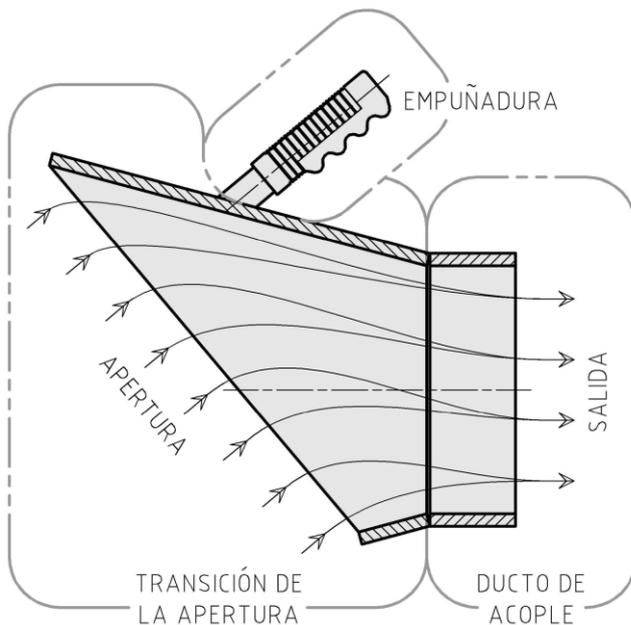
**Componentes.** La campana de extracción debe ocupar un volumen en el espacio que incluya una apertura y una salida para permitir un flujo continuo de aire.

Como se muestra en la Figura 27, en la apertura se requiere de un componente que dirija los humos de soldadura, incrementando gradualmente su velocidad y reduciendo su área. Este componente se denomina transición de la apertura. En la salida de la campana se debe contar con un componente que pueda acoplarse a una manguera flexible, lo que implica un tramo de área constante, denominado ducto de acople. Finalmente, se necesita un elemento que vincule la campana con el brazo del soldador, permitiendo su manipulación, es decir una empuñadura. Los tres componentes que conforman la campana de extracción son:

- Ducto de acople
- Transición de la apertura
- Empuñadura

**Figura 27**

*Componentes de la campana de extracción*

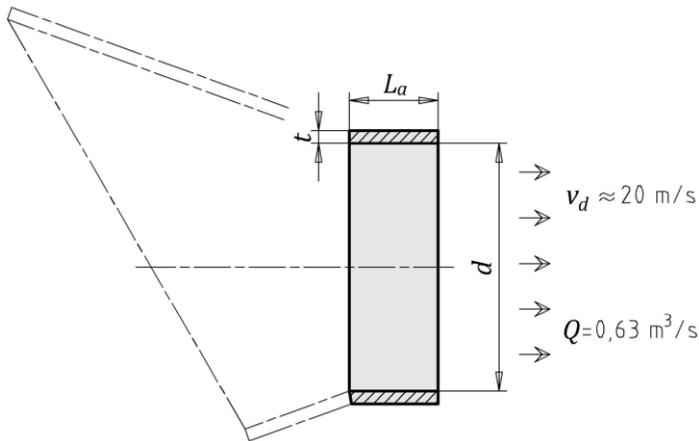


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Ducto de Acople.** Este componente se acopla a una manguera flexible estándar y está definido por su diámetro interior ( $d$ ), longitud ( $L_a$ ) y espesor ( $t$ ) como se muestra en la Figura 28, donde  $v_d$  es la velocidad del aire en el ducto y  $Q$  su caudal.

**Figura 28**

*Ducto de acople*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Diámetro Interior Temporal ( $d'$ ).** Este diámetro debe generar una sección circular que provea una velocidad del aire en el ducto ( $v_d$ ) de aproximadamente 20 m/s para un caudal ( $Q$ ) de 0,63 m<sup>3</sup>/s. Este caudal está definido por la Ecuación 3.1.

$$Q = v_d \cdot A_d \quad (3.1)$$

Donde:

$Q =$  Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$v_d =$  Velocidad del aire en el ducto, m/s

$A_d =$  Área interior del ducto, m<sup>2</sup>

Para ductos circulares, se define a la Ecuación 3.2:

$$Q = v_D \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot d'^2 \right) \quad (3.2)$$

Donde:

$d'$  = Diámetro interior temporal del ducto, m

$$0,63 = 20 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d'^2\right)$$

$$d' = 0,20027 \text{ m}$$

$$d' = 200,27 \text{ mm}$$

**Diámetro Interior de la Manguera Flexible ( $d_m$ ).** Se selecciona el diámetro comercial más cercano al diámetro interior temporal del ducto ( $d'$ ) de una lista de mangueras flexibles estándar en ventilación, como se indica en la Tabla 10. Estas mangueras están fabricadas en poliuretano y cuentan con una espiral de alambre de acero cobreado en su interior, tal como se muestra en la Figura 29.

$$d_m = 200 \text{ mm}$$

**Tabla 10**

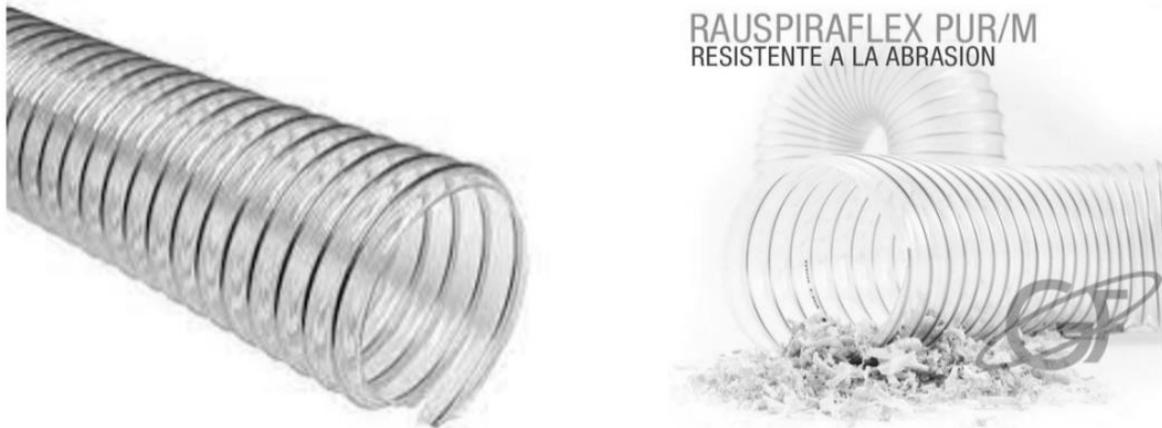
*Mangueras flexibles estándar en ventilación*

Diámetro interior (mm)	Espesor de pared (mm)	Presión máxima a 20°C (mmca)	Peso (kg/m)	Radio de curvatura a 20°C (mm)	Largo del rollo (m)
<b>100</b>	0,4	900	0,520	70	10
110	0,4	900	0,560	84	10
120	0,4	800	0,610	88	10
<b>125</b>	0,4	800	0,620	89	10
130	0,4	800	0,640	90	10
140	0,4	800	0,660	92	10
<b>150</b>	0,4	700	0,780	105	10
160	0,4	600	0,850	114	10
175	0,4	600	0,920	122	10
180	0,4	600	0,950	128	10
<b>200</b>	0,4	500	1,020	140	10
220	0,4	400	1,180	185	10
230	0,4	400	1,230	200	10
<b>250</b>	0,4	400	1,280	205	10

*Nota.* Los diámetros en negritas corresponden a valores comerciales. *Fuente.* Gomafiltros, 2024 ([https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex\\_purm\\_abrasiva](https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex_purm_abrasiva)).

## Figura 29

### Mangueras flexibles estándar en ventilación



Nota. Fuente. Gomafiltros, 2024 ([https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex\\_purm\\_abrasiva](https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex_purm_abrasiva)).

**Diámetro Interior ( $d$ ).** El diámetro interior calculado previamente es temporal, ya que se acoplará a una manguera flexible estándar, como se muestra en la Figura 30, donde  $d_m$  es el diámetro interior de la manguera flexible,  $L_a$  es el largo,  $t'$  es el espesor temporal y  $s$  es la luz de conexión. Para calcular este diámetro, es necesario descontar del diámetro de la manguera dos veces el espesor temporal y dos veces la luz de conexión, como se indica en la Ecuación 3.3.

$$d = d_m - 2 \cdot t' - 2 \cdot s \quad (3.3)$$

Donde:

$d$  = Diámetro interior del ducto, mm

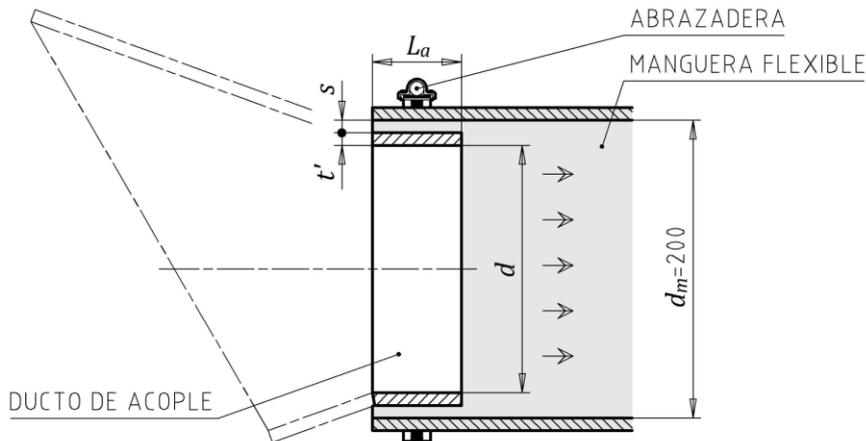
$d_m$  = Diámetro interior de la manguera flexible, mm

$t'$  = Espesor temporal del ducto, mm

$s$  = Luz de conexión, mm

**Figura 30**

*Conexión entre el ducto de acople y la manguera flexible*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Espesor Temporal ( $t'$ ).** Se considera temporalmente un espesor del ducto de 1 mm.

$$t' = 1 \text{ mm}$$

**Luz de Conexión ( $s$ ).** La conexión entre el ducto de acople y la manguera flexible debe tener una luz que facilite su montaje y desmontaje. Como recomendación, esta luz debe ser de al menos 1mm.

$$s = 1 \text{ mm}$$

Se reemplazan los valores obtenidos en la Ecuación 3.3:

$$d = 200 - 2 \cdot 1 - 2 \cdot 1$$

$$d = 196 \text{ mm}$$

**Espesor ( $t$ ).** Se obtiene de la Ecuación 3.4, la cual corresponde a un criterio constructivo para materiales de fabricación distintos al acero (*HVAC Duct Construction Standards*, 2020).

$$\frac{t}{d} \approx \sqrt[3]{0,001406 \cdot p \cdot \left(\frac{1 - \sigma^2}{E}\right) \cdot (1321 + d)} \quad (3.4)$$

Donde:

$t$  = Espesor del ducto, mm

$d$  = Diámetro interior del ducto, mm

$p$  = Presión negativa en el ducto, Mpa

$\sigma$  = Módulo de Poisson

$E$  = Módulo de elasticidad, Mpa

**Presión Negativa en el Ducto ( $p$ ).** El ducto debe soportar la misma presión que la manguera flexible acoplada, ya que ambos operan simultáneamente. Según la Tabla 10, la presión máxima para una manguera de 200 mm es de 500 mmca.

$$p = 500 \text{ mmca}$$

$$p = 0,0049 \text{ Mpa}$$

**Módulo de Elasticidad ( $E$ ).** De lo indicado en la Tabla 8, se obtiene que el aluminio 1050 posee un módulo de elasticidad de 69 Gpa.

$$E = 69 \text{ Gpa}$$

$$E = 69000 \text{ Mpa}$$

**Módulo de Poisson ( $\sigma$ ).** El aluminio 1050 posee un módulo de Poisson de 0,33 (Iniciativas comerciales e industriales S.L., 2024).

$$\sigma = 0,33$$

Se reemplazan los valores obtenidos en la Ecuación 3.4:

$$\frac{t}{196} \approx \sqrt[3]{0,001406 \cdot 0,0049 \cdot \left(\frac{1 - 0,33^2}{69000}\right) \cdot (1321 + 196)}$$

$$t \approx 1,005 \text{ mm}$$

La Ecuación 3.4 incluye un factor de seguridad mayor a cuatro, que aumenta con el diámetro interior ( $d$ ), por lo que se elige el espesor comercial más cercano al valor calculado.

$$t = 1 \text{ mm}$$

**Longitud ( $L_a$ ).** El ducto de acople debe tener una longitud adecuada que permita la instalación de una manguera flexible y una abrazadera en su diámetro exterior. Como recomendación, la longitud del ducto debe ser aproximadamente un tercio de su diámetro exterior, redondeada al múltiplo de diez más cercano, como se indica en la Ecuación 3.5.

$$L_a \approx \frac{1}{3} \cdot (d + 2 \cdot t) \quad (3.5)$$

Donde:

$L_a$  = Longitud del ducto de acople, mm

$d$  = Diámetro interior del ducto, mm

$t$  = Espesor del ducto, mm

$$L_a \approx \frac{1}{3} \cdot (196 + 2 \cdot 1)$$

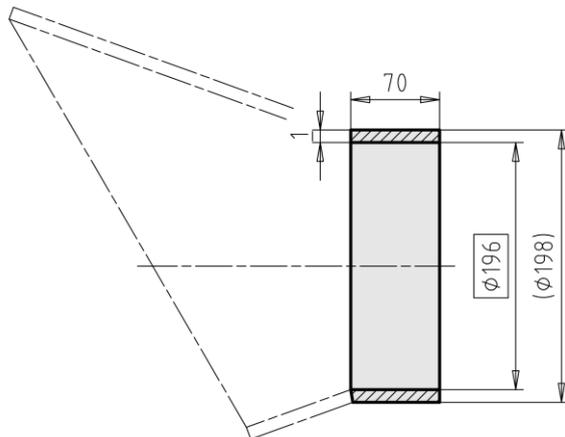
$$L_a \approx 66 \text{ mm}$$

$$L_a = 70 \text{ mm}$$

Con los valores obtenidos, se procede a dimensionar el ducto de acople, como se muestra en la Figura 31.

**Figura 31**

*Dimensionamiento del ducto de acople*

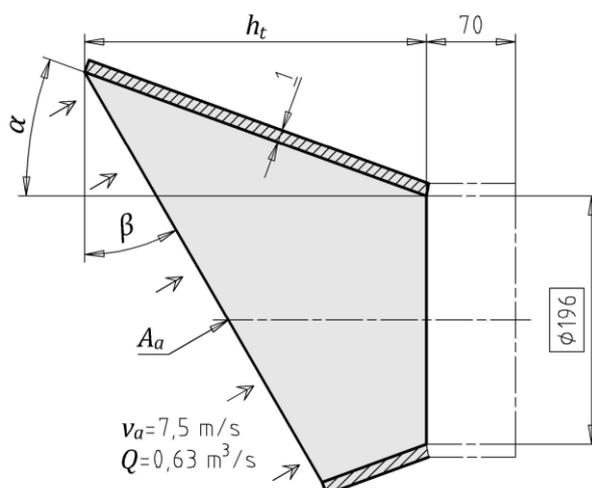


Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Transición de la Apertura.** Este componente tiene la función de capturar los contaminantes y dirigirlos hacia el ducto de acople para su transporte. Está definido por su diámetro interior ( $d = 196 \text{ mm}$ ), altura ( $h_t$ ), área de la apertura ( $A_a$ ) y espesor ( $t = 1 \text{ mm}$ ) como se muestra en la Figura 32, donde  $\alpha$  es el ángulo de apertura,  $\beta$  es el ángulo de generación,  $v_a$  es la velocidad del aire en la apertura y  $Q$  es el caudal de aire.

**Figura 32**

*Transición de la apertura*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Área de la Apertura ( $A_a$ ).** Esta área debe ser capaz de proporcionar una velocidad del aire en la apertura ( $v_a$ ) de 7,5 m/s para un caudal ( $Q$ ) constante de 0,63 m<sup>3</sup>/s como se muestra en la Figura 32. Este caudal está determinado por la Ecuación 3.6.

$$Q = v_a \cdot A_a \quad (3.6)$$

Donde:

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$v_a$  = Velocidad del aire en la apertura, m/s

$A_a$  = Área de la apertura, m<sup>2</sup>

$$0,63 = 7,5 \cdot A_a$$

$$A_a = 0,084 \text{ m}^2$$

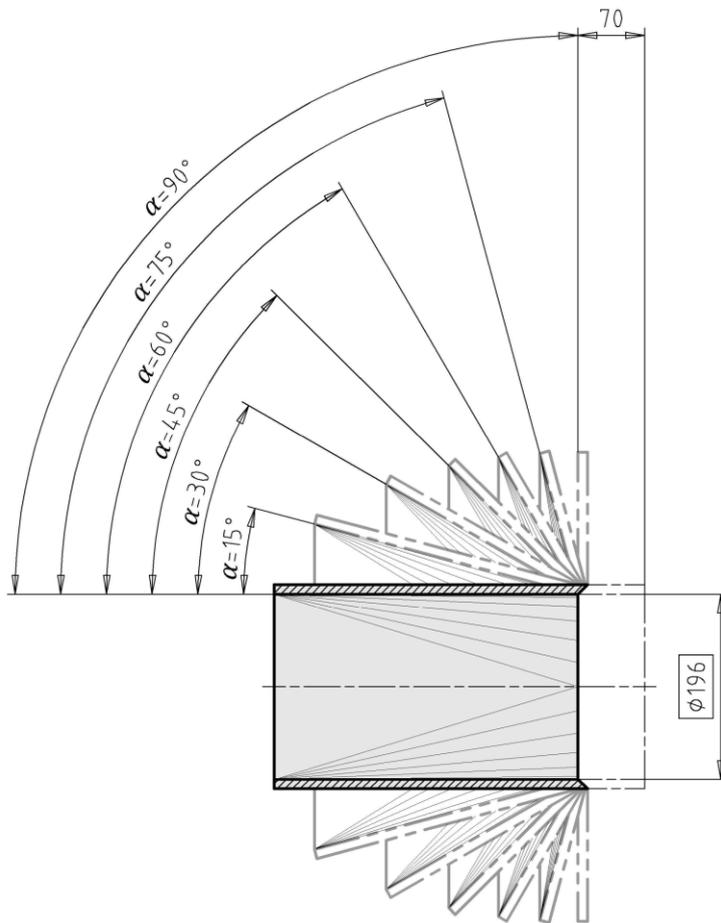
$$A_a = 84000 \text{ mm}^2$$

Este resultado implica que el área de la apertura de la campana de extracción debe ser de 84000 mm<sup>2</sup> independientemente de la forma que tenga la apertura. Esto proporciona flexibilidad en el diseño, ya que se pueden variar los ángulos de apertura y de generación para crear diferentes configuraciones geométricas, siempre y cuando se mantenga constante el área de la apertura. Así, es posible diseñar aperturas de diversas formas que aseguren un caudal constante de aire.

**Ángulo de Apertura ( $\alpha$ ).** Este ángulo, que puede variar desde agudo hasta recto, como se muestra en la Figura 33, tiene la función de aumentar el área de la apertura ( $A_a$ ) al incrementar simultáneamente las dimensiones de la apertura, mientras reduce la altura de la transición ( $h_t$ ) como consecuencia de ese aumento. Un cambio en el ángulo de apertura influirá en la forma del flujo de aire a través de la apertura.

**Figura 33**

*Ángulo de apertura*

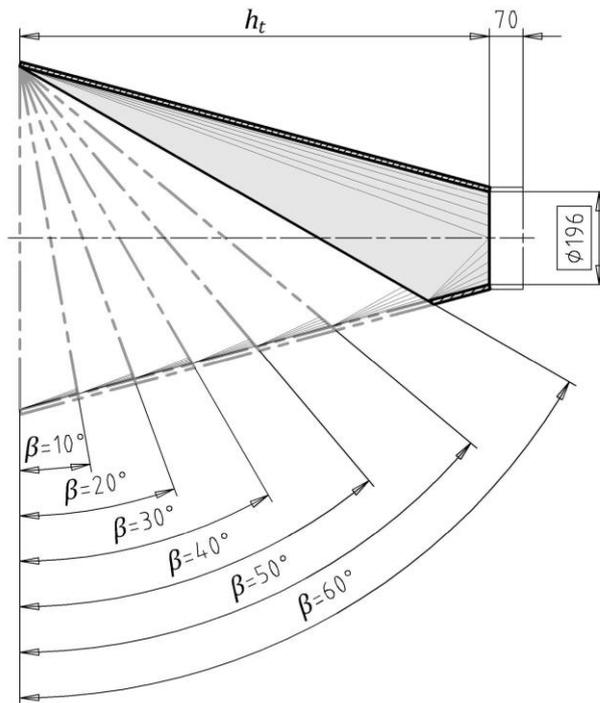


*Nota.* Variación del ángulo de apertura desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ . *Fuente.* Elaboración propia.

**Ángulo de Generación ( $\beta$ ).** Este ángulo agudo, como se muestra en la Figura 34, es responsable de incrementar el área de apertura ( $A_a$ ) mediante un corte oblicuo. Este corte incrementa solo a una dimensión de la apertura, manteniendo constantes tanto el ancho como el ángulo de apertura ( $\alpha$ ) y la altura de la transición ( $h_t$ ). Un cambio en el ángulo de generación influirá en la forma del flujo de aire a través de la apertura.

**Figura 34**

*Ángulo de generación*

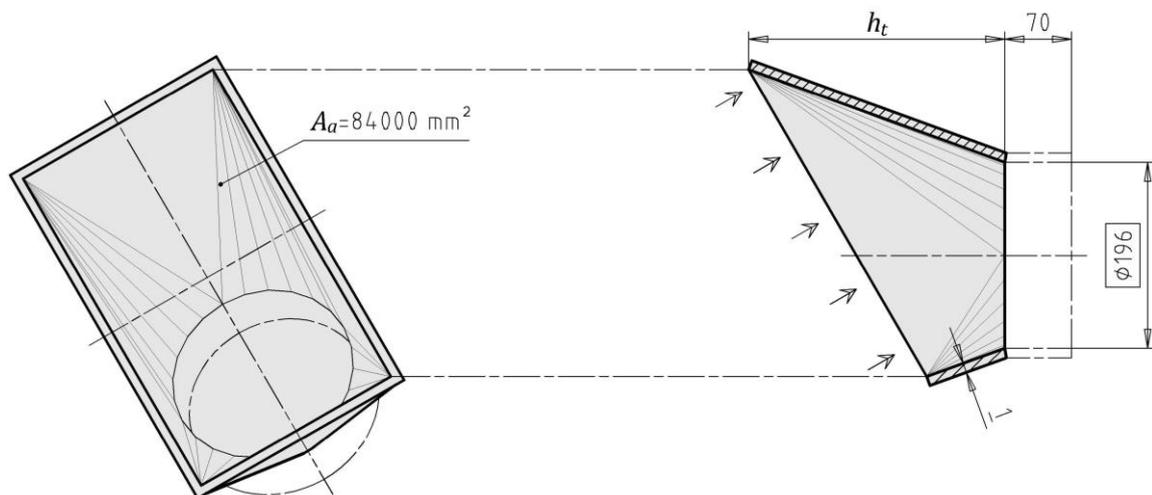


*Nota.* Variación del ángulo de generación desde 0° hasta 60°. *Fuente.* Elaboración propia.

**Forma de la Apertura.** La transición de la apertura puede adoptar diversas formas, siendo las más racionales y fáciles de fabricar las de forma rectangular y la elíptica, como se muestra en la Figura 35 y 36 respectivamente.

**Figura 35**

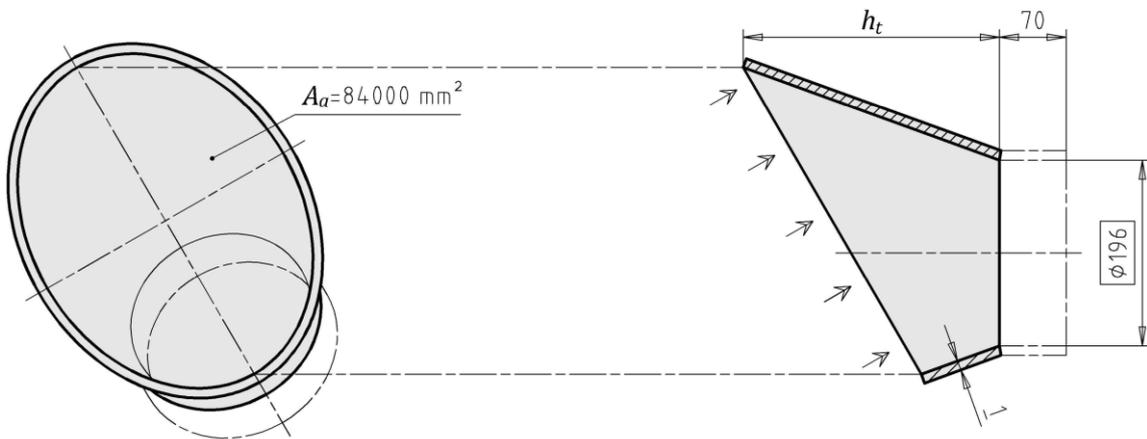
*Apertura rectangular*



*Nota.* *Fuente.* Elaboración propia.

**Figura 36**

*Apertura elíptica*

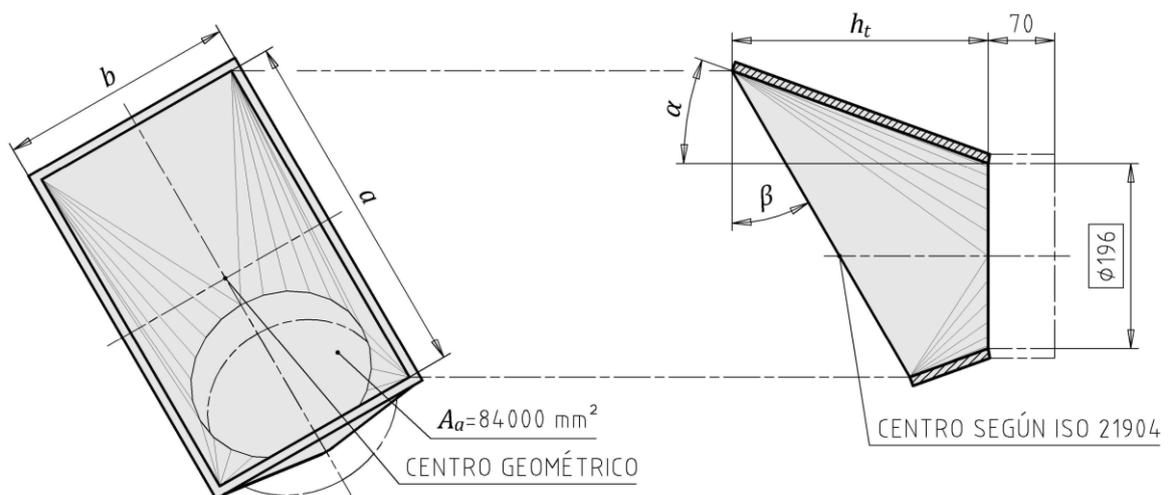


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Apertura Rectangular.** Se genera por la intersección de una transición circular-rectangular con un plano oblicuo. Como se muestra en la Figura 37, tiene un área de apertura ( $A_a$ ) de  $84000 \text{ mm}^2$  y transiciona hacia un ducto con un diámetro interior de  $196 \text{ mm}$ , manteniendo un espesor de  $1 \text{ mm}$ , al igual que el ducto. Esta apertura está definida por su altura de transición ( $h_t$ ) y sus dimensiones de apertura ( $a$  y  $b$ ), las cuales dependen de los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ).

**Figura 37**

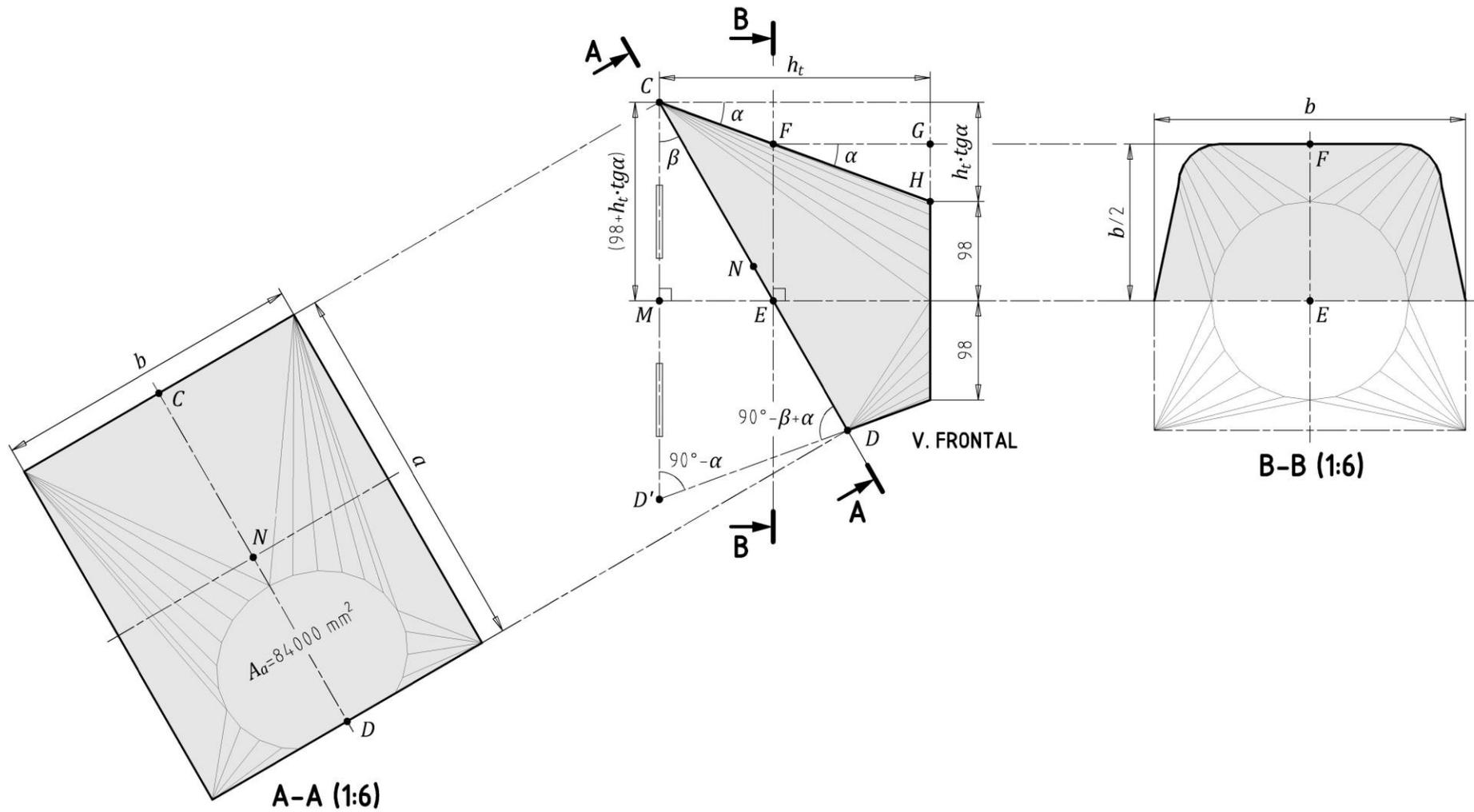
*Definición de la apertura rectangular*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 38**

*Parametrización de la apertura rectangular*



*Nota.* A-A muestra a la apertura rectangular y B-B a un plano perpendicular que pasa por  $\overline{EF}$ . Fuente. Elaboración propia.

**Largo (a).** Se consideran como datos de entrada a los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y se procede a determinar el largo de la apertura rectangular en función de la altura de la transición rectangular ( $h_t$ ), que permita generar un rectángulo con un área de apertura constante ( $A_a = 84000 \text{ mm}^2$ ) como se muestra en la Figura 38, donde  $M$  es punto medio de  $\overline{CD'}$ ,  $N$  es punto medio de  $\overline{CD}$  y  $b$  es el ancho de la apertura rectangular.

En el triángulo  $CDD'$ , se aplica la ley de los senos:

$$\frac{a}{\text{sen}(90 - \alpha)} = \frac{2(98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha)}{\text{sen}(90 - \beta + \alpha)}$$

$$a = 2\text{cosa} \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tg}\alpha) \quad (3.7)$$

Donde:

$a =$  Largo de la apertura rectangular, mm

$\alpha =$  Ángulo de apertura, °

$\beta =$  Ángulo de generación, °

$h_t =$  Altura de la transición rectangular, mm

**Ancho (b).** Se consideran como datos de entrada a los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y se procede a determinar el ancho de la apertura rectangular en función de la altura de la transición rectangular ( $h_t$ ), que permita generar un rectángulo con un área de apertura constante ( $A_a = 84000 \text{ mm}^2$ ) como se muestra en la Figura 38, donde  $M$  es punto medio de  $\overline{CD'}$ ,  $N$  es punto medio de  $\overline{CD}$  y  $b$  es el ancho de la apertura rectangular.

De la recta  $\overline{CM}$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{CM} = 98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha$$

Del triángulo  $ACM$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{EM} = \overline{AM} \cdot \tan\beta$$

$$\overline{EM} = \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)$$

De la altura de la transición, se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{FG} = h_t - \overline{EM}$$

$$\overline{FG} = h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)$$

Del triángulo  $FGH$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{GH} = \overline{FG} \cdot \tan\alpha$$

$$\overline{GH} = \tan\alpha \cdot [h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)]$$

De la recta  $\overline{EF}$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{EF} = \frac{b}{2}$$

$$98 + \overline{GH} = \frac{b}{2}$$

$$98 + \tan\alpha \cdot (h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)) = \frac{b}{2}$$

$$b = 196 + 2\tan\alpha \cdot (h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)) \quad (3.8)$$

Donde:

$b =$  Ancho de la apertura rectangular, mm

$\alpha =$  Ángulo de apertura, °

$h_t =$  Altura de la transición rectangular, mm

$\beta =$  Ángulo de generación, °

**Altura ( $h_t$ ).** Es una consecuencia directa del incremento en el área de la apertura por parte de los ángulos de apertura y de generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Esta altura se forma geoméricamente a partir del diámetro interior del ducto ( $d = 196 \text{ mm}$ ), como se muestra

en la Figura 38. Con los valores obtenidos del largo y ancho ( $a$  y  $b$ ) de la apertura rectangular, se procede a determinar la altura de la transición rectangular ( $h_t$ ).

El área de la apertura ( $A_a$ ) se calcula a partir de las dimensiones de apertura ( $a$  y  $b$ ), como se indica en la Ecuación 3.9.

$$A_a = a \cdot b \quad (3.9)$$

Donde:

$A_a$  = Área de la apertura, mm<sup>2</sup>

$a$  = Largo de la apertura rectangular, mm

$b$  = Ancho de la apertura rectangular, mm

$$84000 = [2\cos\alpha \cdot \sec(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)][196 + 2\tan\alpha \cdot [h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)]]$$

$$h_t = \cot\alpha \cdot \left(10\sqrt{210\cos\beta \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \sec(\alpha + \beta)} - 98\right) \quad (3.10)$$

Donde:

$h_t$  = Altura de la transición rectangular, mm

$\alpha$  = Ángulo de apertura, °

$\beta$  = Ángulo de generación, °

Se usa la Ecuación 3.10 para tabular distintos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para obtener los correspondientes valores de altura de la transición ( $h_t$ ) para cada combinación de ángulos. Estos valores se introducen posteriormente en las Ecuaciones 3.7 y 3.8 para determinar a las dimensiones de la apertura ( $a$  y  $b$ ) en cada una de las variantes consideradas de la apertura. Estos resultados se presentan en la Tabla 11, que ofrece las dimensiones específicas para diferentes configuraciones de apertura rectangular.

**Tabla 11***Tabulación de dimensiones para la apertura rectangular*

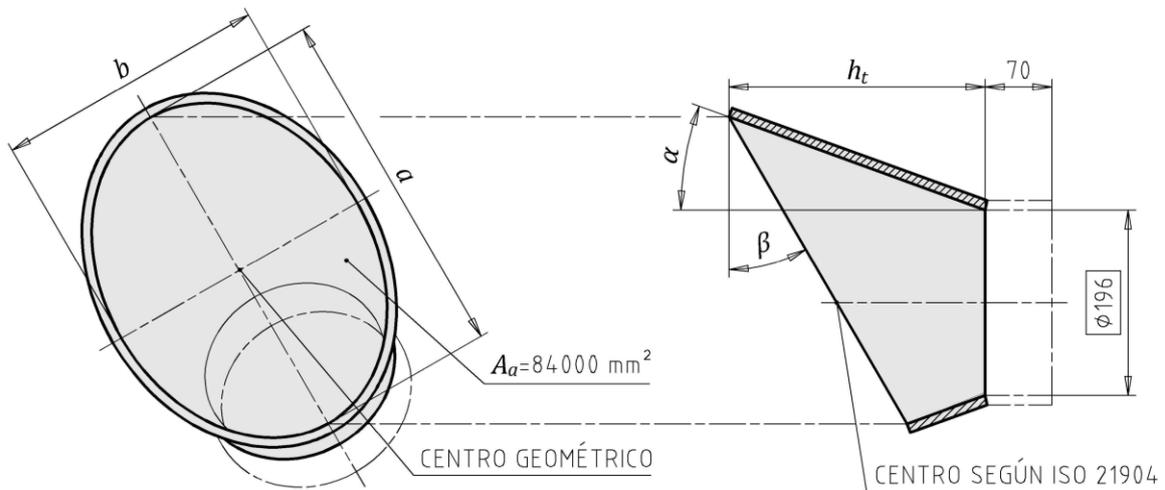
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$
	$h_t = 266.06$	$h_t = 285.56$	$h_t = 293.77$	$h_t = 291.29$	$h_t = 279.14$
$\alpha = 10^\circ$	$a = 289.828$	$a = 292.196$	$a = 299.601$	$a = 313.066$	$a = 334.826$
	$b = 289.828$	$b = 287.478$	$b = 280.373$	$b = 268.314$	$b = 250.877$
	$h_t = 175.08$	$h_t = 196.95$	$h_t = 212.41$	$h_t = 222.50$	$h_t = 229.27$
$\alpha = 15^\circ$	$a = 289.828$	$a = 292.381$	$a = 300.415$	$a = 315.235$	$a = 339.842$
	$b = 289.828$	$b = 287.296$	$b = 279.613$	$b = 266.468$	$b = 247.174$
	$h_t = 128.89$	$h_t = 152.08$	$h_t = 171.72$	$h_t = 189.37$	$h_t = 208.47$
$\alpha = 20^\circ$	$a = 289.828$	$a = 292.658$	$a = 301.642$	$a = 318.553$	$a = 347.756$
	$b = 289.828$	$b = 287.025$	$b = 278.476$	$b = 263.693$	$b = 241.549$

*Nota.* Se emplearon las siguientes ecuaciones:  $h_t = \cot\alpha \cdot (10 \cdot \sqrt{210\cos\beta \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot \sec(\alpha + \beta)} - 98)$ ,  $a = 2\cos\alpha \cdot \sec(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)$ ,  $b = 196 + 2\tan\alpha \cdot (h_t - \tan\beta \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha))$ . Las dimensiones se encuentran en milímetros. *Fuente.* Elaboración propia.

**Apertura Elíptica.** Se genera por la intersección de un cono con un plano oblicuo. Como se muestra en la Figura 39, tiene un área de apertura ( $A_a$ ) de 84000 mm<sup>2</sup> y transiciona hacia un ducto con un diámetro interior de 196 mm, manteniendo un espesor de 1 mm, al igual que el ducto. Esta apertura está definida por su altura de transición ( $h_t$ ) y sus dimensiones de apertura ( $a$  y  $b$ ), las cuales dependen de los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ).

**Figura 39**

*Definición de la transición de apertura elíptica*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Diámetro Mayor ( $a$ ).** Se consideran como datos de entrada a los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y se procede a determinar el diámetro mayor de la apertura elíptica en función de la altura de la transición elíptica ( $h_t$ ), que permita generar una elipse con un área de apertura constante ( $A_a = 84000 \text{ mm}^2$ ) como se muestra en la Figura 40, donde  $M$  es punto medio de  $\overline{CD}$ ,  $N$  es punto medio de  $\overline{CD}$  y  $b$  es el ancho de la apertura elíptica

En el triángulo  $AB'B$ , se aplica la ley de los senos:

$$\frac{a}{\text{sen}(90 - \alpha)} = \frac{2(98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha)}{\text{sen}(90 - \beta + \alpha)}$$

$$a = 2\text{cosa} \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha) \quad (3.11)$$

Donde:

$a$  = Diámetro mayor de la apertura elíptica, mm

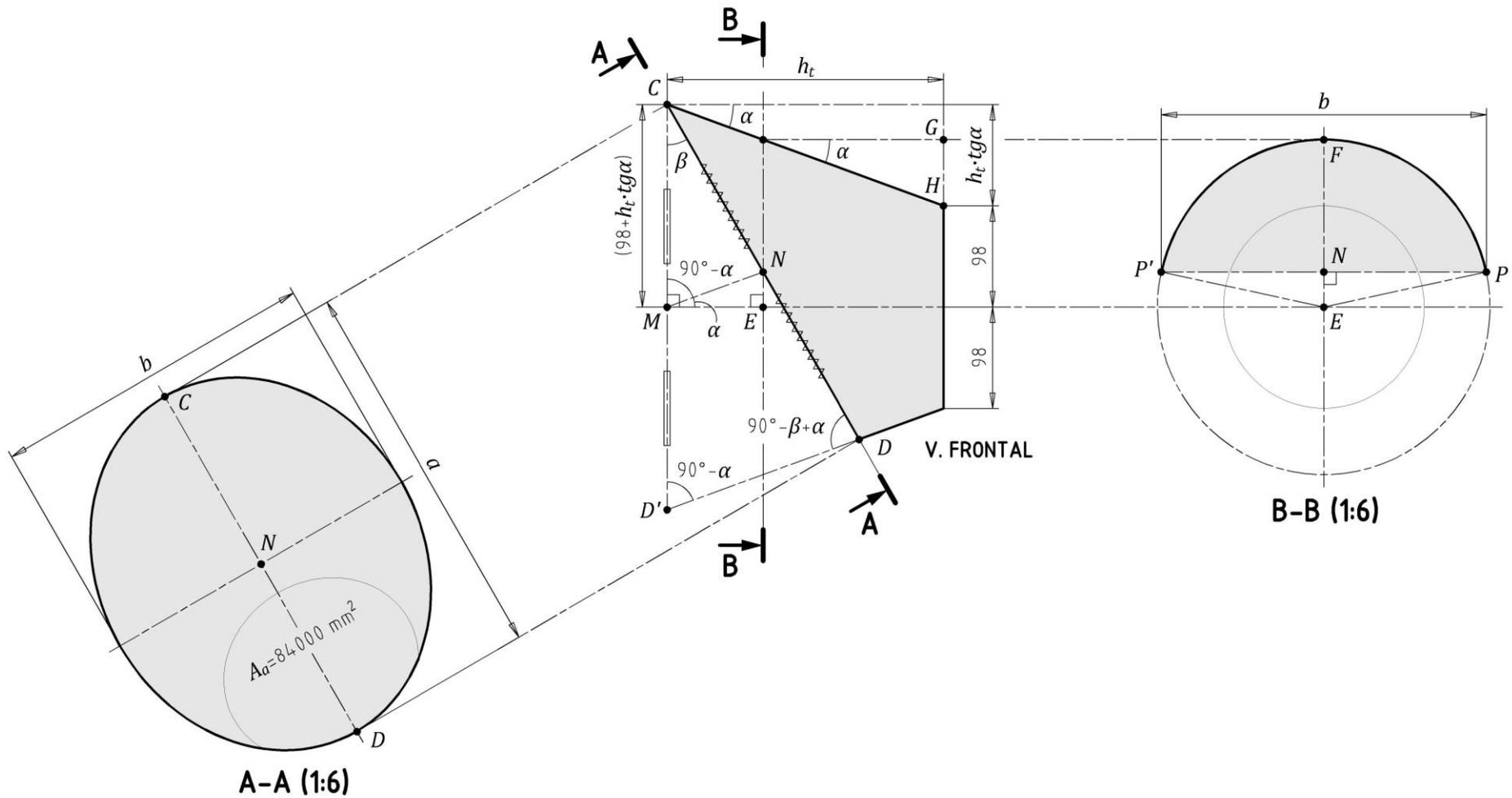
$\alpha$  = Ángulo de apertura, °

$\beta$  = Ángulo de generación, °

$h_t$  = Altura de la transición elíptica, mm

**Figura 40**

*Parametrización de la transición de apertura elíptica*



*Nota.* A-A muestra a la apertura rectangular y B-B a un plano perpendicular que pasa por  $\overline{EF}$ . Fuente. Elaboración propia.

**Diámetro Menor (b).** Se consideran como datos de entrada a los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y se procede a determinar el diámetro menor de la apertura elíptica en función de la altura de la transición elíptica ( $h_t$ ), que permita generar una elipse con un área de apertura constante ( $A_a = 84000 \text{ mm}^2$ ) como se muestra en la Figura 40, donde  $M$  es punto medio de  $\overline{CD'}$ ,  $N$  es punto medio de  $\overline{CD}$  y  $b$  es el ancho de la apertura elíptica.

En el triángulo  $CDD'$ , se aplica la ley de los senos:

$$\frac{\overline{DD'}}{\text{sen}\beta} = \frac{2(98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha)}{\text{sen}(90 - \beta + \alpha)}$$

$$\overline{DD'} = 2\text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha)$$

El triángulo  $CDD'$  es semejante al triángulo  $CMN$  en la razón de 2 a 1:

$$2\overline{MN} = \overline{DD'}$$

$$\overline{MN} = \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha)$$

Del triángulo  $EMN$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{ME} = \overline{MN} \cdot \text{cosa}$$

$$\overline{ME} = \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha) \cdot \text{cosa}$$

Además:

$$\overline{CN} = \overline{MN} \cdot \text{sena}$$

$$\overline{CN} = \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha) \cdot \text{sena}$$

Del largo de la transición, se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{DE} = h_t - \overline{MC}$$

$$\overline{DE} = h_t - \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \text{tana}\alpha) \cdot \text{cosa}$$

Del triángulo  $DEF$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{EF} = \overline{DE} \cdot \tan\alpha$$

$$\overline{EF} = \tan\alpha \cdot [h_t - \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \text{cos}\alpha]$$

De la recta  $\overline{CD}$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{CD} = 98 + \overline{EF}$$

$$\overline{CD} = 98 + \tan\alpha \cdot [h_t - \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \text{cos}\alpha]$$

De la proyección circular, se obtiene la siguiente relación:

$$\overline{CP} = \overline{CD}$$

$$\overline{CP} = 98 + \tan\alpha \cdot [h_t - \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \text{cos}\alpha]$$

En el triángulo  $NCP$ , se aplica el teorema de Pitágoras:

$$\overline{NP}^2 = \overline{CP}^2 - \overline{CN}^2$$

$$\begin{aligned} \overline{NP}^2 &= (98 + \tan\alpha \cdot [h_t - \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \text{cos}\alpha])^2 \\ &\quad - (\text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \text{sen}\alpha)^2 \end{aligned}$$

$$\overline{NP} = (98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \sqrt{1 - 2\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta)}$$

De la proyección B-B, se obtiene la siguiente relación:

$$b = 2 \cdot \overline{NP}$$

$$b = 2(98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \sqrt{1 - 2\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \cdot \text{sec}(\alpha - \beta)} \quad (3.12)$$

Donde:

$b$  = Diámetro menor de la apertura elíptica, mm

$h_t$  = Altura de la transición elíptica, mm

$\alpha$  = Ángulo de apertura, °

$\beta$  = Ángulo de generación, °

**Altura ( $h_t$ ).** Es una consecuencia del incremento de área por parte de los ángulos de apertura y generación ( $\alpha$  y  $\beta$ ), formado geoméricamente a partir del diámetro interior del ducto ( $d = 196 \text{ mm}$ ), como se muestra en la Figura 40. Con los valores obtenidos de los diámetros mayor y menor ( $a$  y  $b$ ) de la apertura elíptica, se procede a determinar la altura de la transición elíptica ( $h_t$ ).

El área de la apertura ( $A_a$ ) se puede obtener a partir de sus dimensiones de apertura ( $a$  y  $b$ ), como se indica en la Ecuación 3.13.

$$A_a = \frac{\pi}{4} \cdot a \cdot b \quad (3.13)$$

Donde:

$A_a =$  Área de la apertura,  $\text{mm}^2$

$a =$  Diámetro mayor de la apertura elíptica, mm

$b =$  Diámetro menor de la apertura elíptica, mm

$$\frac{\pi}{4} \cdot [2\cos\alpha \cdot \sec(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)] [2(98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \sqrt{1 - 2\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \cdot \sec(\alpha - \beta)}] = 84000$$

$$h_t = \cot\alpha \cdot \left(20\sqrt{210 \cdot \sec(\alpha) \cdot \cos(\alpha - \beta)/\pi} \cdot (1 - 2\text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \cdot \sec(\alpha - \beta))^{-0.25} - 98\right) \quad (3.14)$$

Donde:

$h_t =$  Altura de la transición elíptica, mm

$\alpha =$  Ángulo de apertura, °

$\beta =$  Ángulo de generación, °

Se usa la Ecuación 3.14 para tabular distintos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para obtener los valores de las alturas de la transición elíptica ( $h_t$ ). Luego se introducen estos valores en

las Ecuaciones 3.11 y 3.12 para determinar los diámetros mayor y menor de la apertura ( $a$  y  $b$ ) de cada una de las variantes de la apertura elíptica como se indica en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Tabulación de dimensiones de la apertura elíptica*

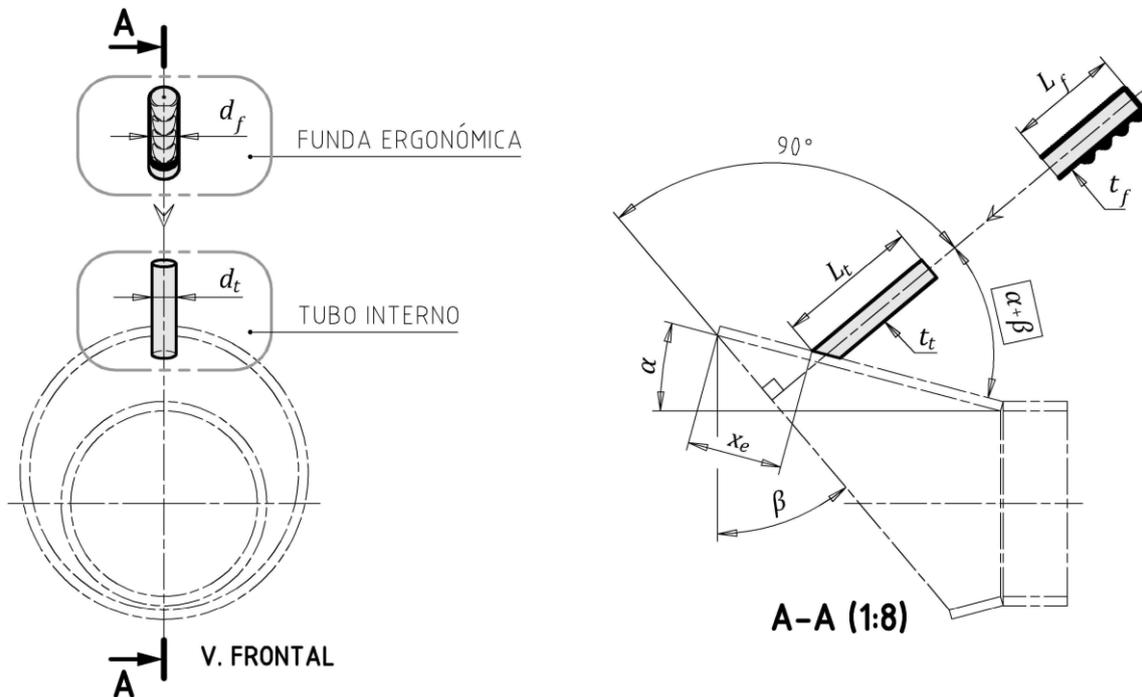
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 40^\circ$
$\alpha = 10^\circ$	$h_t = 371.57$	$h_t = 393.34$	$h_t = 401.85$	$h_t = 397.55$	$h_t = 381.13$
	$a = 327.035$	$a = 329.628$	$a = 337.715$	$a = 352.339$	$a = 375.726$
	$b = 327.035$	$b = 324.463$	$b = 316.694$	$b = 303.549$	$b = 284.655$
$\alpha = 15^\circ$	$h_t = 244.52$	$h_t = 268.83$	$h_t = 285.07$	$h_t = 294.01$	$h_t = 297.01$
	$a = 327.035$	$a = 329.732$	$a = 338.173$	$a = 353.557$	$a = 378.530$
	$b = 327.035$	$b = 324.360$	$b = 316.264$	$b = 302.503$	$b = 282.546$
$\alpha = 20^\circ$	$h_t = 180.01$	$h_t = 205.69$	$h_t = 226.13$	$h_t = 242.43$	$h_t = 256.77$
	$a = 327.035$	$a = 329.888$	$a = 338.863$	$a = 355.413$	$a = 382.912$
	$b = 327.035$	$b = 324.207$	$b = 315.621$	$b = 300.924$	$b = 279.313$

*Nota.* Se emplearon las siguientes ecuaciones:  $h_t = \cot\alpha \cdot \left(20\sqrt{210 \cdot \sec(\alpha) \cdot \cos(\alpha - \beta)/\pi} \cdot (1 - 2\operatorname{sen}\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta \cdot \sec(\alpha - \beta))^{-0.25} - 98\right)$ ,  $a = 2\cos\alpha \cdot \sec(\alpha - \beta) \cdot (98 + h_t \cdot \tan\alpha)$ ,  $b = 2(98 + h_t \cdot \tan\alpha) \cdot \sqrt{1 - 2\operatorname{sen}\alpha \cdot \operatorname{sen}\beta \cdot \sec(\alpha - \beta)}$ . Las dimensiones se encuentran en milímetros. *Fuente.* Elaboración propia.

**Empuñadura.** Este componente se encarga de vincular a la campana de extracción con el brazo del soldador, para que éste pueda manipular la extracción de humos según lo requiera. Se opta por un diseño en el cual la empuñadura es perpendicular a la apertura con un alejamiento desde extremo de  $x_e$  como se muestra en la Figura 39, donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los ángulos de apertura y generación respectivamente. Esta empuñadura se compone de los siguientes elementos:

- Funda ergonómica
- Tubo interno

**Figura 41**  
Empuñadura



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Funda Ergonómica.** Es donde se apoyará la mano del soldador, el cual debe ser de preferencia sintético y resistente a temperaturas de hasta 200°C como se muestra en la Figura 41, está definido por su diámetro exterior ( $d_f$ ) cuya longitud es  $L_f$  y su espesor  $t_f$ .

**Figura 42**  
Funda ergonómica



Nota. Fuente. McMaster-Carr, 2024 (<https://www.mcmaster.com/products/grips/hand-grips~/high-temperature-finger-groove-round-grips/>).

**Diámetro Exterior ( $d_f$ ).** La empuñadura debe ser ergonómica para la mano del soldador. Para esto, debe poseer un diámetro exterior de aproximadamente 30 mm según

lo indicado en la Tabla 13, donde se muestran los diámetros ergonómicos recomendados para diversos modos de asir y materiales de fabricación. Este diámetro es acorde al material metal y al modo de asir axial y transversal sin torsión.

$$d_e \approx 30 \text{ mm}$$

**Tabla 13**

*Diámetros de empuñaduras*

Material	Modo de asir		
	Torsional	Axial	Transversal
Plástico	45 mm	30 mm	30 mm
Madera	45 mm	30 mm	30 mm
Metal	45 mm	30 mm	30 mm

*Nota. Fuente. Ergonomía aplicada a las herramientas (p. 69), por J. Melo, 2010, CPL Ediciones.*

**Espesor ( $t_f$ ).** En la Tabla 14 se muestran los tamaños comerciales de empuñaduras resistentes a altas temperaturas las cuales poseen un espesor de 1/8", con esta información se obtiene que el espesor de la empuñadura.

$$t_f = 1/8''$$

$$t_f = 3,175 \text{ mm}$$

**Tabla 14**

*Diámetros de fundas ergonómicas*

Diámetro del tubo $d_t$ (pulg.)	Longitud $L_e$ (pulg.)	Rango de Temperatura (°C)	Precio (USD)
3/4"	4 13/16"	-40 a 204	\$ 4,80
7/8"	4 5/8"	-40 a 204	\$ 4,80
1"	4 9/16"	-40 a 204	\$ 5,94

*Nota. Fuente. McMaster-Carr, 2024 (<https://www.mcmaster.com/products/grips/hand-grips~/high-temperature-finger-groove-round-grips/>).*

**Tubo Interno.** La empuñadura debe poseer un refuerzo interno que calce con la funda ergonómica como se muestra en la Figura 41, está definido por su diámetro exterior ( $d_t$ ), cuya longitud es  $L_t$  y su espesor  $t_t$ .

**Diámetro Exterior ( $d_t$ ).** La empuñadura posee un diámetro exterior que debe encajar con los diámetros expuestos en la Tabla 14. Se define al diámetro exterior del tubo con la Ecuación 3.15.

$$d_t \approx d_f - 2 \cdot t_f \quad (3.15)$$

Donde:

$d_t$  = Diámetro exterior del tubo, mm

$d_f$  = Diámetro exterior de la funda, mm

$t_f$  = Espesor de la funda, mm

$$d_t \approx 30 - 2 \cdot 3,175$$

$$d_t \approx 23,65 \text{ mm}$$

Se selecciona de la Tabla 14 al diámetro más cercano a este valor:

$$d_t = 1''$$

**Espesor ( $t_t$ ).** Debe ser mayor al espesor usado en la campana de extracción puesto que la empuñadura estará en constante manipulación.

$$t_t = 2 \text{ mm}$$

**Longitud ( $L_t$ ).** El tubo de refuerzo debe tener una longitud adecuada para que el soldador pueda sujetar la campana de extracción firmemente, además esta longitud debe ser mayor que la empuñadura más una demasía que permita realizar un corte al ángulo de

$\alpha + \beta$  como se muestra en la Figura 41. Como recomendación, esta longitud deberá ser de 150 mm.

$$L_t = 150 \text{ mm}$$

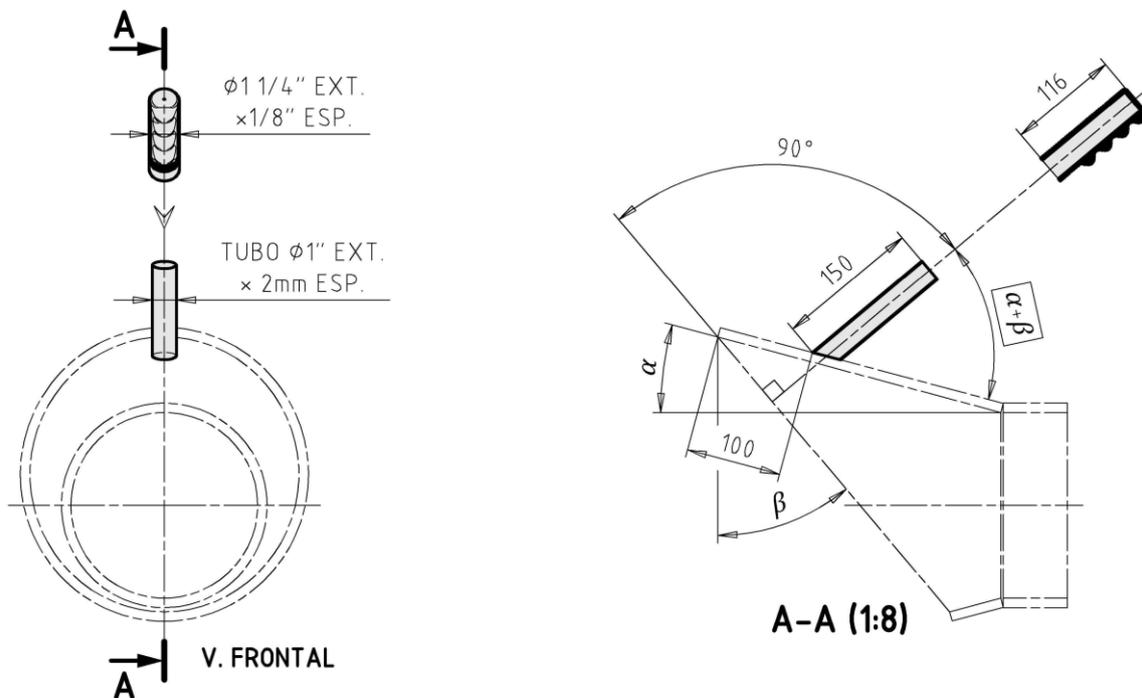
**Alejamiento ( $x_e$ ).** Como se muestra en la Figura 41, La empuñadura debe estar lo más alejada posible de la apertura para no afectar la rigidez de la campana al momento de manipular, pero no debe alejarse más allá de la muñeca del soldador, si se sobrepasa esta dimensión la manipulación será incómoda. El valor adecuado es el siguiente:

$$x_e = 100 \text{ mm}$$

Con los valores obtenidos, se dimensiona a la empuñadura como se muestra en la Figura 43.

**Figura 43**

*Dimensionamiento de la empuñadura*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Análisis.** Se realizará un análisis mediante simulaciones en CFD (Dinámica de fluidos computacional) usando el software *SolidWorks Flow Simulation 2024* para determinar la forma de la campana de extracción con la mayor capacidad de captura mediante el indicador denominado campo de succión. Para esto se definen las etapas de la simulación.

- Preproceso
- Solver (Solucionador)
- Postproceso

**Preproceso.** Se introducen los datos de entrada al programa en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Geometría
- Volumen de control
- Materiales
- Malla
- Variables iniciales

**Geometría.** Con los valores obtenidos en las Tablas 11 y 12 se dimensionan preliminarmente a todas las transiciones de apertura rectangular y elíptica que serán evaluadas como se indica en las Tablas 15 y 16, donde se muestran en milímetros a las dimensiones de las transiciones y aperturas de cada campana de extracción, las cuales poseen un diámetro interior del ducto constante e igual a 196 mm,  $\alpha$  es el ángulo de apertura,  $\beta$  es el ángulo de generación y  $A_\alpha$  es el área de la apertura, el cual es invariable e igual a 84000 mm<sup>2</sup>.

**Tabla 15**

*Geometría de las transiciones de apertura rectangular*

	$\beta=0^\circ$	$\beta=10^\circ$	$\beta=20^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=40^\circ$
$\alpha=10^\circ$	<p>289,8 266,1 289,8 289,8 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>287,5 285,6 292,2 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>280,4 293,8 296,9 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>268,3 291,3 313,1 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>250,9 279,1 334,8 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>
$\alpha=15^\circ$	<p>289,8 175,1 289,8 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>287,3 196,9 292,4 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>279,6 212,4 300,4 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>266,5 222,5 315,2 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>247,2 229,3 339,8 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>
$\alpha=20^\circ$	<p>289,8 128,9 289,8 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>287,0 152,1 292,7 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>278,5 171,7 301,6 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>263,7 189,4 318,6 <math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math> <math>\phi 196</math></p>	<p>208,5 <math>\phi 196</math> INTERFERENCIA VARIANTE NO POSIBLE</p>

Nota. Dimensiones en milímetros. Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 16**

*Geometría de las transiciones de apertura elíptica*

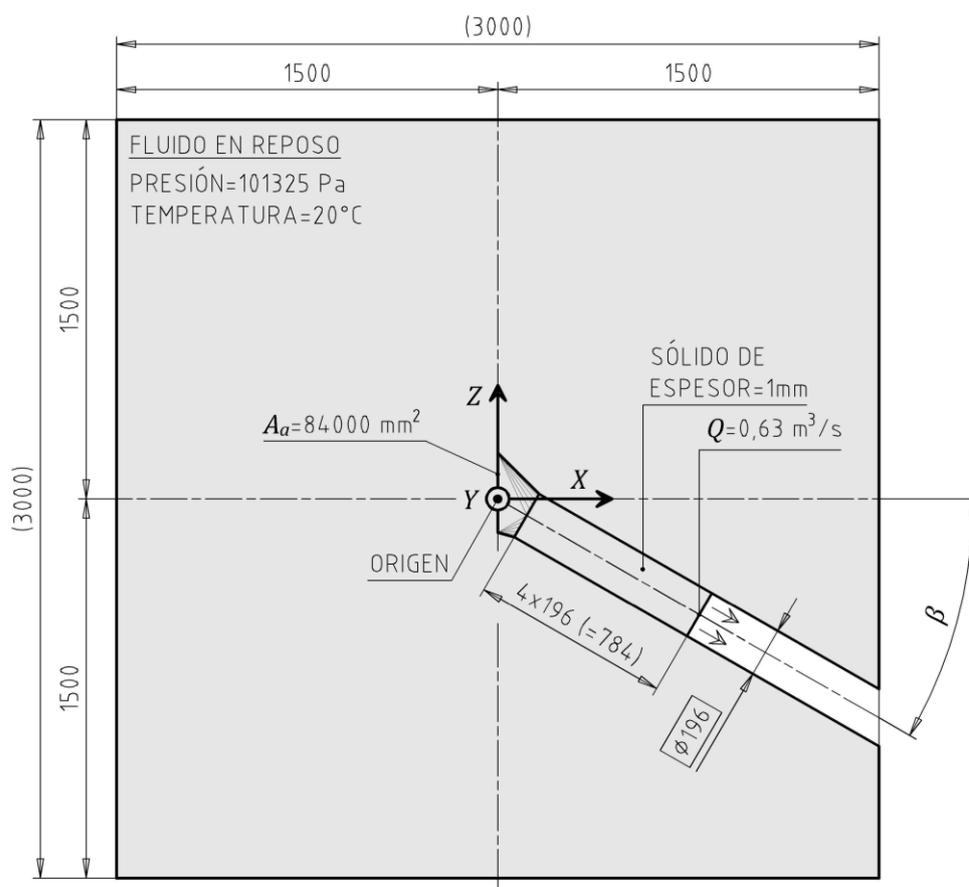
	$\beta=0^\circ$	$\beta=10^\circ$	$\beta=20^\circ$	$\beta=30^\circ$	$\beta=40^\circ$
$\alpha=10^\circ$	<p><math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math></p>				
$\alpha=15^\circ$	<p><math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math></p>				
$\alpha=20^\circ$	<p><math>A_a=84000 \text{ mm}^2</math></p>				

Nota. Dimensiones en milímetros. Fuente. Elaboración propia.

**Volumen de Control.** Este volumen será generado desde el centro de la apertura hacia 1,5 m (1500 mm) en los tres ejes coordenados, formando un encajonamiento del fluido de  $27 \text{ m}^3$  como se muestra en la Figura 44, donde  $X, Y$  y  $Z$  son los ejes de referencia,  $A_a$  es el área de la apertura y  $\beta$  es el ángulo de generación. Se extendió el ducto de acople a 4 veces su diámetro interior (784 mm) para evitar futuras distorsiones en el flujo.

**Figura 44**

*Preproceso de la campana de extracción*



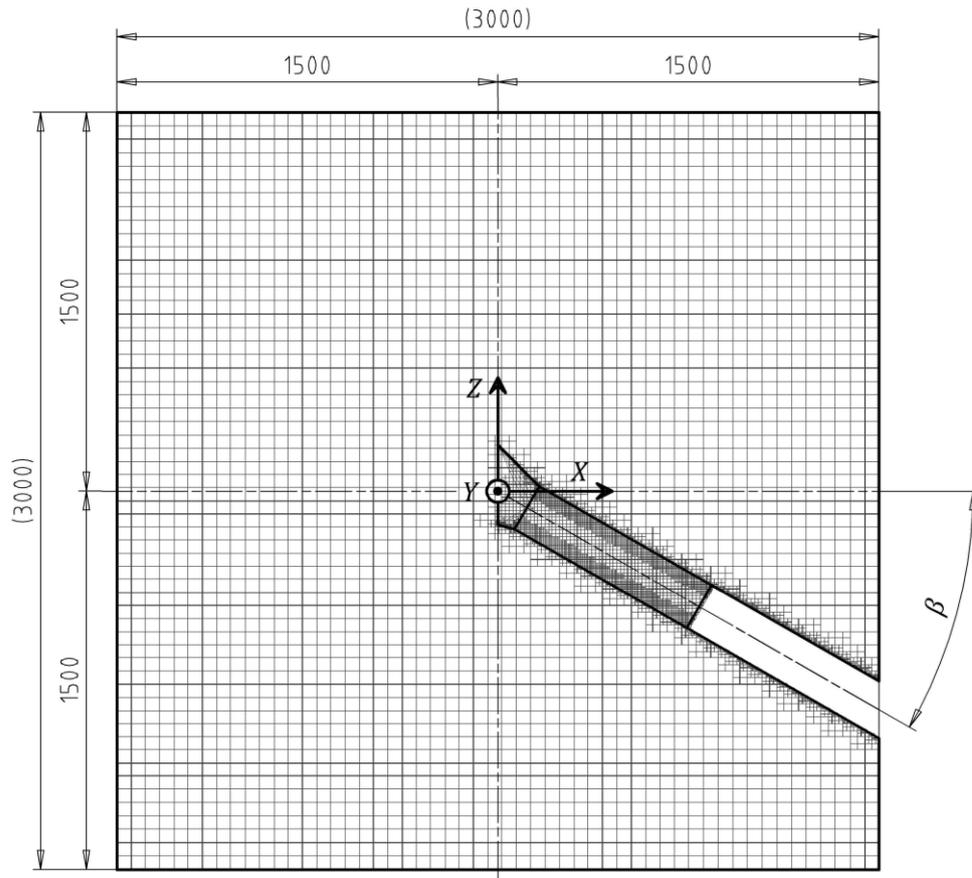
*Nota.* Dimensiones en milímetros. *Fuente.* Elaboración propia.

**Materiales.** El material del sólido será aluminio 1050 y el material del fluido será aire con una densidad de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

**Malla.** Se divide la geometría del volumen de control en volúmenes finitos como se muestra en la Figura 45. El mallado se refina en las zonas de contacto entre el sólido y el fluido para mejorar la precisión.

**Figura 45**

*Mallado de la campana de extracción y del fluido*



*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**Variables iniciales.** Las simulaciones se realizarán dentro de una atmósfera de aire en reposo con 101325 Pa de presión y 293.2 K (20°C) de temperatura. La variable de ingreso del flujo es un caudal de aire constante de 0,63 m<sup>3</sup>/s aplicado en una sección interior del ducto de acople como se muestra en la Figura 44. No posee una variable de salida de flujo puesto que se espera evaluar la respuesta del volumen de control a la variable de ingreso. Debido a la baja densidad del fluido y las dimensiones de la simulación no se tendrán en cuenta los efectos gravitatorios.

**Solver (Solucionador).** Se introducen los datos que se esperan obtener en el software en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Variable objetivo
- Tipo de ejecución

**Variable Objetivo.** Se espera evaluar el valor del área del campo de succión de cada campana de extracción para determinar a la variante con mayor capacidad de captura. Se utiliza un plano de corte paralelo a YZ, alejado del origen una distancia de 1,5 veces el diámetro interior del ducto (294 mm) como se indica en las Tablas 17 y 18.

**Tipo de Ejecución.** Las simulaciones serán del tipo fluidodinámica transitoria (incluye los efectos del tiempo) con una duración de 10 segundos físicos fraccionados en 1000 iteraciones de 0,01 segundo físico de duración cada una. Es conveniente aclarar que el tiempo físico es el tiempo que ocurre dentro de la simulación, el cual difiere del tiempo que transcurre en nuestra realidad (tiempo computacional) el cual está relacionado con la velocidad de procesamiento del computador y puede tardar de 1 a 2 horas por simulación aproximadamente.

**Postproceso.** Se establecen los formatos gráficos que gestionen la amplia información generada en cada simulación y permitan presentar los resultados en gráficas y valores que comuniquen con eficacia los resultados obtenidos. El procedimiento es el siguiente:

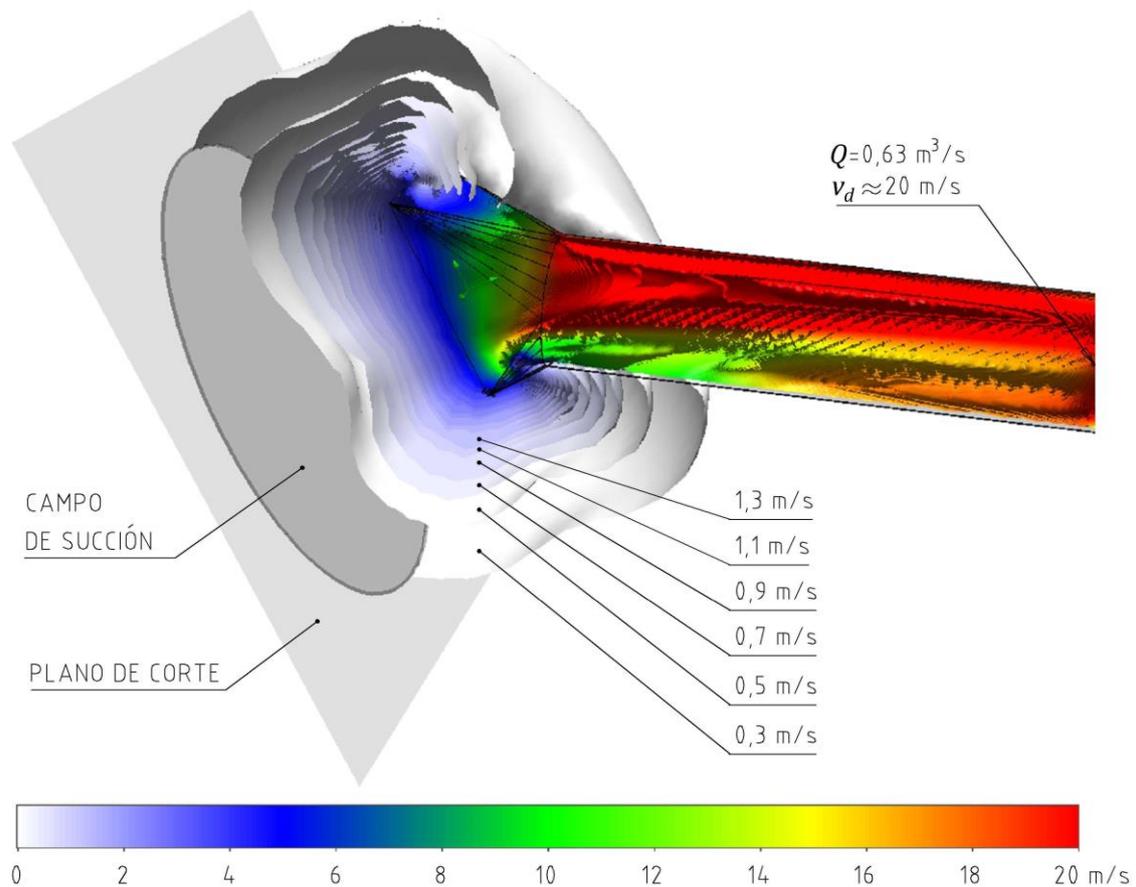
- Se trazarán perfiles de velocidad del aire con iso-superficies (superficies de igual valor numérico) usando un rango de colores que van desde el blanco hacia el azul para velocidades cercanas a 0 m/s y del azul hacia el rojo para las velocidades restantes que se extienden hasta 20 m/s como se muestra en la Figura 40, donde  $Q$  es el caudal de aire y  $v_d$  es la velocidad de aire en el ducto. Esto se hace con el

fin de no saturar la figura en un fondo oscuro y poder apreciar con detalle la variación entre las pequeñas velocidades que son de mayor interés en este tipo de simulaciones.

- Se intersecará las iso-superficies del perfil de velocidad del aire de 0,3 m/s con planos de corte relativos al campo de succión de cada campana para generar una región cerrada como se muestra en la Figura 48.
- Se calculará el área en mm<sup>2</sup> de cada región cerrada del campo de succión y los resultados serán presentados en las Tabla 18 y 19, donde  $A_c$  es el área del campo de succión de succión.

**Figura 46**

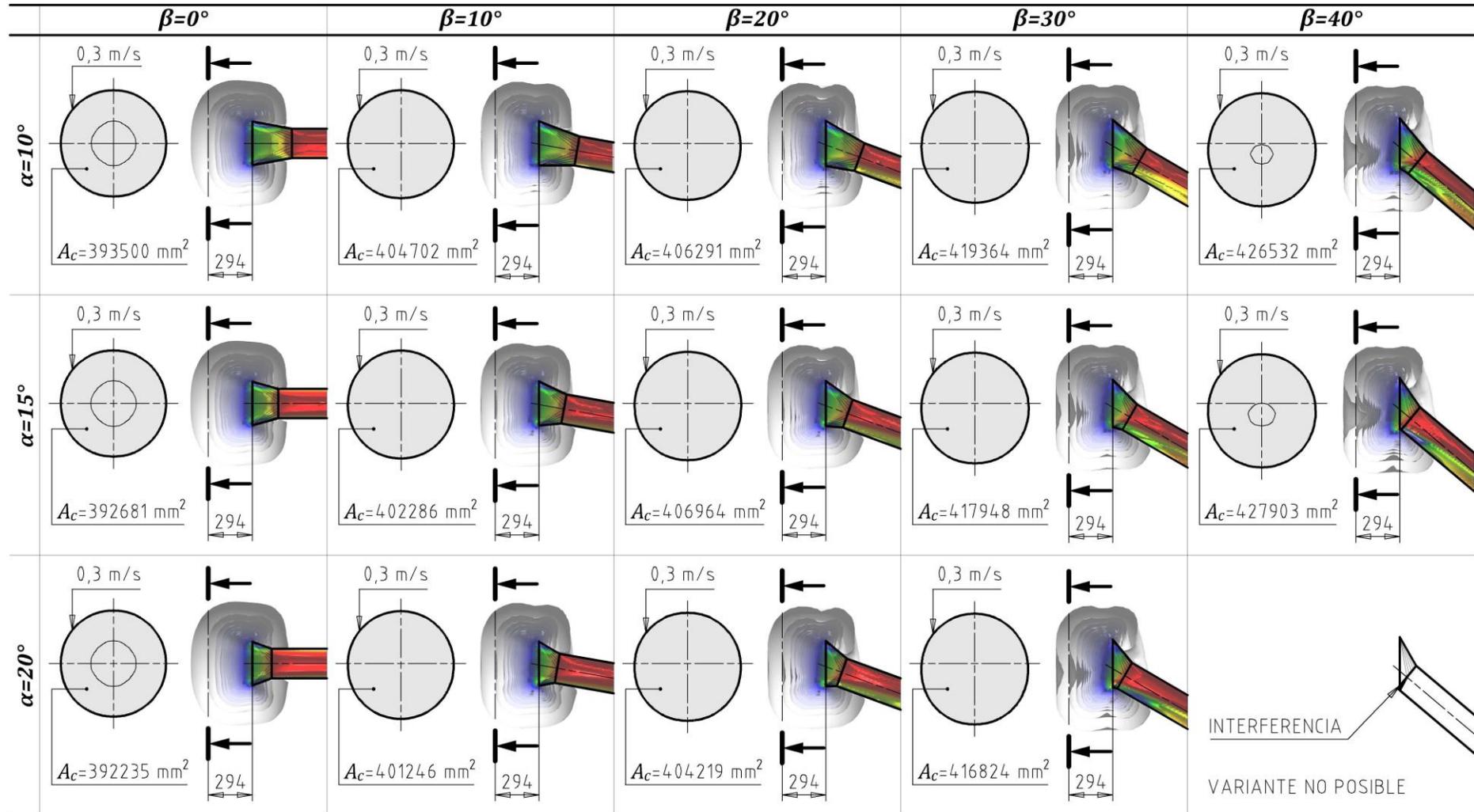
*Postproceso de la campana de extracción*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Tabla 17**

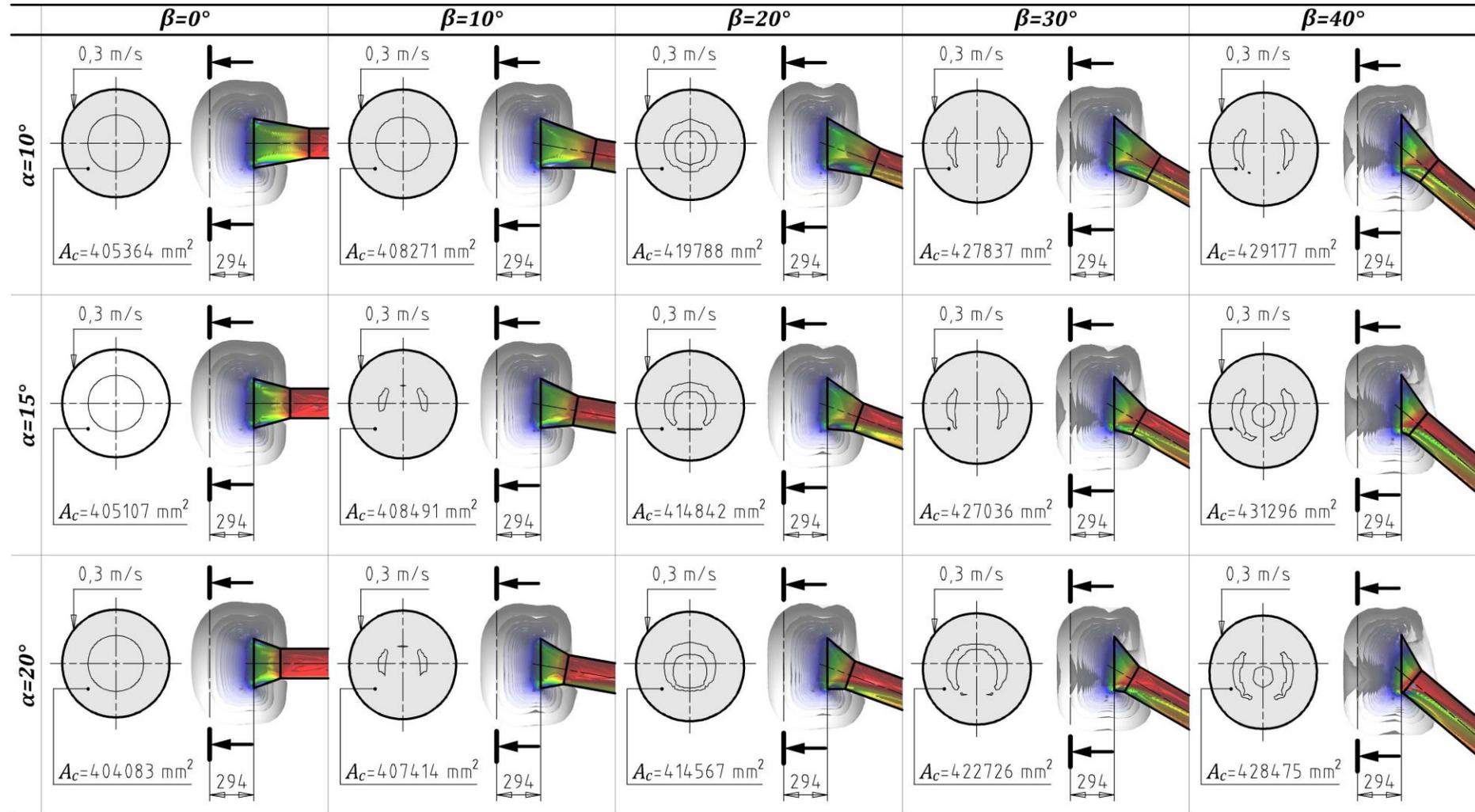
*Simulación de las transiciones de apertura rectangular*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 18**

*Simulación de las transiciones de apertura elíptica*



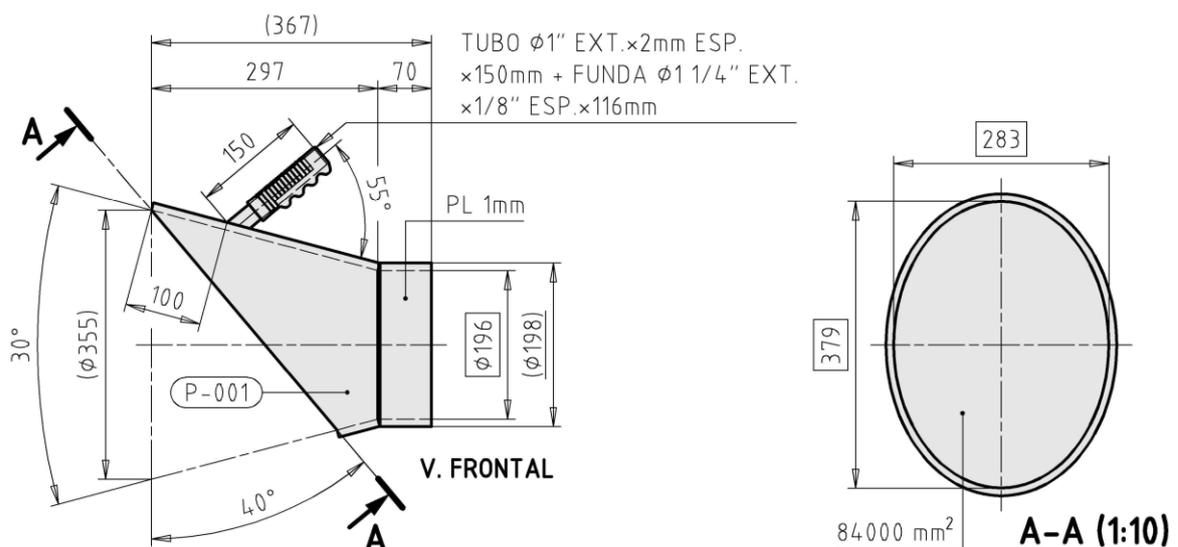
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se comparan los resultados de las 29 áreas del campo de succión ( $A_c$ ) presentadas en las Tablas 17 y 18. Tras analizar los datos, se determina que la campana de extracción con mayor capacidad de captura es la variante que presenta una apertura elíptica. Esta variante tiene un ángulo de apertura ( $\alpha$ ) de  $15^\circ$  y un ángulo de generación ( $\beta$ ) de  $40^\circ$ , lo que optimiza la eficiencia en la recolección de aire, maximizando su desempeño en términos de flujo y capacidad de succión.

**Dimensionamiento.** Se realiza el dimensionamiento de la campana de extracción diseñada, como se muestra en la Figura 47. Además, se traza la plantilla P-001 para la transición de la apertura elíptica generada a partir de un cono truncado, presentada en la Figura 48. También se incluye un modelo tridimensional del diseño en la Figura 49. El material utilizado para la campana es aluminio 1050, mientras que la funda de la empuñadura está fabricada en silicona de alta temperatura, reforzada con un tubo interno de aluminio que asegura su integridad.

**Figura 47**

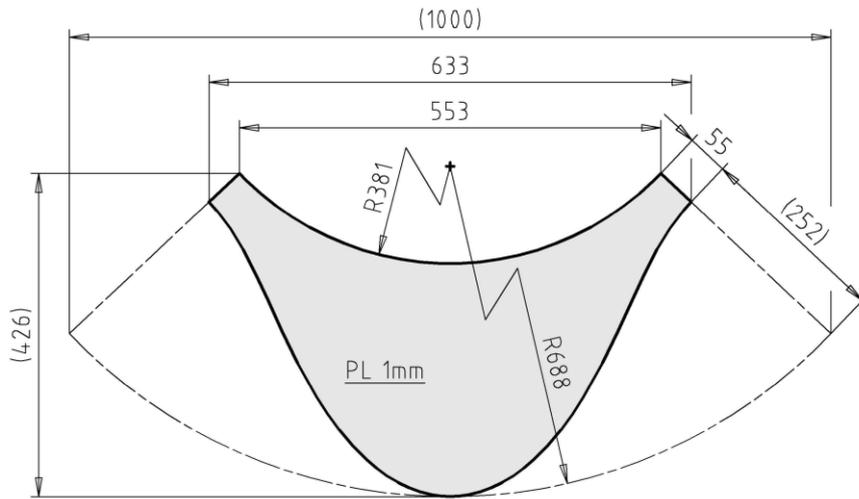
*Dimensionamiento de la campana de extracción*



*Nota.* Por razones ilustrativas el espesor no está a escala. *Fuente.* Elaboración propia.

**Figura 48**

*Desarrollo de la transición*

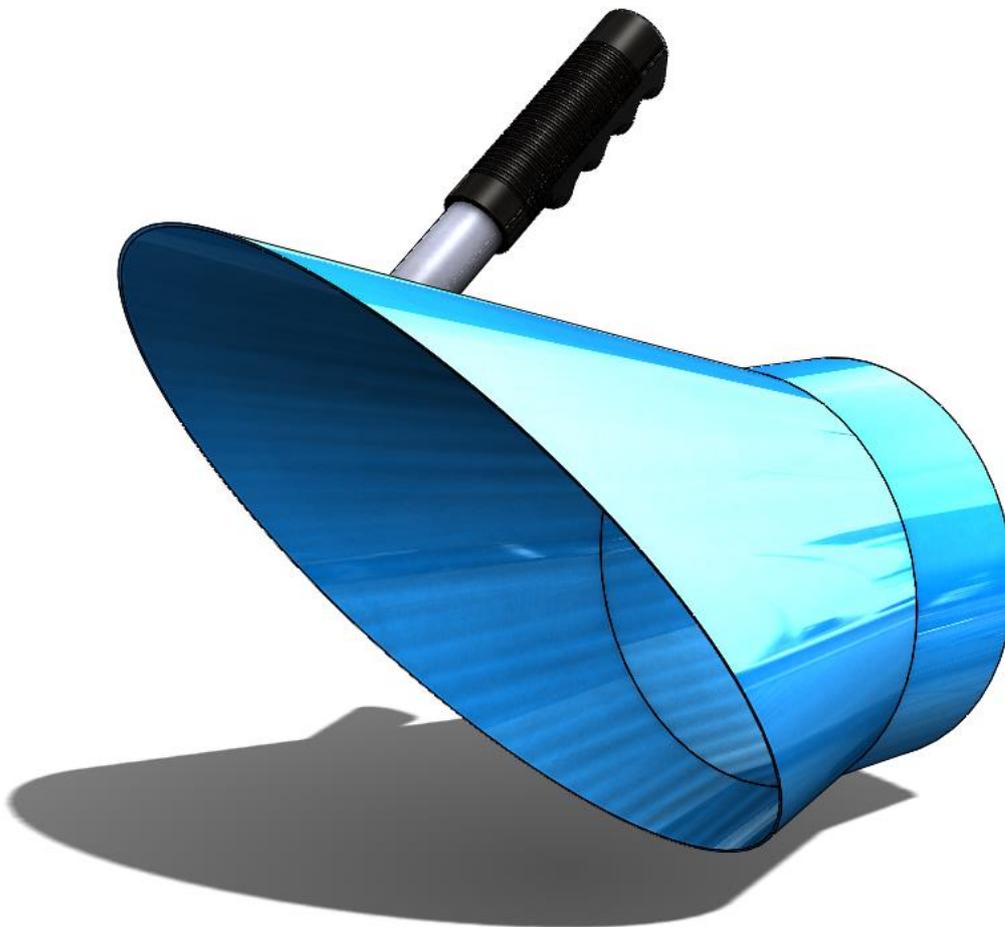


(P-001) CONO  $\phi 355$  INT, A  $\phi 196$  INT, H=297mm

*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 49**

*Modelo tridimensional de la campana de extracción*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

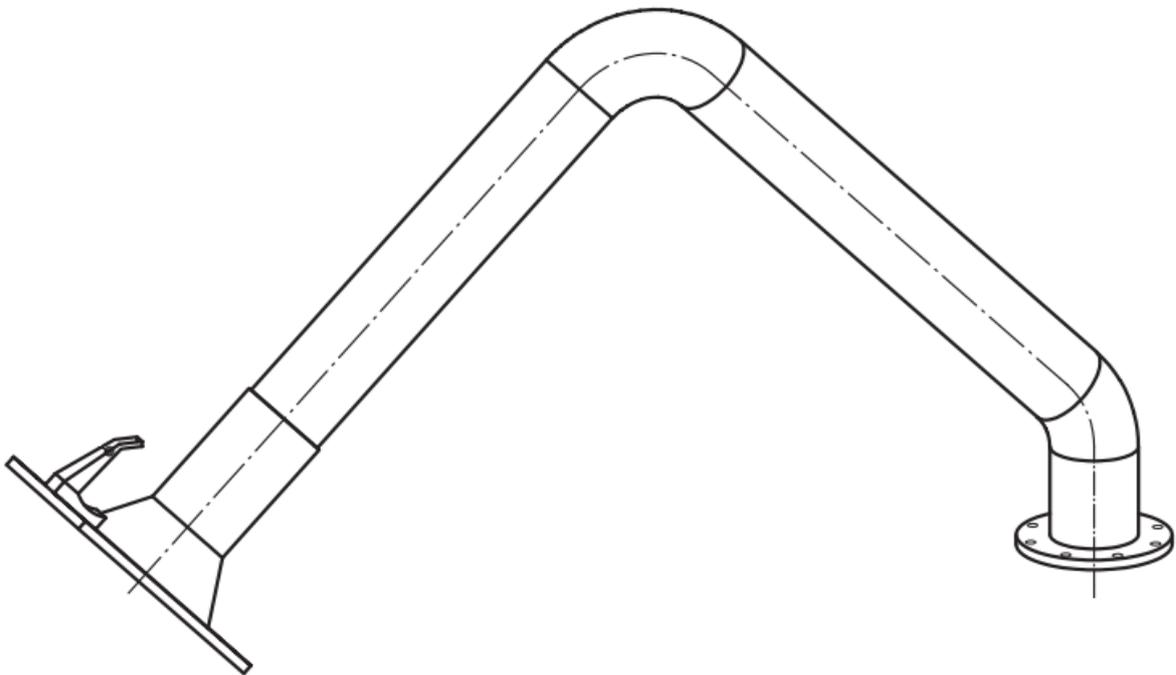
### 3.1.2. Diseño del Brazo Articulado

**Especificaciones de Desempeño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran que debe hacer el brazo articulado.

**Diagrama Cinemático.** En la Figura 50 se muestra a la configuración del brazo articulado según la norma ISO 21904-1:2020, para comprender el funcionamiento del mecanismo de esta configuración, es necesario representarlo mediante un diagrama cinemático simple que facilite la visualización de su estructura y los movimientos entre sus componentes. Este diagrama, presentado en la Figura 51, muestra los eslabones y juntas que conforman el mecanismo, donde 1 es la base giratoria, 2 es el ducto primario, 3 es el ducto secundario y 4 es la campana de extracción. Las juntas, que permiten el movimiento relativo entre los eslabones, están representadas por las letras  $O_2$ , A y B.

#### Figura 50

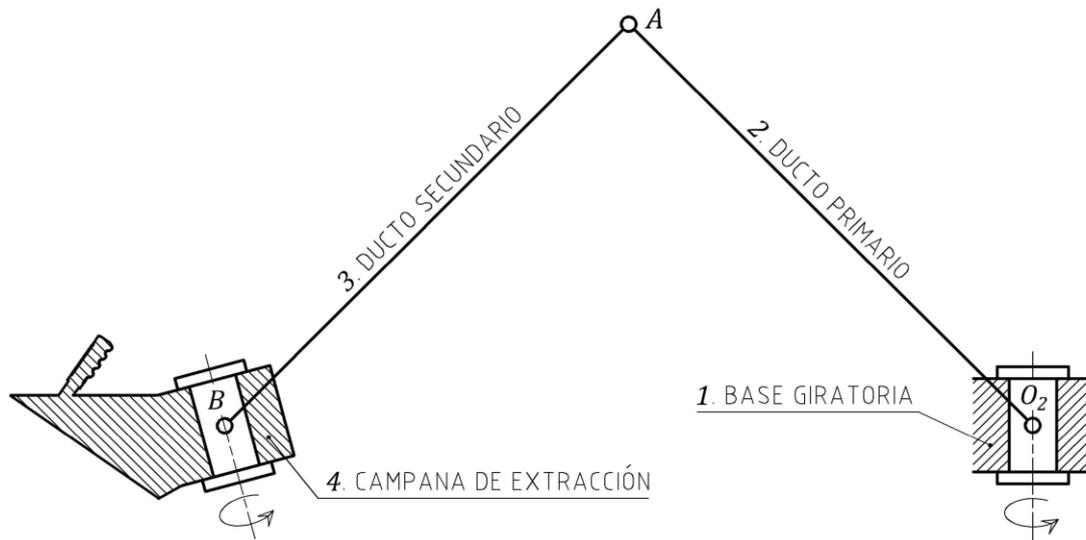
*Configuración del brazo articulado*



*Nota. Fuente. ISO 21904-1:2020, por Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020.*

**Figura 51**

Diagrama cinemático del brazo articulado



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Movilidad (M).** La movilidad de un mecanismo se define como el número de grados de libertad necesarios para determinar su posición en el espacio (Norton, 2020). Para su cálculo, se utiliza la ecuación de movilidad de Kutzbach, que se aplica a eslabonamientos espaciales (Ecuación 3.16):

$$M = 6 \cdot (L - 1) - 5 \cdot J_1 - 4 \cdot J_2 - 3 \cdot J_3 - 2 \cdot J_4 - J_5 \quad (3.16)$$

Donde:

$L$  = Número de eslabones

$J_n$  = Número de juntas de  $n$  grados de libertad

Como se muestra en la Figura 51, se trata de un mecanismo de cuatro eslabones (1, 2, 3 y 4), una junta de 1 grado de libertad (A) y dos juntas de 2 grados de libertad ( $O_2$  y B), las cuales se reemplazan en la Ecuación 3.16:

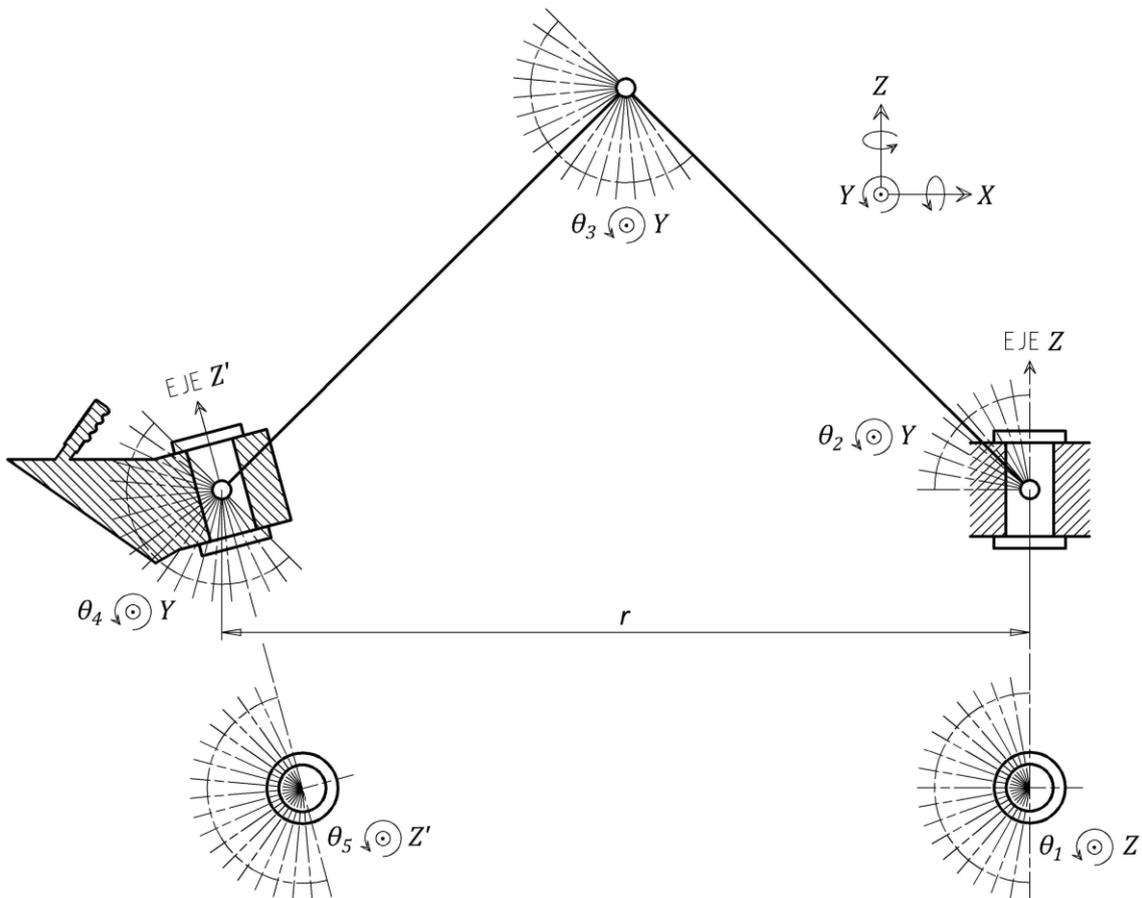
$$M = 6 \cdot (4 - 1) - 5 \cdot 1 - 4 \cdot 2 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 0$$

$$M = 5 \text{ GDL}$$

**Rangos de Movimiento.** Se establecen los rangos de movimiento para los 5 grados de libertad, representados por las variables de rotación  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  y  $\theta_5$ , como se muestra en la Figura 52. En esta representación,  $\theta_1$  y  $\theta_5$  están en planos perpendiculares al diagrama. Además,  $r$  representa el desplazamiento horizontal, el cual no constituye un grado de libertad como tal, sino que es una consecuencia de la operación normal del brazo articulado.

**Figura 52**

*Rangos de movimiento del brazo articulado*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

En la Tabla 19 se detallan estos rangos de movimiento y sus valores, los cuales serán establecidos posteriormente. Estos rangos son fundamentales para definir la capacidad de desplazamiento y las funciones del brazo articulado.

**Tabla 19***Rangos de movimiento del brazo articulado*

Rango de movimiento	Simbología	Valor
Rotación en el eje Z del ducto primario respecto al soporte	$\theta_1$	0 a 180°
Rotación en el eje Y del ducto primario respecto al soporte	$\theta_2$	0 a 90°
Rotación en el eje Y del ducto secundario respecto al primario	$\theta_3$	0 a 180°
Rotación en el Eje Y de la campana de extracción respecto al ducto secundario	$\theta_4$	0 a 180°
Rotación en el Eje Z' de la campana de extracción respecto al ducto secundario	$\theta_5$	0 a 180°

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**Rotación  $\theta_1$ .** El brazo articulado guiará a la campana de extracción por encima de la superficie de una mesa de trabajo que se encuentra en frente de éste, no a su espalda, como se mostró en la Figura 20. Por tal motivo solo se requiere de una rotación en el eje Z con un rango de 180° como se muestra en la Figura 43.

$$0 \leq \theta_1 \leq 180^\circ$$

**Rotación  $\theta_2$ .** Rotar el ducto primario en el eje Y más allá de los 90° sería un retroceso innecesario del brazo y rotarlo hacia una posición por debajo del nivel horizontal sería un movimiento del que ya es responsable el ducto secundario, como se muestra en la Figura 52. Por tales motivos solo se requiere de un rango de 90°

$$0^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ$$

**Rotación  $\theta_3$ .** Rotar el ducto secundario en el eje Y más allá de los 180° sería un retroceso innecesario del brazo secundario como se muestra en la Figura 52. y rotarlo más allá de los 0° no sería posible por razones geométricas como la interrupción entre elementos de la articulación. Por tales motivos, el rango requerido es el siguiente.

$$0^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ$$

**Rotación  $\theta_4$ .** La campana de extracción podrá rotar en un rango de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  tal como se muestra en la Figura 52. Esto es para garantizar que el soldador pueda guiar la campana con facilidad y apuntar hacia adelante en dirección a la fuente de emisión.

$$0^\circ \leq \theta_4 \leq 180^\circ$$

**Rotación  $\theta_5$ .** Se trata de una rotación opcional, pero que se incluirá en este brazo articulado para garantizar que el soldador pueda maniobrar la campana con más facilidad y evitar el esfuerzo de mover todo el brazo para alcanzar otras fuentes de emisión cercanas, como se muestra en la Figura 52.

$$0^\circ \leq \theta_5 \leq 180^\circ$$

**Desplazamiento Horizontal ( $r$ ).** El brazo articulado será guiado manualmente por el soldador dentro de un espacio tridimensional expresado en coordenadas cilíndricas. El radio de este espacio tiene un desplazamiento máximo que se determina a partir de la construcción geométrica mostrada en la Figura 53. Esta construcción fue diseñada con las dimensiones estándar de una mesa de trabajo para un soldador (1200x2400 mm), considerando también un alejamiento de la máquina de 500 mm y una campana de extracción con un alcance incluido de 400 mm. Este desplazamiento horizontal del brazo articulado deberá ser regulado manualmente dentro del siguiente intervalo:

$$0 \leq r \leq 2738 \text{ mm}$$

**Estabilidad.** Según la norma ISO 21904-1:2020, el soldador deberá poder mover el brazo articulado en cualquier dirección usando una fuerza que no exceda los 60N en la empuñadura de la campana de extracción en una posición específica definida por los tres puntos siguientes:

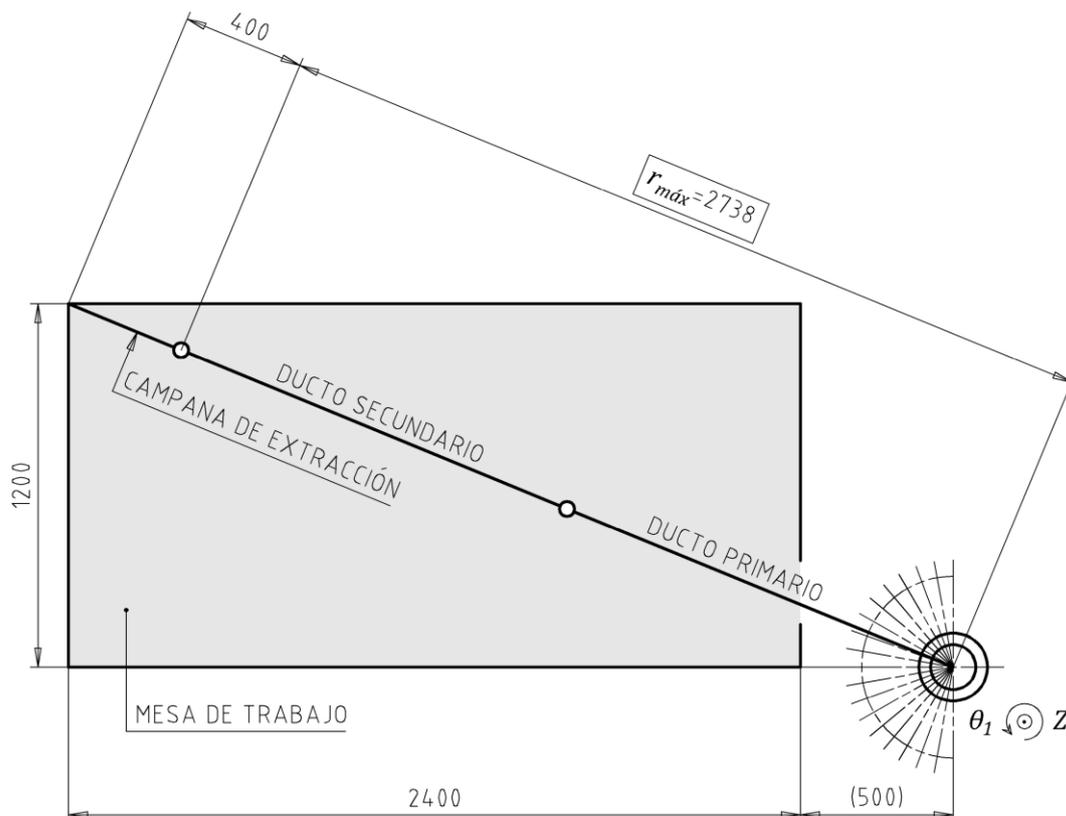
- Con el brazo al 70% de su alcance máximo
- En un punto a 1300mm + 100mm sobre el nivel del suelo

- En los ejes X, Y y Z en un rango que es el 10% del rango máximo

El brazo deberá mantener su posición en todo el rango operativo después de que se haya eliminado la fuerza (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020).

**Figura 53**

*Desplazamiento horizontal*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Especificaciones de Diseño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran cómo debe ser el brazo articulado.

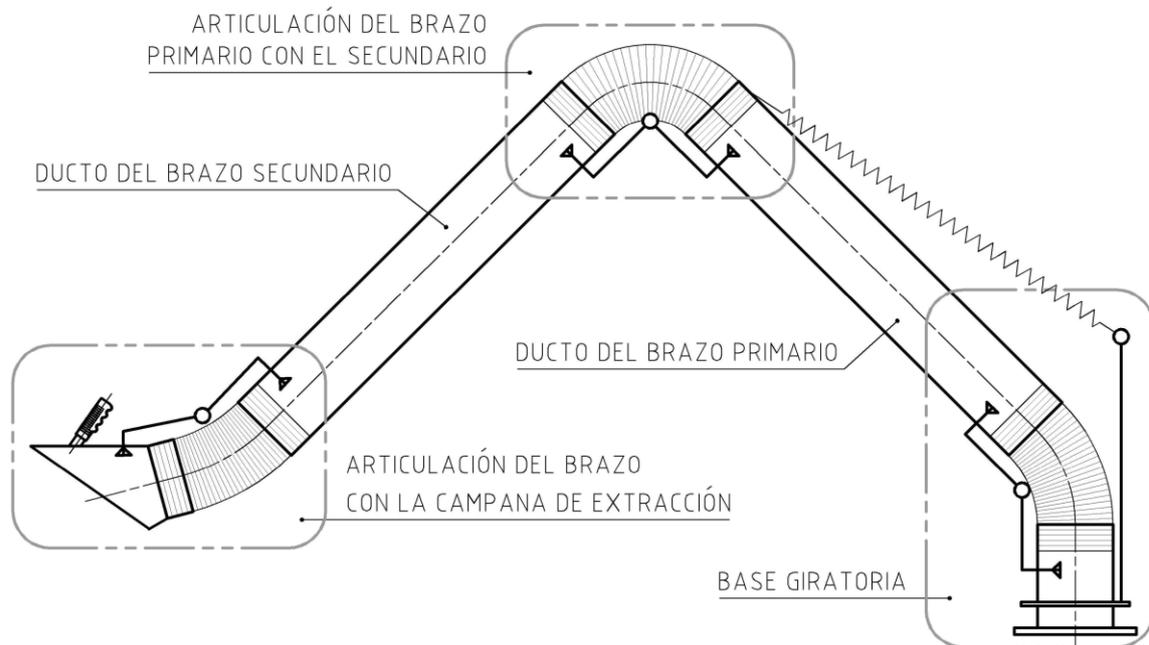
**Material de Fabricación.** Como se estableció en la matriz de decisión del material de fabricación de la campana de extracción (Tabla 9) en base a las especificaciones de peso, costo, fabricación, resistencia térmica y acabado. El material de fabricación elegido para el brazo articulado también es el aluminio 1050.

**Componentes.** Como se muestra en la Figura 54, luego de que los humos de soldadura salgan de la campana de extracción con una velocidad y un diámetro establecidos, pasarán por dos ductos de igual geometría, denominados primario y secundario. Los cuales guiarán a los humos hacia una base giratoria, que sirve como elemento de unión entre el brazo articulado y el colector. Se tienen por tanto a los cuatro componentes que conforman al brazo articulado:

- Ductos del brazo (primario y secundario)
- Articulación del brazo primario con el secundario
- Articulación del brazo con la campana de extracción
- Base giratoria

**Figura 54**

*Componentes del brazo articulado*



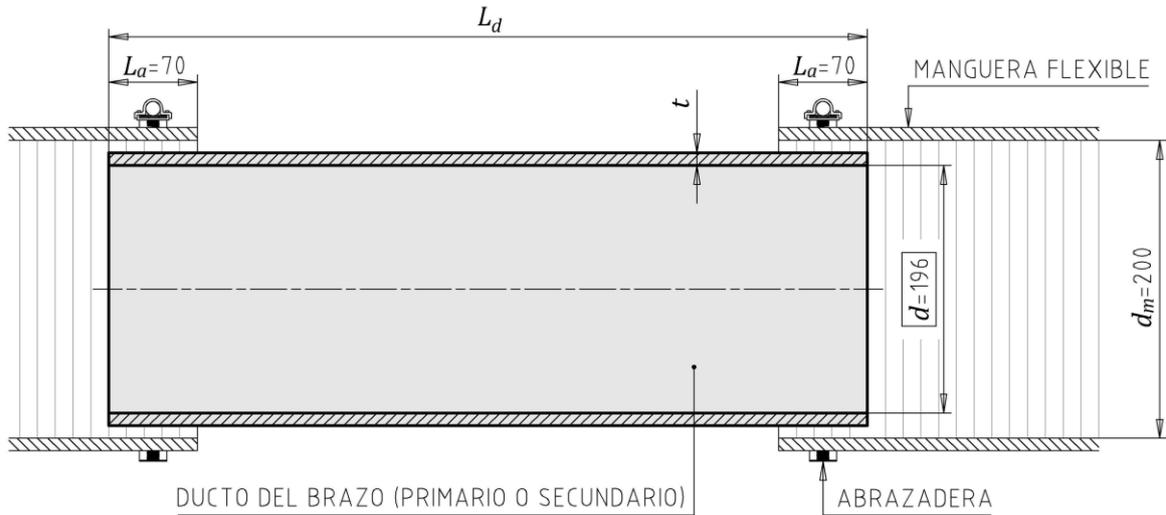
*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**Ducto del Brazo.** El brazo articulado, como se muestra en la Figura 53, tiene una configuración que consta de dos ductos, uno primario y otro secundario, los cuales se

diseñarán con el mismo diámetro y largo para establecer un estándar y, por ende, facilitar su fabricación. Como se muestra en la Figura 55, estos ductos están definidos por su diámetro interior ( $d$ ), longitud ( $L_d$ ) y espesor ( $t$ ).

**Figura 55**

*Ducto del brazo*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Diámetro Interior ( $d$ ).** Los ductos deben conectarse entre sí y con otros componentes de la máquina con un diámetro interior que fue establecido al dimensionar el ducto de acople de la campana de extracción, como se muestra en la Figura 55, este diámetro es:

$$d = 196 \text{ mm}$$

**Longitud ( $L_d$ ).** Es determinado a partir del radio de desplazamiento máximo (Figura 53) el cual es aproximadamente igual en dimensión a la de longitud de dos brazos más dos tramos de manguera flexible, los cuales se asumen temporalmente con un valor igual al diámetro interior del ducto ( $d = 196 \text{ mm}$ ) tal como se indica en la Ecuación 3.17.

$$r_{m\acute{a}x} \approx 2L_b + 2L'_m \quad (3.17)$$

Donde:

$r_{m\acute{a}x}$ : Radio de desplazamiento máximo, mm

$L_d$ : Longitud del ducto del brazo, mm

$L'_m$ : Longitud temporal del tramo de manguera flexible, mm

$$2738 \approx 2L_d + 2(196)$$

$$L_d \approx 1173 \text{ mm}$$

Debido a que se trata de una dimensión aproximada, se considera que las planchas de aluminio 1050 utilizadas para la fabricación de los ductos se adquieren con un ancho estándar de 1200 mm. Por lo tanto, se establece que la longitud del ducto sea de esta dimensión para facilitar su fabricación al ajustarse a las dimensiones disponibles en el mercado industrial.

$$L_d = 1200 \text{ mm}$$

**Espesor del Ducto ( $t$ ).** Este espesor ya fue calculado anteriormente con la Ecuación 3.5 usando un criterio constructivo para materiales de fabricación distintos al acero (*HVAC Duct Construction Standards*, 2020). El espesor del ducto es:

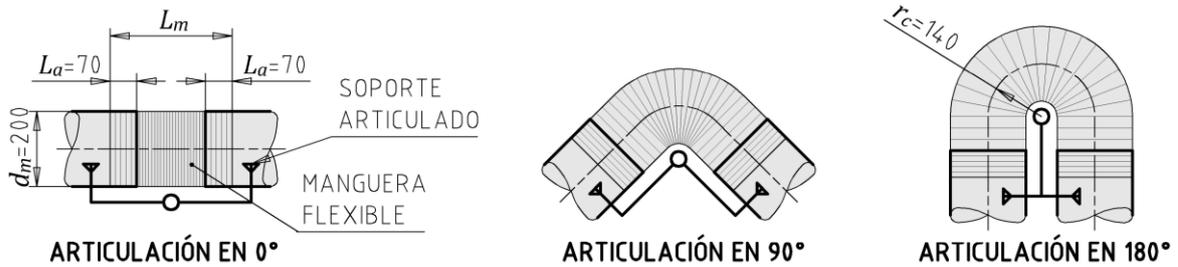
$$t = 1 \text{ mm}$$

**Articulación del Brazo Primario con el Secundario.** Sirve para permitir el movimiento entre el ducto principal y secundario del brazo, como se muestra en la Figura 56, donde  $d_m$  es el diámetro interior de la manguera flexible el cual ya fue establecido en 200 mm,  $L_a$  es la longitud del ducto de acople el cual ya fue establecido en 70 mm,  $L_m$  es el tramo de manguera flexible y  $r_c$  es el radio de curvatura de la manguera flexible el cual se establece en 140 mm según lo indicado en la Tabla 11. Esta articulación se compone de los siguientes elementos:

- Tramo de manguera flexible
- Soporte articulado

**Figura 56**

*Articulación de brazo primario con el secundario*

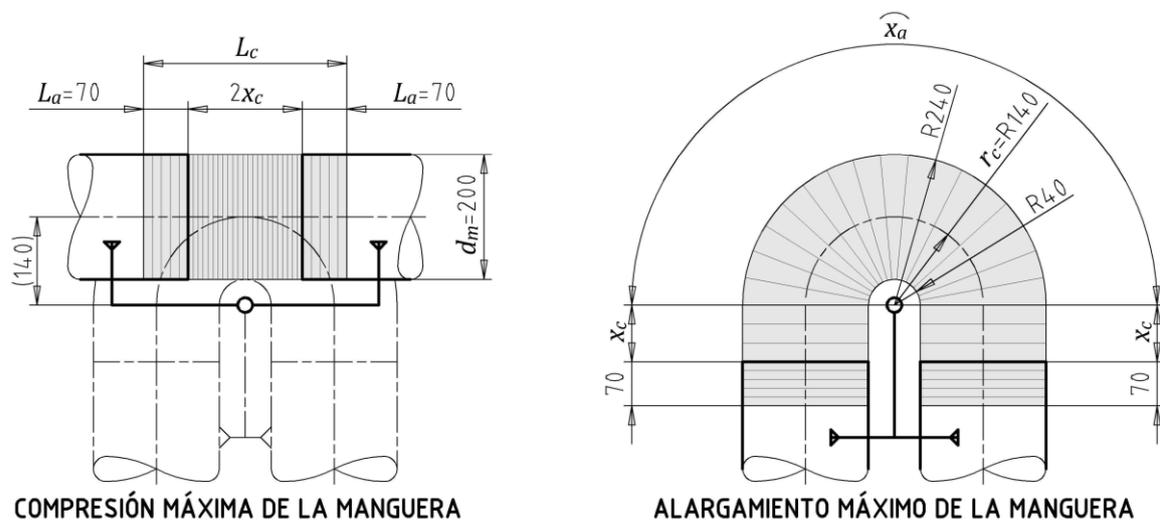


Nota. Fuente. Elaboración Propia.

**Manguera Flexible.** Permite el movimiento de rotación de la articulación mediante su compresión y alargamiento, como se muestra en la Figura 57, donde  $L_a$  es la longitud del ducto de acople,  $L_c$  es la longitud de la manguera flexible comprimida,  $x_c$  es el tramo comprimido de la manguera flexible,  $x_a$  es el tramo alargado de la manguera flexible y  $r_c$  es el radio de curvatura de la manguera flexible, establecido en 140 mm por la Tabla 10.

**Figura 57**

*Manguera flexible del brazo principal con el secundario*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Factor de Alargamiento ( $k_a$ ).** Es la relación entra la longitud alargada y comprimida máxima de una manguera flexible, como se indica en la Ecuación 3.18. Se calcula tomando en cuenta el radio de curvatura ( $r_c = 140 \text{ mm}$ ) el cual genera dos radios, uno de 40 mm en compresión y otro de 240 mm en alargamiento, como se muestra en la Figura 57, los cuales son una consecuencia geométrica del diámetro interior de la manguera flexible ( $d_m = 200 \text{ mm}$ ).

$$k_{am\acute{a}x} = \frac{L_{am\acute{a}x}}{L_{cm\acute{a}x}} = \frac{\varphi \cdot r_{am\acute{a}x}}{\varphi \cdot r_{cm\acute{a}x}} \quad (3.18)$$

Donde:

- $k_{am\acute{a}x}$  = Factor de alargamiento máximo
- $L_{am\acute{a}x}$  = Longitud alargada máxima de la manguera flexible, mm
- $L_{cm\acute{a}x}$  = Longitud comprimida máximo de la manguera flexible, mm
- $\varphi$  = Ángulo del arco generado, rad
- $r_{am\acute{a}x}$  = Radio de alargamiento máximo, mm
- $r_{cm\acute{a}x}$  = Radio de compresión máxima, mm

$$k_{am\acute{a}x} = \frac{\varphi \cdot 240}{\varphi \cdot 40} = 6$$

Debido a que este valor es máximo, se establece el factor de alargamiento en:

$$k_a = 5$$

**Tramo Alargado ( $x_a$ ).** Es una longitud adicional en forma de arco circular que se genera con el alargamiento de la manguera flexible desde 0° hasta 180°. Se determina con la Ecuación 3.19 y corresponde a un arco circular de 240 mm de radio de alargamiento, como se muestra en la Figura 57.

$$x_a = \varphi \cdot r_a \quad (3.19)$$

Donde:

$x_a$  = Tramo alargado de la manguera flexible, mm

$\varphi$  = Ángulo del arco generado, rad

$r_a$  = Radio de alargamiento, mm

$$x_a = \left(180 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot 240$$

$$x_a \approx 753,982 \text{ mm}$$

**Tramo Comprimido ( $x_c$ ).** Es la mitad de la distancia que separa a los ductos del brazo en la posición comprimida, como se muestra en la Figura 57. Se determina con el factor de alargamiento, y resulta de la comparación entre la posición comprimida y alargada de la manguera flexible, como se indica en la Ecuación 3.20.

$$k_a \cdot 2x_c \approx 2x_c + x_a \quad (3.20)$$

Donde:

$k_a$  = Factor de alargamiento

$x_c$  = Tramo comprimido de la manguera flexible, mm

$x_a$  = Tramo alargado de la manguera flexible, mm

$$5 \cdot 2x_c \approx 2x_c + 753,982$$

$$x_c \approx 94,248$$

$$x_c = 90 \text{ mm}$$

**Longitud ( $L_m$ ).** Con los valores obtenidos, se calcula la longitud de la manguera flexible requerida para formar la articulación. Esta longitud está definida por su longitud comprimida ( $L_c$ ) y alargada ( $L_m$ ) como se indican en las Ecuaciones 3.21 y 3.22 respectivamente.

$$L_c = 2L_a + 2x_m \quad (3.21)$$

Donde:

$L_c =$  Longitud de la manguera flexible comprimida, mm

$L_a =$  Longitud del ducto de acople, mm

$x_c =$  Tramo comprimido de la manguera flexible, mm

$$L_c = 2 \cdot 70 + 2 \cdot 90$$

$$L_c = 320 \text{ mm}$$

$$L_m = k_a \cdot L_c \quad (3.22)$$

Donde:

$L_m =$  Longitud de la manguera flexible alargada, mm

$k_a =$  Factor de alargamiento

$L_c =$  Longitud de la manguera flexible comprimida, mm

$$L_m = 5 \cdot 320$$

$$L_m = 1600 \text{ mm}$$

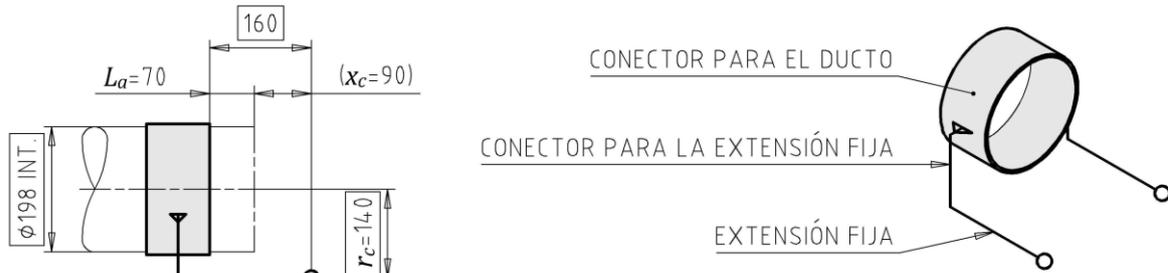
Por lo tanto, se requiere una manguera flexible de 200 mm de diámetro interior con una longitud alargada de 1600 mm.

**Soporte Articulado.** Corresponde al eslabonamiento del mecanismo, cuya geometría está definida como se muestra en la Figura 58, por el diámetro exterior del ducto ( $d + 2t = 198 \text{ mm}$ ) el cual se convierte en diámetro interior del soporte, por la longitud del ducto de acople ( $L_a = 70 \text{ mm}$ ), por el tramo comprimido de manguera flexible ( $x_c = 90$ ) y el radio de curvatura ( $r_c = 140 \text{ mm}$ ). Se compone de tres elementos:

- Conector para el ducto
- Conector para la extensión fija
- Extensión fija

**Figura 58**

*Soporte articulado del brazo primario con el secundario*

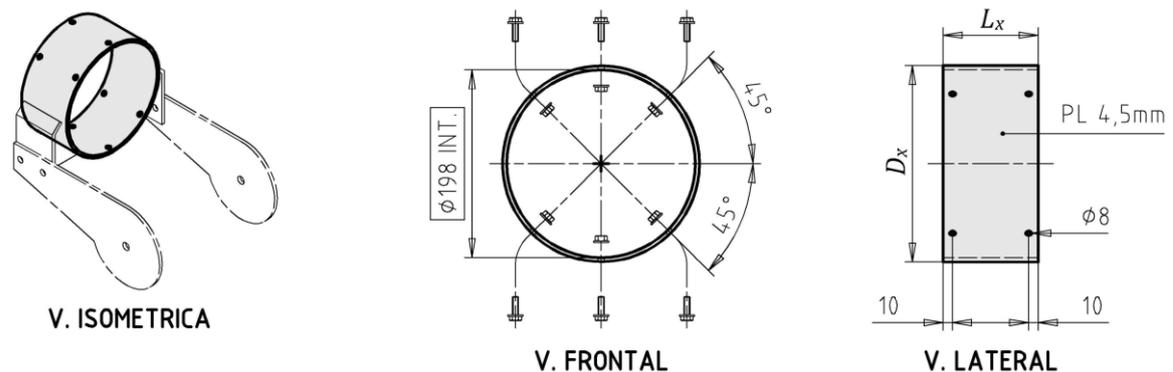


*Nota. Fuente. Elaboración Propia.*

**Conector para el Ducto.** Como se muestra en la Figura 59, se opta por un diseño en forma de anillo, el cual incluye una serie de uniones empernadas al rededor. Este diseño brinda una distribución uniforme de cargas a lo largo del perímetro del ducto, garantizando una unión estable y resistente para soportar las cargas durante su operación.

**Figura 59**

*Conector para el ducto del brazo principal con el secundario*



*Nota. Fuente. Elaboración Propia.*

**Espesor ( $t_{x1}$ ).** Debe tener un espesor comercial en aluminio 1050 lo suficientemente grande para no ser susceptible a deformaciones por soldadura, pero no tanto como para poder ser rolado a un diámetro interior de 198 mm

$$t_{x1} = 4,5 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_1$ ).** Los pernos deben fijar el conector al ducto del brazo, y deben distribuirse uniformemente alrededor de dos circunferencias. Se asume que estos pernos tendrán un diámetro de 1/4"NC (6,35 mm).

$$d_{p1} = 1/4"NC$$

Como recomendación, el espaciamiento entre pernos de diámetro 1/4"NC debe ser de aproximadamente 4" (101,6 mm), como se indica en la Ecuación 3.23, en la cual se representa la mitad de la cantidad de pernos, puesto que se tratan de dos circunferencias.

$$\frac{n_{p1}}{2} \approx \frac{\pi \cdot d_{eje}}{101,6} \quad (3.23)$$

Donde:

$n_{p1}$  = Número de pernos de la unión empernada  $p_1$ , debe ser par

$d_{eje}$  = Diámetro de la circunferencia donde se ubican los pernos (198 + 2 · 4,5)

$$\frac{n_{p1}}{2} \approx \frac{\pi \cdot 207}{101,6}$$

$$n_{p1} \approx 12,801$$

$$n_{p1} = 12$$

El resultado obtenido es de 12 pernos en total, lo que indica que serán 6 pernos de diámetro 1/4" NC (6,35 mm) por circunferencia. Como se muestra en la Figura 59, existen

zonas laterales que impiden la perforación, por lo que los pernos se distribuyen a 45° en lugar de 60°.

**Diámetro Exterior ( $D_x$ ).** Como se indica en la Ecuación 3.24, está definido por el diámetro interior del soporte y su espesor.

$$D_x = 198 + 2t_{x1} \quad (3.24)$$

Donde:

$D_x$  = Diámetro exterior del conector para el ducto, mm

$t_{x1}$  = Espesor del conector para el ducto, mm

$$D_x = 198 + 2 \cdot 4,5$$

$$D_x = 207 \text{ mm}$$

**Longitud ( $L_x$ ).** Como se indica en la Ecuación 3.25, está definido por el ancho del conector para la extensión fija más dos márgenes para soldar los cuales se estiman a su vez como mínimo al doble del espesor más delgado.

$$L_x \approx b_x + 2 \cdot (2t_{x1}) \quad (3.25)$$

Donde:

$L_x$  = Longitud del conector para el ducto, mm

$b_x$  = Ancho del conector para la extensión fija, mm

$t_{x1}$  = Espesor del conector para el ducto, mm

$$L_x \approx b_x + 2 \cdot (2 \cdot 4,5)$$

$$L_x \approx b_x + 18$$

Debido a que es un valor mínimo, se prefiere al múltiplo de diez más cercano, dando como resultado a la Ecuación 3.26.

$$L_x = b_x + 20 \quad (3.26)$$

Donde:

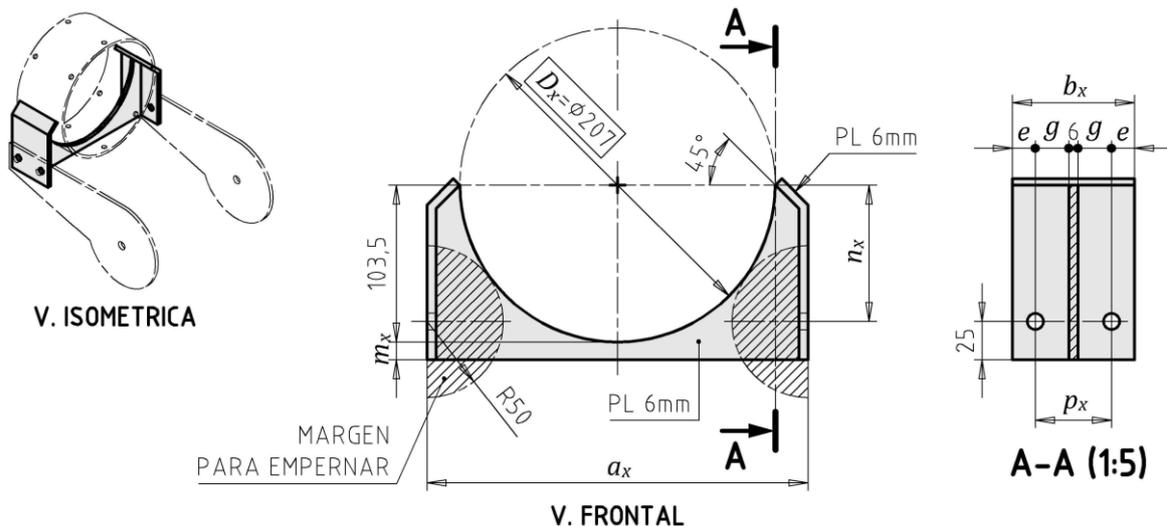
$L_x$  = Longitud del conector para el ducto, mm

$b_x$  = Ancho del conector para la extensión fija, mm

**Conector para la Extensión Fija.** Como se muestra en la Figura 60, su diseño permite una unión permanente con el conector para el ducto. Esto se logra mediante la soldadura lateral de dos apoyos, a los cuales se les incorpora un refuerzo intermedio. Este refuerzo no solo incrementa la rigidez estructural del conjunto, sino que también facilita la instalación de dos pernos por cada apoyo, asegurando una mayor estabilidad y resistencia en la unión.

**Figura 60**

*Conector para la extensión fija del brazo principal con el secundario*



Nota. Fuente. Elaboración Propia.

**Espesor ( $t_{x2}$ ).** Se recomienda que los refuerzos tengan siempre un espesor más grande que el elemento que se está reforzando, por este motivo se selecciona un espesor comercial de aluminio 1050 superior a 4,5 mm.

$$t_{x2} = 6 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_2$ ).** Los pernos deben mantener a las dos extensiones unidas e inmóviles respecto al conector. La cantidad mínima necesaria para evitar una rotación es de dos unidades por lado, lo que da un total de cuatro unidades.

$$n_{p2} = 4$$

Para determinar el diámetro de los pernos se usa la Ecuación 3.27, la cual relaciona la proporción de áreas de esfuerzo, las cuales son proporcionales al cuadrado de los diámetros exteriores, de dos tipos de uniones empernadas con su número de pernos asociados.

$$n_{p1} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p1}^2 \right) \approx n_{p2} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p2}^2 \right) \quad (3.27)$$

Donde:

$n_{p1}$  = Número de pernos de la unión empernada p1

$d_{p1}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p1, mm

$n_{p2}$  = Número de pernos de la unión empernada p2

$d_{p2}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p2, mm

$$12 \left( \frac{\pi}{4} \cdot (6,35)^2 \right) \approx 4 \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p2}^2 \right)$$

$$d_{p2} \approx 10,999$$

El resultado obtenido es de aproximadamente 11 mm el cual no es un diámetro de perno NC comercial, se adoptará el valor del perno comercial 3/8"NC (9,525 mm) puesto que se asumió con demasía a la unión empernada anterior de 1/4"NC.

$$d_{p2} = 3/8"NC$$

**Largo ( $a_x$ ).** Depende de los márgenes de empernar, como se muestra en la Figura 60, este margen está definido por un sector circular de radio 50 mm, el cual facilita el montaje de componentes mediante llaves de tuercas. Se trazan ambos sectores circulares haciéndolos tangentes a la circunferencia de diámetro 207 mm y se obtiene por trazo geométrico al largo del conector.

$$a_x = 250 \text{ mm}$$

**Ancho ( $b_x$ ).** Depende de las perforaciones que se deben realizar para la unión empernada, como se muestra en la Figura 60, es una suma que involucra a dos espaciamentos como se indica en la Ecuación 3.28.

$$b_x = 2g + 2e + 6 \quad (3.28)$$

Donde:

$b_x$  = Ancho del conector para la extensión fija, mm

$g$  = Espaciamiento gage o calibre, mm

$e$  = Espaciamiento libre, mm

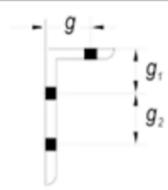
El espaciamiento entre pernos llamado Gage o calibre ( $g$ ) se obtiene de la Tabla 20, depende del diámetro del perno ( $d_{p2} = 3/8"NC$ ) que se recomienda asociar a un ángulo de 1 1/2" (38,1 mm) de ala.

$$g = 7/8"$$

$$g = 22,225 \text{ mm}$$

**Tabla 20**

*Calibres en ángulos de lados iguales*

	Leg	8	7	6	5	4	3 1/2	3	2 1/2	2	1 3/4	1 1/2	1 3/8	1 1/4	1
<b>g</b>	4 1/2	4	3 1/2	3	2 1/2	2	1 3/4	1 3/8	1 1/8	1	7/8	7/8	3/4	5/8	
<b>g<sub>1</sub></b>	3	2 1/2	2 1/4	2											
<b>g<sub>2</sub></b>	3	3	2 1/2	1 3/4											

*Nota.* Medidas en pulgadas. *Fuente.* Steel Construction Manual, por American Institute of Steel Construction, 2023

El espaciamento libre se obtiene de la diferencia entre el ala del ángulo asociado (38,1 mm) y el calibre ( $g = 22,225 \text{ mm}$ ) como se indica en la Ecuación 3.29

$$e \approx 38,1 - g \quad (3.29)$$

Donde:

$e =$  Espaciamento libre, mm

$g =$  Espaciamento gage o calibre, mm

$$e \approx 38,1 - 22,225$$

$$e \approx 15,875 \text{ mm}$$

Se reemplazan los valores en la Ecuación 3.28.

$$b_x = 2(22,225) + 2(15,875) + 6$$

$$b_x \approx 82,2 \text{ mm}$$

Se prefiere un valor múltiplo de 10 para este ancho del conector:

$$b_x = 80 \text{ mm}$$

Por este motivo, se deduce el espaciamento libre para alcanzar el ancho requerido.

$$e = 15 \text{ mm}$$

La longitud del conector para el ducto  $L_x$ , como se mostró en la Figura 59, queda definida como el ancho más dos márgenes de 10 mm cada uno.

$$L_x = 80 + 20$$

$$L_x = 100$$

**Distancia entre Pernos ( $p_x$ ).** Como se mostró en la Figura 59, queda definida como la longitud del conector  $L_x$  menos dos espaciamentos libres, como se indica en la Ecuación 3.30.

$$p_x = L_x - 2e \quad (3.30)$$

Donde:

$m_x$  = Margen para soldar, mm

$t_{x1}$  = Espesor del conector para el ducto, mm

$$p_x = 100 - 30$$

$$p_x = 70$$

**Margen para Soldar ( $m_x$ ).** Se recomienda que este margen sea como mínimo igual al doble del espesor más delgado, como se indica en la Ecuación 3.31.

$$m_x \geq 2t_{x1} \quad (3.31)$$

Donde:

$m_x$  = Margen para soldar, mm

$t_{x1}$  = Espesor del conector para el ducto, mm

$$m_x \geq 2 \cdot 4,5$$

$$m_x \geq 9$$

**Alejamiento de Pernos ( $n_x$ ).** Se establece con la Ecuación 3.32 la cual se deduce de la Figura 60 luego de comparar ambos lados de los apoyos.

$$n_x + 25 = m_x + 103,5 \quad (3.32)$$

Donde:

$n_x$  = Alejamiento de pernos, mm

$m_x$  = Margen para soldar, mm

$$n_x + 25 \geq 9 + 103,5$$

$$n_x \geq 87,5$$

Se prefiere al múltiplo de diez más cercano.

$$n_x = 90$$

Además, el margen para soldar  $m_x$ , queda definida en un valor fijo usando nuevamente la Ecuación 3.29.

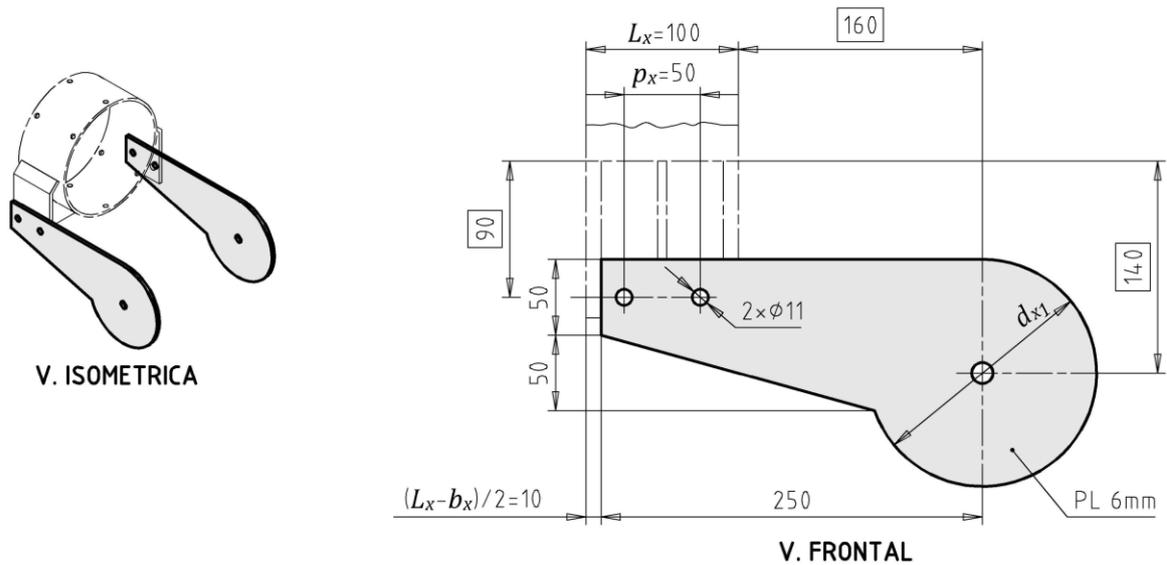
$$90 + 25 = m_x + 103,5$$

$$m_x = 11,5$$

**Extensión Fija.** Su diseño incluye una unión empernada de dos pernos de 3/8"NC con agujeros de 11 mm de diámetro, tal como se calculó en el elemento anterior. La extensión se proyecta 160 mm desde el conector para el ducto. En su terminal, tiene un disco de diámetro  $d_x$  que, al conectarse con otro similar, forma una articulación con rozamiento para mantener una posición del mecanismo. El alejamiento entre el centro de este disco y el eje del brazo es de 140 mm, y junto con otros valores previamente calculados, se determinan las dimensiones que se muestran en la Figura 61.

**Figura 61**

*Extensión fija del brazo principal con el secundario*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Espesor ( $t_{x3}$ ).** Se elegirá al mismo espesor usado en el conector para la extensión, el cual es igual a 6 mm.

$$t_{x3} = 6 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_3$ ).** Los pernos deben mantener unidas a dos extensiones semejantes acopladas entre sí para formar una articulación. La cantidad requerida para generar una rotación es de una unidad por cada extensión, lo que da un total de dos unidades.

$$n_{p3} = 2$$

Para determinar el diámetro de los pernos se usa la Ecuación 3.33, la cual relaciona la proporción de áreas de esfuerzo, las cuales son proporcionales al cuadrado de los diámetros exteriores, de dos tipos de uniones empernadas con su número de pernos asociados.

$$n_{p2} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p2}^2 \right) \approx n_{p3} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p3}^2 \right) \quad (3.33)$$

Donde:

$n_{p2}$  = Número de pernos de la unión empernada p2

$d_{p2}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p2, mm

$n_{p3}$  = Número de pernos de la unión empernada p3

$d_{p3}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p3, mm

$$4 \left( \frac{\pi}{4} \cdot 9,525^2 \right) \approx 2 \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p3}^2 \right)$$

$$d_{p3} \approx 13,470 \text{ mm}$$

El resultado obtenido es de aproximadamente 13 mm el cual no es un diámetro de perno NC comercial, se adoptará el valor del perno comercial 1/2"NC (12,7 mm).

$$d_{p2} = 1/2"NC$$

**Diámetro de Unión ( $d_{x1}$ ).** Se calcula a partir de la Figura 61, mediante una comparación geométrica de los alejamientos de pernos de 90 y 140 mm, como se indica en la Ecuación 3.34.

$$90 - \frac{50}{2} = 140 - \frac{d_x}{2} \quad (3.34)$$

Donde:

$d_{x1}$  = Diámetro de unión de la extensión fija, mm

$$d_{x1} = 150 \text{ mm}$$

La articulación de brazo con brazo queda definida con todas las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 62.

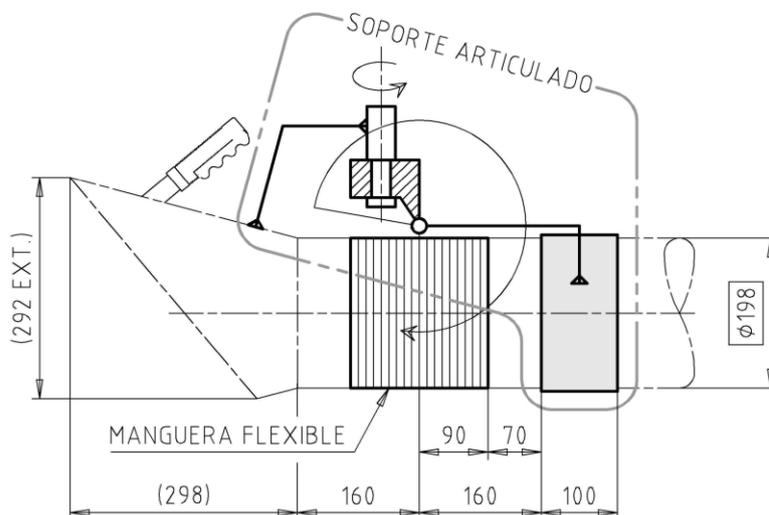


**Articulación del Brazo con la Campana de Extracción.** Este diseño permite el movimiento entre el ducto secundario del brazo y la campana de extracción. A diferencia de la articulación de brazo con brazo, esta incluye una rotación adicional que facilita la orientación de la campana, permitiendo una mejor captura de los contaminantes, como se muestra en la Figura 63. Se compone de dos elementos:

- Manguera flexible
- Soporte articulado

**Figura 63**

*Articulación del brazo con la campana de extracción*



*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

**Manguera Flexible.** Este elemento ya fue seleccionado y calculado en el diseño de la articulación del brazo primario con el secundario. Para esta aplicación, se requiere una manguera flexible con un diámetro interior de 200 mm y una longitud extendida de 1600 mm, lo que asegura la flexibilidad y el rango de movimiento adecuado entre los componentes.

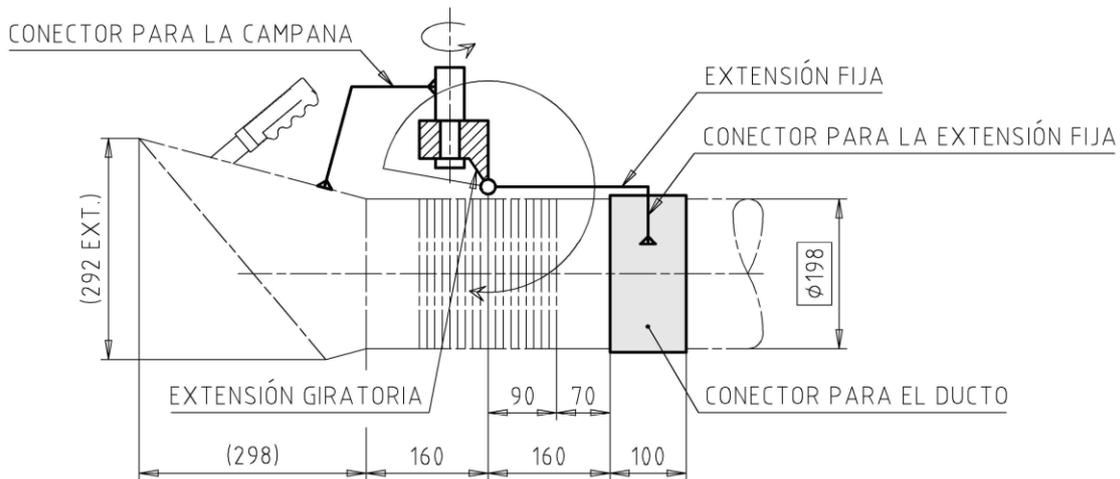
**Soporte Articulado.** Corresponde al eslabonamiento del mecanismo, cuya geometría está definida por las dimensiones previamente calculadas en la articulación del

brazo principal con el secundario, como se muestra en la Figura 64. Se compone de cinco elementos:

- Conector para el ducto
- Conector para la extensión fija
- Extensión fija
- Extensión giratoria
- Conector para la campana

**Figura 64**

*Soporte articulado del brazo con la campana de extracción*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Debido a que los dos primeros componentes mencionados son exactamente iguales a los componentes de la articulación del brazo principal con el secundario, en esta etapa solo se procederá con el diseño de la extensión fija, la extensión giratoria y el conector para la campana.

**Extensión Fija.** Su diseño incluye una unión emperrada de dos pernos de 3/8"NC con agujeros de 11 mm de diámetro, tal como se calculó en la articulación del brazo principal con el secundario. Esta extensión se proyecta 160 mm desde el conector para el ducto. En su terminal, tiene un disco de diámetro  $d_x$  que, al conectarse con el conector

para la campana, forma una articulación con rozamiento para mantener una posición del mecanismo.

**Diámetro de Unión ( $d_{x2}$ ).** Este diámetro se reducirá de 150 mm a 100 mm. Esta modificación se debe a que, al tratarse de la terminal del brazo articulado, no está expuesta a cargas pesadas, lo que permite utilizar un tamaño más pequeño.

$$d_{x2} = 100 \text{ mm}$$

**Espesor ( $t_{x4}$ ).** Se elegirá al mismo espesor usado en las extensiones fijas de la articulación del brazo principal con el secundario, el cual es igual a 6 mm.

$$t_{x4} = 6 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_4$ ).** Los pernos deben mantener unidas a las extensiones fijas con la extensión giratoria para formar una articulación. La cantidad requerida para generar una rotación es de una unidad por cada extensión fija, lo que da un total de dos unidades.

$$n_{p4} = 2$$

Esta unión empernada se reducirá, debido a que este elemento solo soportará a la campana de extracción, pasando de 1/2"NC a 3/8"NC, el tamaño comercial inmediato inferior. Con esta reducción se obtiene una conexión racional para la carga esperada.

$$d_{p4} = 3/8"NC$$

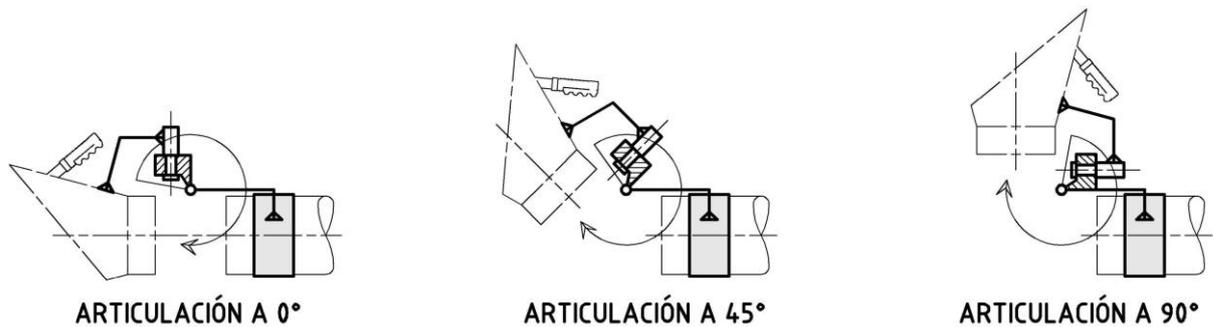
La extensión fija del brazo con la campana de extracción queda definida con todas las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 65.



**Extensión Giratoria.** Este componente tiene la función de proporcionar una rotación adicional a la articulación del sistema. Está compuesto por dos tipos de uniones empernadas. Las primera debe alinearse colinealmente con las extensiones fijas, lo que permite una primera forma de rotación, como se muestra en la Figura 66.

**Figura 66**

*Primera rotación de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*

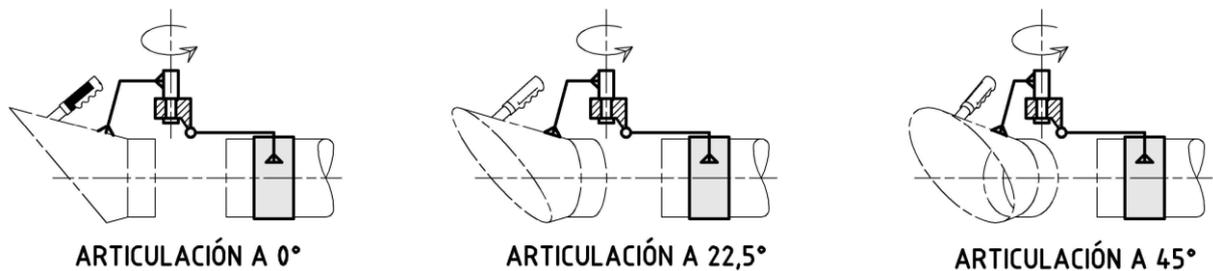


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

El segundo tipo de unión empernada debe estar en un plano diferente, perpendicular al anterior, para aportar una segunda forma de rotación, como se muestra en la Figura 67. Este diseño brinda un movimiento fluido, mejorando la facilidad de orientación y el rango de movimiento para la captura de contaminantes.

**Figura 67**

*Segunda rotación de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Diámetro de Unión ( $d_{x3}$ ).** Este diámetro se reducirá de 100 mm a 75 mm. Esta modificación se debe a que, al tratarse de la terminal del brazo articulado, no está expuesta a cargas pesadas, lo que permite utilizar un tamaño más pequeño.

$$d_{x3} = 75 \text{ mm}$$

**Espesor ( $t_{x5}$ ).** Se elegirá al mismo espesor usado en las extensiones fijas de la articulación, el cual es igual a 6 mm

$$t_{x4} = 6 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_5$ ).** Para proveer a la segunda rotación mostrada en la Figura 67, se requiere de un solo perno dispuesto al centro de la extensión giratoria.

$$n_{p5} = 1$$

Para determinar el diámetro de los pernos se usa la Ecuación 3.35, la cual relaciona la proporción de áreas de esfuerzo, las cuales son proporcionales al cuadrado de los diámetros exteriores, de dos tipos de uniones empernadas con su número de pernos asociados.

$$n_{p4} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p4}^2 \right) \approx n_{p5} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p5}^2 \right) \quad (3.35)$$

Donde:

$n_{p4}$  = Número de pernos de la unión empernada p4

$d_{p4}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p4, mm

$n_{p5}$  = Número de pernos de la unión empernada p5

$d_{p5}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p5, mm

$$2 \left( \frac{\pi}{4} \cdot 9,525^2 \right) \approx 1 \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p5}^2 \right)$$

$$d_{p5} \approx 13,470 \text{ mm}$$

El resultado obtenido es de aproximadamente 13 mm el cual no es un diámetro de perno NC comercial, se adoptará el valor del perno comercial 1/2"NC (12,7 mm).

$$d_{p5} = 1/2"NC$$

La extensión giratoria del brazo con la campana de extracción queda definida con todas las dimensiones previamente calculadas, como se muestra en la Figura 68, donde  $m_d$  es el margen para el dobléz.

**Margen para el Doblez ( $m_d$ ).** Es la distancia que se genera al realizar el dobléz en una plancha, y corresponde al radio exterior del dobléz. Su valor se determina como el doble del espesor del material utilizado, en este caso, 6 mm. Por lo tanto, el margen para dobléz es:

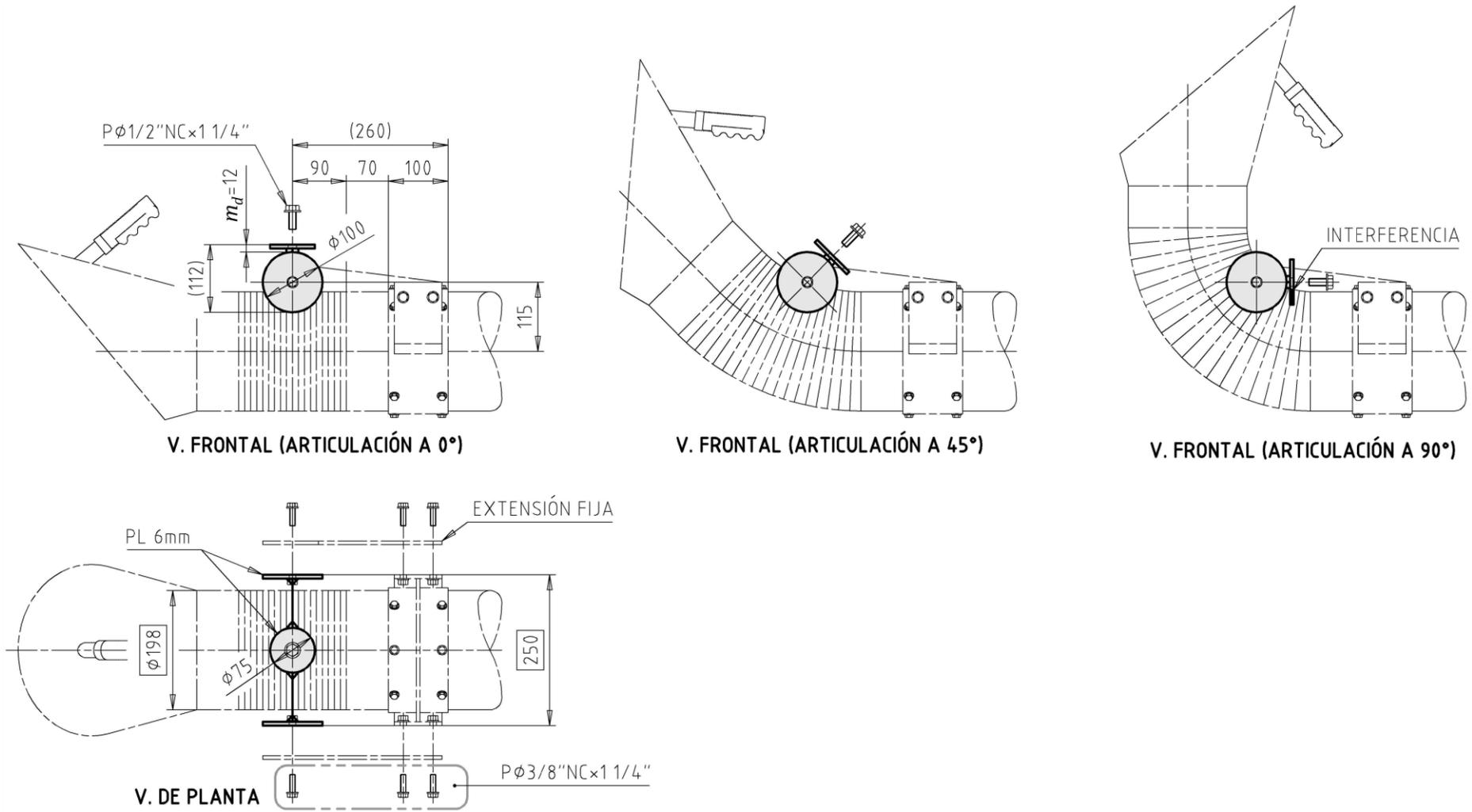
$$m_d = 12 \text{ mm}$$

Como se muestra en la Figura 68, la extensión giratoria está compuesta por dos discos de diámetro 100 mm y uno de diámetro 75 mm, los cuales forman una articulación con rozamiento para mantener una posición del mecanismo. Sin embargo, se detecta una interferencia entre la extensión giratoria y la manguera flexible lo que restringe el movimiento adecuado de la articulación.

Para corregir este inconveniente, se realiza un nuevo dimensionamiento, como se muestra en la Figura 69. En esta nueva configuración, el disco de 75 mm se desplaza hacia adelante a una distancia de 50 mm, lo que elimina la interferencia y permite un movimiento sin restricciones.

**Figura 68**

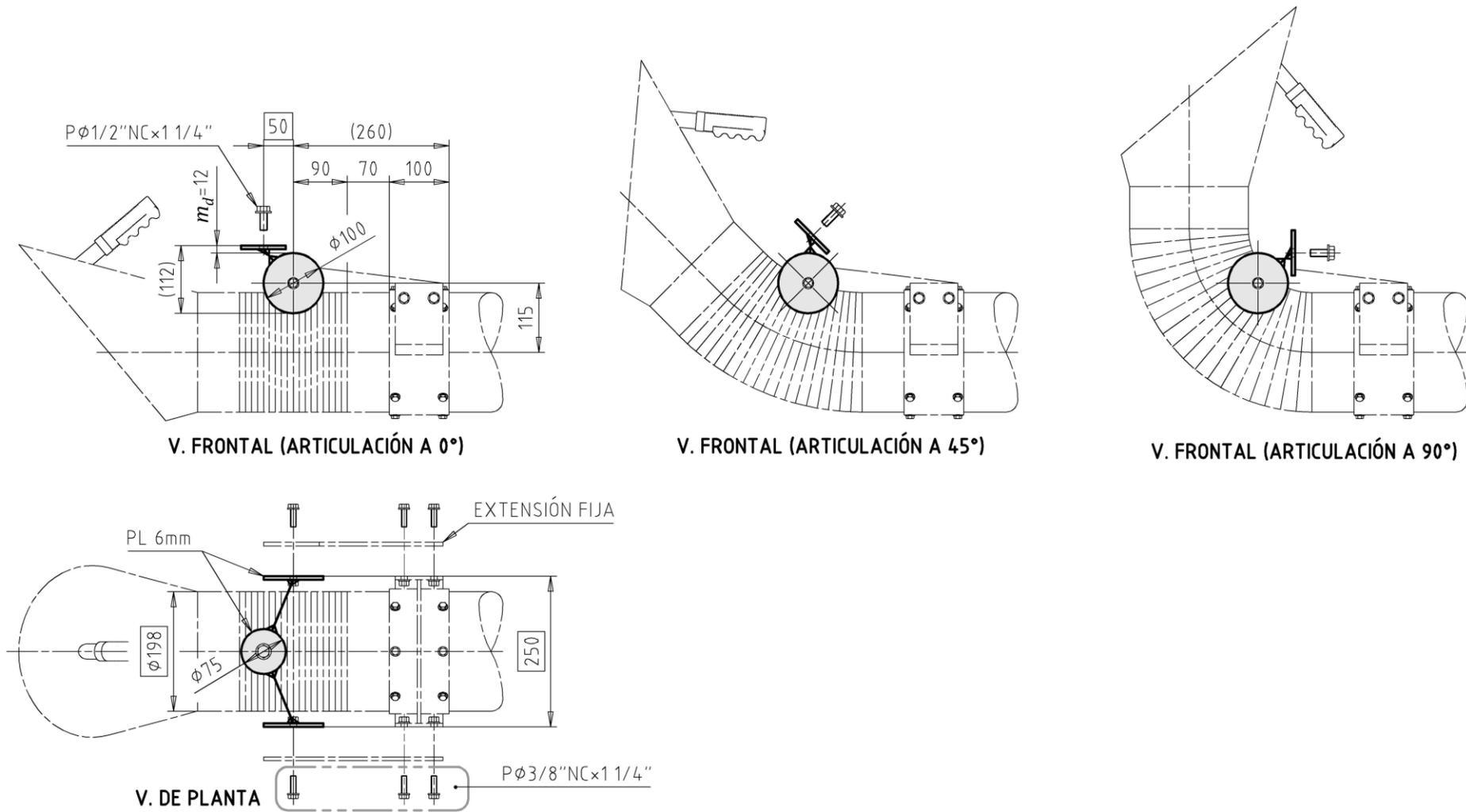
*Dimensionamiento de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 69**

*Nuevo dimensionamiento de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se procede a diseñar la extensión giratoria, teniendo en cuenta a las dimensiones que se obtuvieron en la Figura 69. Este diseño se basará en la unión de los tres discos antes determinados (dos de diámetro 100 mm y uno de diámetro 75 mm) en un solo elemento, el cual se fabricará utilizando una única plancha de aluminio con dobleces. Esta solución facilita su fabricación, al tiempo que mantiene la rigidez necesaria para el funcionamiento del mecanismo. Para lograr la composición del desarrollo de la extensión giratoria en una plancha con dobleces se establecen tres fases de desarrollo:

**Fase 1 del Desarrollo.** Se proyectan los tres discos sobre un mismo plano, con sus dimensiones exteriores, las cuales se obtienen de la Figura 69, y son 250 mm en el centro con 112 mm a cada lado. Y se trazan tres planos rectangulares que los contengan, como se muestra en la Figura 70.

**Fase 2 del Desarrollo.** Al doblar la plancha a 90°, las dimensiones exteriores aumentan debido a los radios neutros generados por el doblado. Se aplica un descuento según el espesor del material, utilizando la Ecuación 3.36:

$$x_d = x_e - N \cdot (0.822 \cdot t_{x4}) \quad (3.36)$$

Donde:

$x_d$  = Dimensión en el desarrollo de la extensión giratoria, mm

$x_e$  = Dimensión exterior doblada de la extensión giratoria, mm

$N$  = Número de dobleces

$t_{x4}$  = Espesor de la extensión giratoria, mm

Para el primer y el tercer plano rectangular que contienen a los discos de diámetro 100 mm:

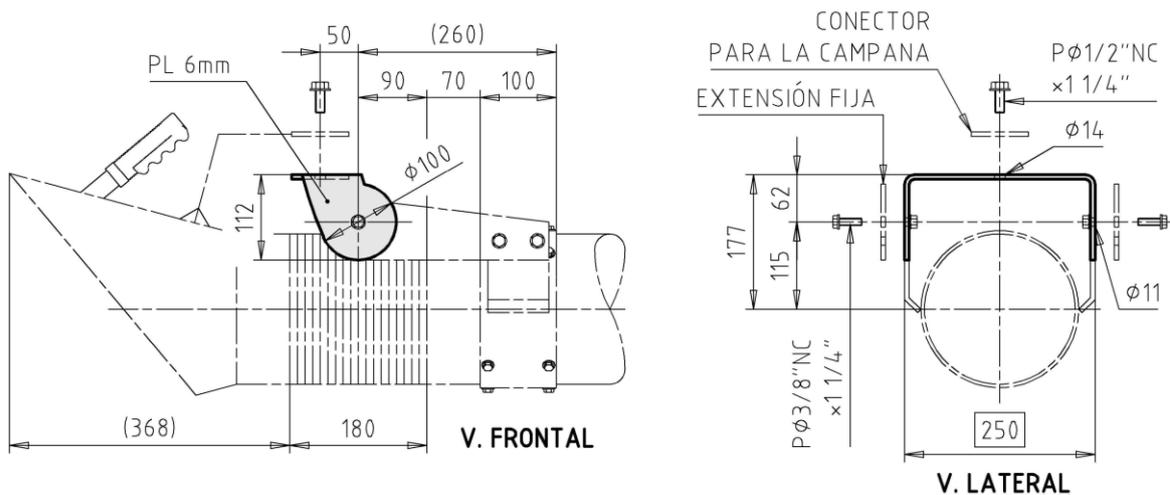
$$x_{d1,3} = 112 - 1 \cdot (0,822 \cdot 6)$$



La extensión giratoria del brazo con la campana de extracción queda definida con todas las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 71. Además, el desarrollo de este componente se muestra en la Figura 72, el cual estará fabricado con una plancha de aluminio 1050 de 6 mm de espesor.

**Figura 71**

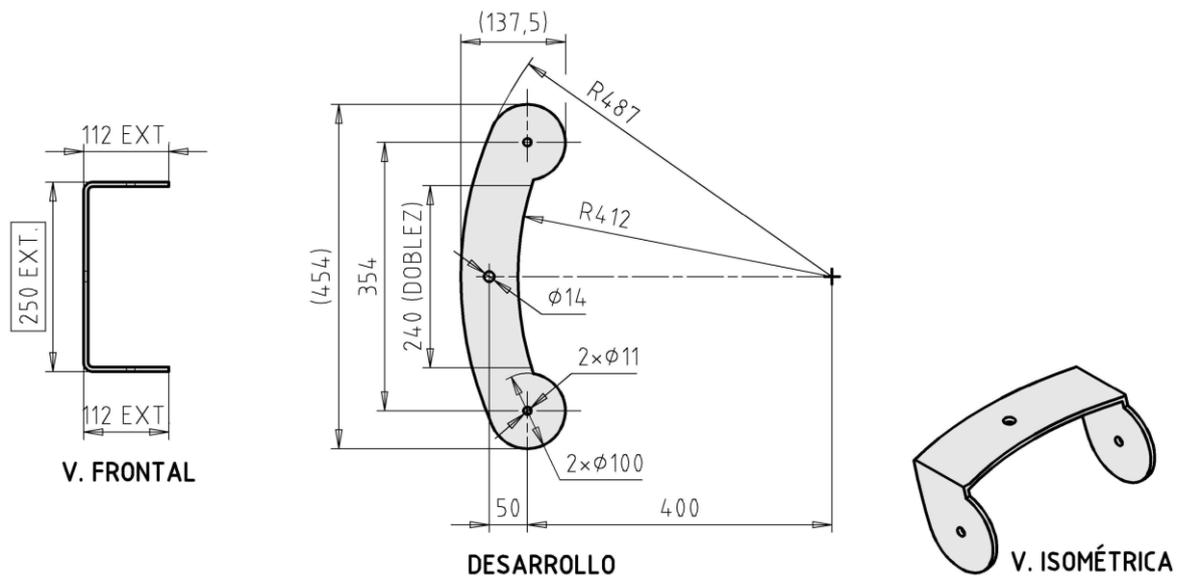
*Diseño de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 72**

*Desarrollo de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Conector para la Campana.** Es necesario establecer una conexión entre la campana de extracción y el mecanismo en la parte superior. Dado que la empuñadura se encuentra en esta zona, se modificará el diseño de la campana, incorporando la empuñadura como parte del conector. La empuñadura se soldará de forma permanente al conector, el cual se acoplará a la campana mediante una unión empernada por la parte de abajo para optimizar el espacio.

**Espesor ( $t_{x6}$ ).** Se elegirá al mismo espesor usado en la extensión giratoria de la articulación, el cual es igual a 6 mm

$$t_{x5} = 6 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_6$ ).** Esta unión conecta el conector (que incluye la empuñadura) con la campana de extracción. Dado que la unión estará expuesta a una manipulación constante por parte del soldador, se utilizarán cuatro pernos distribuidos alrededor de la empuñadura.

$$n_{p6} = 4$$

Para determinar el diámetro de los pernos, se emplea la Ecuación 3.37, que establece una relación entre las áreas de esfuerzo, las cuales son proporcionales al cuadrado de los diámetros exteriores, de dos tipos de uniones empernadas y su número de pernos asociados.

$$n_{p5} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p5}^2 \right) \approx n_{p6} \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p6}^2 \right) \quad (3.37)$$

Donde:

$n_{p5}$  = Número de pernos de la unión empernada p5

$d_{p5}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p5, mm

$n_{p6}$  = Número de pernos de la unión empernada p6

$d_{p6}$  = Diámetro del perno de la unión empernada p6, mm

$$1 \left( \frac{\pi}{4} \cdot 12,7^2 \right) \approx 4 \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{p6}^2 \right)$$

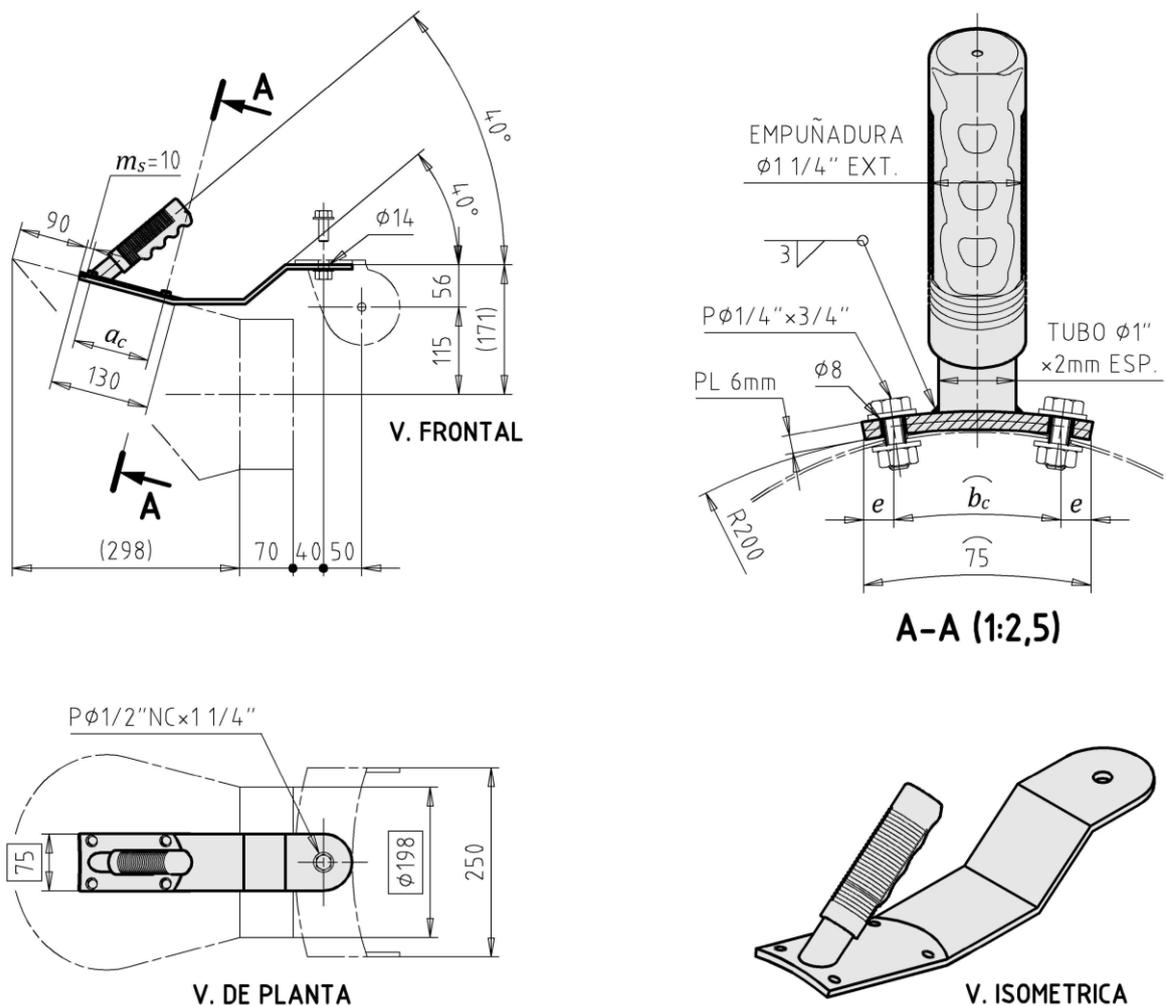
$$d_{p6} \approx 6,35 \text{ mm}$$

El resultado obtenido corresponde a un diámetro de perno NC comercial.

$$d_{p6} = 1/4" \text{ NC}$$

**Figura 73**

*Dimensionamiento del conector para la campana del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se estableció anteriormente que el que el disco involucrado en la unión entre el conector de la campana y la extensión giratoria tiene un diámetro de 75 mm. Esta

dimensión se mantendrá de forma constante a lo largo de todo el conector, como se muestra en la Figura 73, donde  $m_s$  es el margen para soldar,  $a_c$  es la primera distancia entre pernos,  $b$  es la segunda distancia entre pernos, y  $e$  es el espaciado libre.

La geometría proyectada se fabricará a partir de una única plancha de aluminio mediante procesos de doblez. Esta solución simplifica el proceso de fabricación, al mismo tiempo que asegura la rigidez necesaria para el funcionamiento del mecanismo. La empuñadura se mantendrá en su posición original, a  $40^\circ$  con respecto a la horizontal. El primer doblez orientará el conector hacia la horizontal, el segundo lo devolverá a los  $40^\circ$ , y finalmente, el tercer doblez lo regresará nuevamente a la horizontal, donde se conectará con la extensión giratoria, como se muestra en la Figura 73.

**Primera Distancia entre Pernos ( $a_c$ ).** En la vista frontal de la Figura 73 se proyecta el conector hasta la empuñadura, añadiendo un margen para soldar ( $m_s = 10 \text{ mm}$ ), esto da como resultado a una longitud de 130 mm, dentro de la cual se deben distribuir dos pares de uniones empernadas de diámetro 1/4"NC. Como recomendación, el espaciado entre pernos de diámetro 1/4"NC debe ser de aproximadamente 4" (101,6 mm),

$$a_c \approx 101,6 \text{ mm}$$

Sin embargo, tras redondear para facilitar la fabricación, se adopta una medida de:

$$a_c = 100 \text{ mm}$$

**Segunda Distancia entre Pernos ( $b_c$ ).** Depende de las perforaciones que se deben realizar para la unión empernada, las cuales se muestran en el corte A-A de la Figura 73. Esta distancia se calcula como la diferencia entre el ancho de 75 mm del conector y los dos espaciados libres ( $e$ ), como se indica en la Ecuación 3.38.

$$b_c = 75 - 2e \quad (3.38)$$

Donde:

$b_x =$  Ancho del conector para la extensión fija, mm

$e =$  Espaciamiento libre, mm

Para calcular el espaciamiento libre, primero es necesario determinar el espaciamiento entre pernos llamado Gage o calibre ( $g$ ). Este valor se obtiene de la Tabla 20 y depende del diámetro del perno ( $d_{p6} = 1/4"NC$ ) que se recomienda asociar a un ángulo de 1" (25,4 mm) de ala.

$$g = 5/8"$$

$$g = 15,875 \text{ mm}$$

El espaciamiento libre se obtiene de la diferencia entre el ala del ángulo asociado (25,4 mm) y el calibre ( $g = 15,875 \text{ mm}$ ) como se indica en la Ecuación 3.39.

$$e \approx 25,4 - g \quad (3.39)$$

Donde:

$e =$  Espaciamiento libre, mm

$g =$  Espaciamiento gage o calibre, mm

$$e \approx 25,4 - 15,875$$

$$e \approx 9,525 \text{ mm}$$

Sin embargo, tras redondear para facilitar la fabricación, se adopta una medida de:

$$e = 10 \text{ mm}$$

Se reemplazan los valores obtenidos en la Ecuación 3.38:

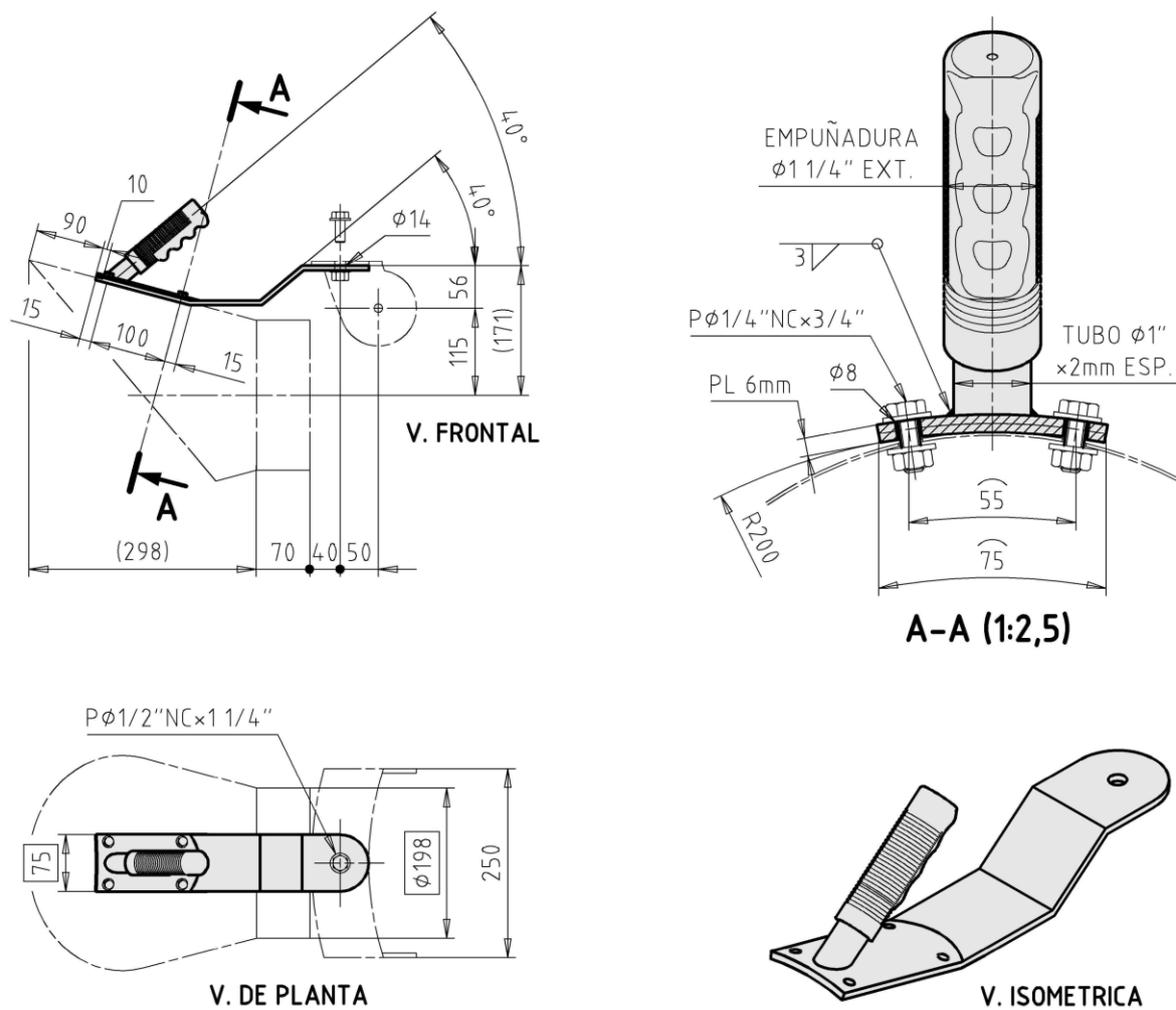
$$b_c = 75 - 2 \cdot 10$$

$$b_c = 55$$

El diseño de la extensión giratoria del brazo con la campana de extracción queda definido con todas las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 74. El desarrollo de este componente, con un espesor de 6 mm, se muestra en la Figura 75.

**Figura 74**

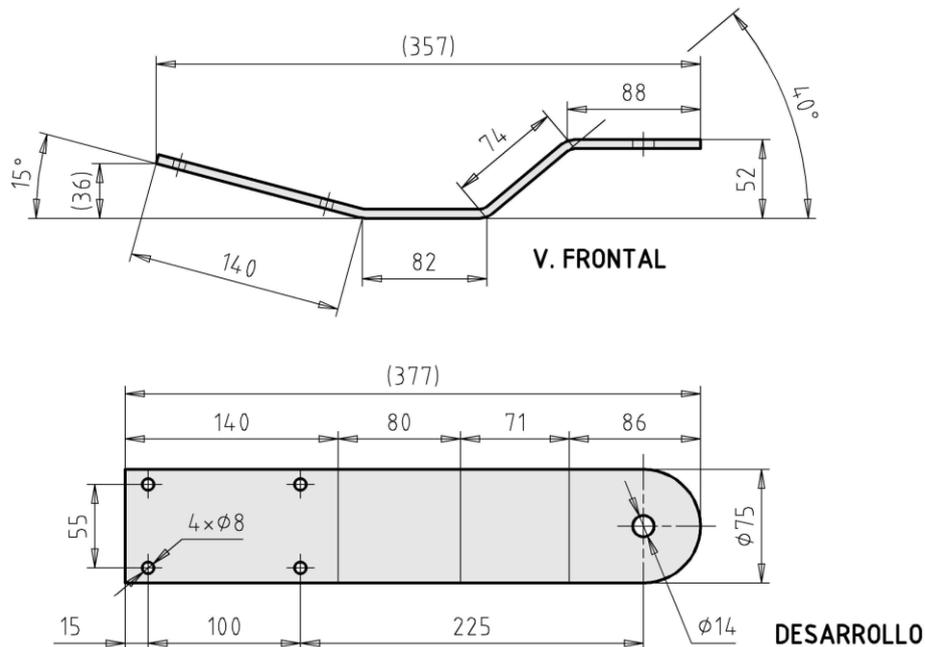
*Diseño del conector para la campana del brazo con la campana de extracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 75**

*Desarrollo del conector para la campana del brazo con la campana de extracción*



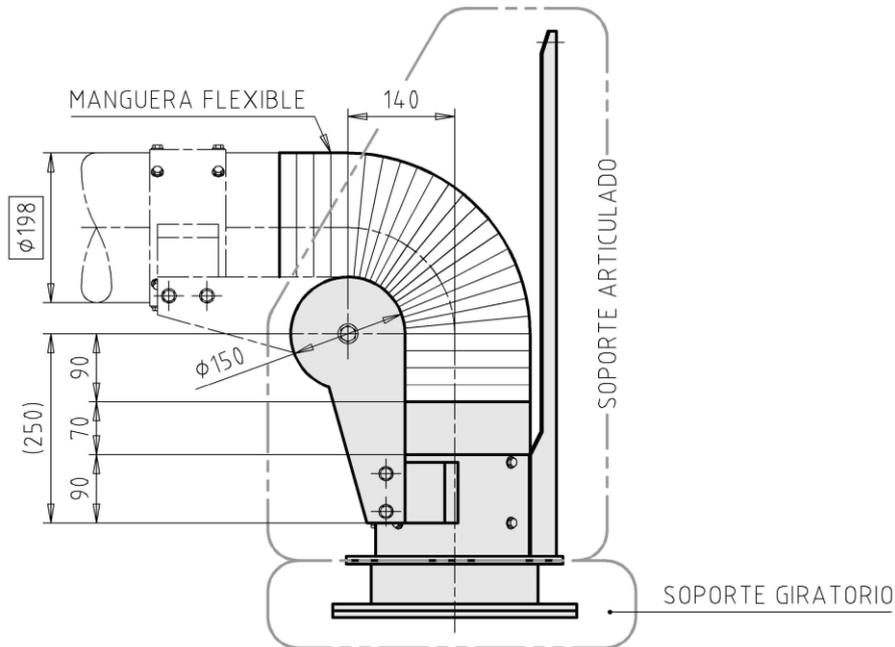
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Articulación de la Base Giratoria.** Su diseño sirve para permitir un movimiento de rotación entre todo brazo articulado y el colector, su diseño está basado en la articulación de brazo con brazo, pero con una rotación adicional, como se muestra en la Figura 67. Esta articulación se compone de una manguera flexible, la cual ya fue seleccionada y calculada en el diseño de la articulación de brazo con brazo, por lo que se requiere nuevamente de una manguera flexible de 200 mm de diámetro interior con una longitud alargada de 1600 mm. La parte rígida de la articulación, cuya geometría está definida en la Figura 74, se compone de los siguientes elementos:

- Manguera flexible
- Soporte articulado
- Soporte giratorio

**Figura 76**

*Articulación de la base giratoria*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Manguera Flexible.** Este elemento ya fue seleccionado y calculado en el diseño de la articulación del brazo primario con el secundario. Para esta aplicación, se requiere una manguera flexible con un diámetro interior de 200 mm y una longitud extendida de 1600 mm, lo que asegura la flexibilidad y el rango de movimiento adecuado entre los componentes.

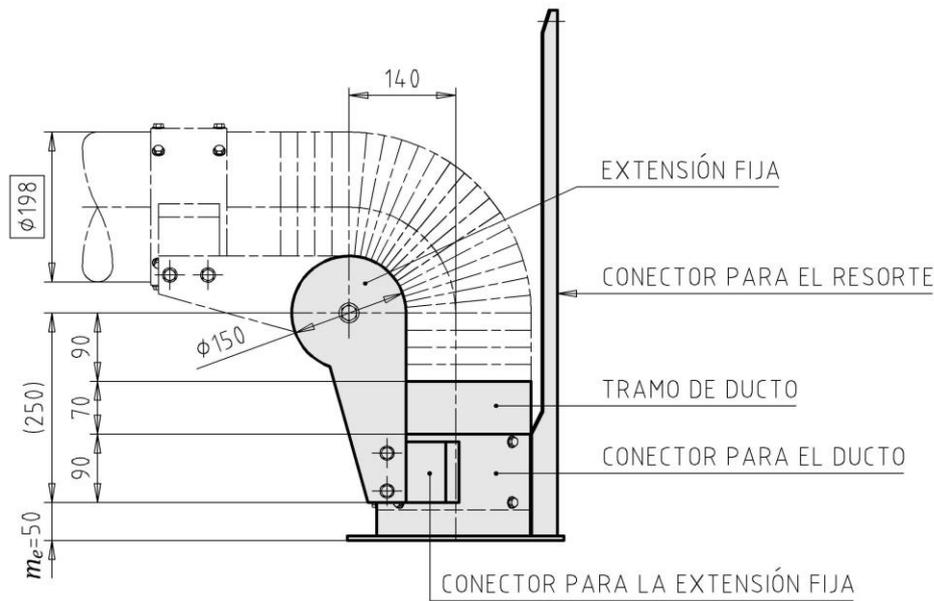
**Soporte Articulado.** Corresponde al eslabonamiento del mecanismo, cuya geometría está definida por las dimensiones previamente calculadas en la articulación del brazo principal con el secundario, como se muestra en la Figura 77. Se compone de cinco elementos:

- Conector para la extensión fija
- Extensión fija
- Tramo de ducto
- Conector para el ducto

- Conector para el resorte

**Figura 77**

*Soporte articulado de la base giratoria*



*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

Dado que los dos primeros componentes mencionados son idénticos a los que conforman la articulación entre el brazo principal y el secundario, en esta etapa solo se procederá con el diseño del tramo de ducto, el conector para el ducto y el conector para el resorte.

**Tramo de Ducto.** Se requiere una longitud del mismo ducto utilizado en los brazos para fijar la manguera flexible. Este ducto debe tener un diámetro interior de 196 mm, un espesor de 1 mm y, por lo tanto, un diámetro exterior de 198 mm.

**Longitud del Tramo de Ducto. ( $L_t$ ).** La longitud total del tramo de ducto será la suma de la longitud del ducto de acople ( $L_a$ ) necesario para fijar la manguera flexible, y la longitud del conector para el ducto ( $L_x$ ), como se indica en la Ecuación 3.40.

$$L_t = L_a + L_x \quad (3.40)$$

Donde:

$L_t =$  Longitud del tramo de ducto, mm

$L_a =$  Longitud del ducto de acople, mm

$L_x =$  Longitud del conector para el ducto, mm

$$L_t = 70 + 100$$

$$L_t = 170 \text{ mm}$$

**Conector para el Ducto.** Como se muestra en la Figura 78, la única diferencia entre este conector para el ducto y el utilizado en la articulación del brazo principal con el secundario es que, en este caso, se debe incluir una prolongación adicional para permitir la inserción de una brida. Esta brida se acoplará al soporte giratorio. Este ajuste se realiza porque es necesario cambiar el material a uno más resistente, debido al desgaste superficial que sufrirá el soporte giratorio, el cual actúa como un rodamiento. El aluminio 1050, que se usa en otras partes, se desgastaría prematuramente en esta función.

**Altura del Conector ( $h_c$ ).** Se obtiene de la Figura 78, como la suma de todas las alturas involucradas en el conector, incluyendo al margen para empernar ( $m_e$ ) el cual debe ser igual a 50 mm para facilitar su montaje, como se indica en la Ecuación 3.41.

$$h_c = m_e + 80 + 10 \quad (3.41)$$

Donde:

$h_c =$  Altura del conector para el ducto de la base giratoria, mm

$m_e =$  Margen para empernar, mm

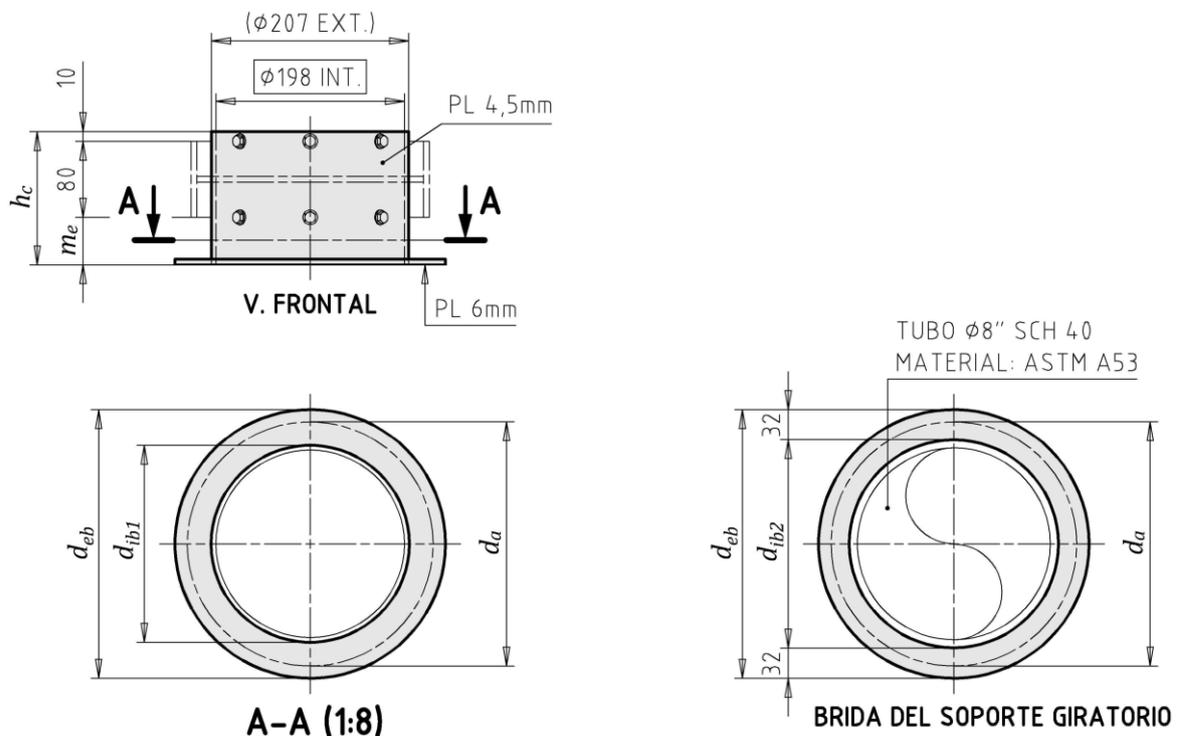
$$h_c = 50 + 80 + 10$$

$$h_c = 140 \text{ mm}$$

**Brida del Conector.** Como se muestra en la Figura 78, donde  $h_c$  es la altura del conector,  $m_e$  es el margen para emperrar,  $d_{eb}$  es el diámetro exterior de la brida,  $d_{ib1}$  es el diámetro interior de la brida 1,  $d_{ib2}$  es el diámetro interior de la brida 2 y  $d_a$  es el diámetro del eje de los agujeros para los pernos. Esta brida, fabricada en aluminio 1050 con un espesor de 6 mm, se conectará a la brida del soporte giratorio, la cual será de acero ASTM A36. La brida depende del tubo de acero al que será soldada, el cual se adquiere comúnmente en acero ASTM A53. Este tubo tiene un diámetro exterior normado, y para garantizar una resistencia consistente, se seleccionará un espesor de tubo sin costura de cédula 40 (SCH 40), el cual se elegirá de la Tabla 21, tomando el diámetro que más se aproxime al diámetro interior del brazo articulado (196 mm).

**Figura 78**

*Conector para el ducto de la base giratoria*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 21***Espesor de tubos de Acero al Carbono*

Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	SCH 40		SCH 80	
		Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)
5"	141,30	6,55	128,20	9,53	122,25
6"	168,28	7,11	154,05	10,97	146,33
8"	219,08	8,18	202,72	12,70	193,68
10"	273,05	9,27	254,51	15,09	242,93
12"	323,85	10,31	303,23	17,48	288,95

*Nota. Fuente. ASME B36.10M-2022: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe, por American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2022b.*

**Diámetro Interior de la Brida 1 ( $d_{ib1}$ ).** El diámetro interior de la brida será 1 mm mayor que el diámetro exterior del ducto en el que debe encajar (207 mm), para facilitar su fabricación.

$$d_{ib1} = 208 \text{ mm}$$

**Diámetro Interior de la Brida 2 ( $d_{ib2}$ ).** De la Tabla 21, se selecciona el tubo de diámetro nominal 8", cuyo diámetro exterior es de 219 mm, similar al diámetro utilizado en los ductos. El diámetro interior de la brida será 1 mm más que este diámetro para poder encajar con facilidad.

$$d_{ib2} = 220 \text{ mm}$$

**Diámetro Exterior de la Brida ( $d_{eb}$ ).** Este diámetro es común a ambas bridas y se define como el diámetro interior de la brida 2 más dos veces el tamaño del ala de la brida, como se indica en la Ecuación 3.42. Para este diámetro de tubo, se recomienda fijar el valor del ala de la brida en 1 1/4" (31,75 mm), redondeando a 32 mm, como se muestra en la Figura 78.

$$d_{eb} = d_{ib2} + 2(32) \tag{3.42}$$

Donde:

$d_{eb}$  = Diámetro exterior de la brida, mm

$d_{ib2}$  = Diámetro interior de la brida 2, mm

$$d_{eb} = 220 + 2(32)$$

$$d_{eb} = 284 \text{ mm}$$

**Diámetro del Eje de los Agujeros para los Pernos ( $d_a$ ).** Este diámetro es común a ambas bridas y se define como el diámetro exterior de la brida menos dos veces el espaciamiento libre para la unión emperrada, como se indica en la Ecuación 3.43. Se recomienda que este espaciamiento, para el tamaño de ala de 1 1/4" sea de 1/2", redondeado a 13 mm, según lo indicado en la Tabla 20.

$$d_a = d_{eb} - 2(13) \quad (3.43)$$

Donde:

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$d_{eb}$  = Diámetro exterior de la brida, mm

$$d_a = 284 - 2(13)$$

$$d_a = 258 \text{ mm}$$

**Unión Emperrada ( $p_7$ ).** Los pernos deben fijar a ambas bridas y deben distribuirse uniformemente alrededor del diámetro del eje de los agujeros para los pernos. Se recomienda que el diámetro de los pernos, para el tamaño de ala de 1 1/4" sea de 5/16"NC (7,9375 mm)

$$d_{p7} = 5/16"NC$$

Como recomendación, el espaciamiento entre pernos de diámetro 5/16"NC debe ser de aproximadamente 6", pero al tratarse de una brida no convencional (de aluminio) y sometida a todo el peso del brazo, se aumentará su resistencia adoptando un espaciamiento de 4" (101,6 mm) como se indica en la Ecuación 3.44.

$$n_{p7} \approx \frac{\pi \cdot d_a}{101,6} \quad (3.44)$$

Donde:

$n_{p7}$  = Número de pernos de la unión emperrada p7, debe ser par

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$$n_{p7} \approx \frac{\pi \cdot 258}{101,6}$$

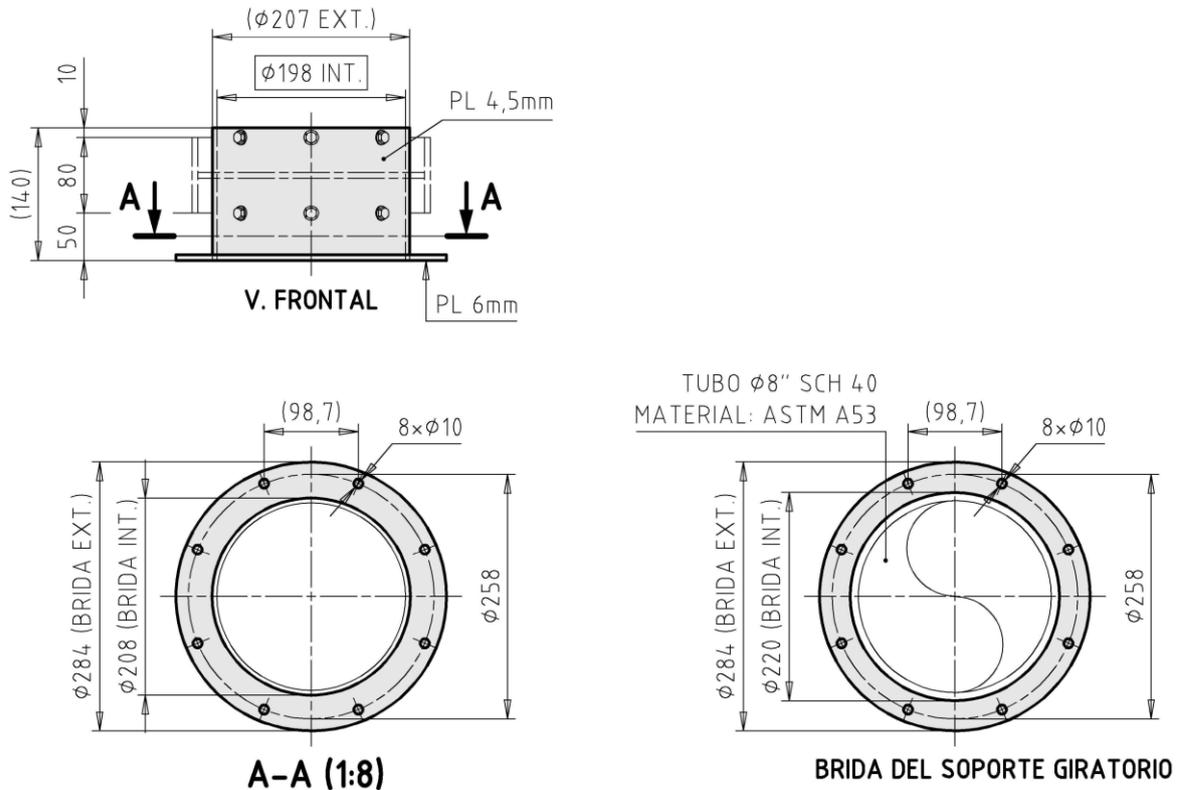
$$n_{p7} \approx 7,978$$

$$n_{p7} = 8$$

El resultado obtenido es de 8 pernos distribuidos uniformemente en la brida como se muestra en la Figura 79, donde se presenta el diseño del conector para el ducto de la base giratoria.

**Figura 79**

*Diseño del conector para el ducto de la base giratoria*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Conector para el Resorte.** Su función principal es permitir el anclaje de un resorte a tracción en la parte superior, con el objetivo de equilibrar las cargas que tienden a volcar el brazo articulado. Este componente se muestra en la Figura 80. Se soldará al conector para el ducto, formando un único cuerpo resistente.

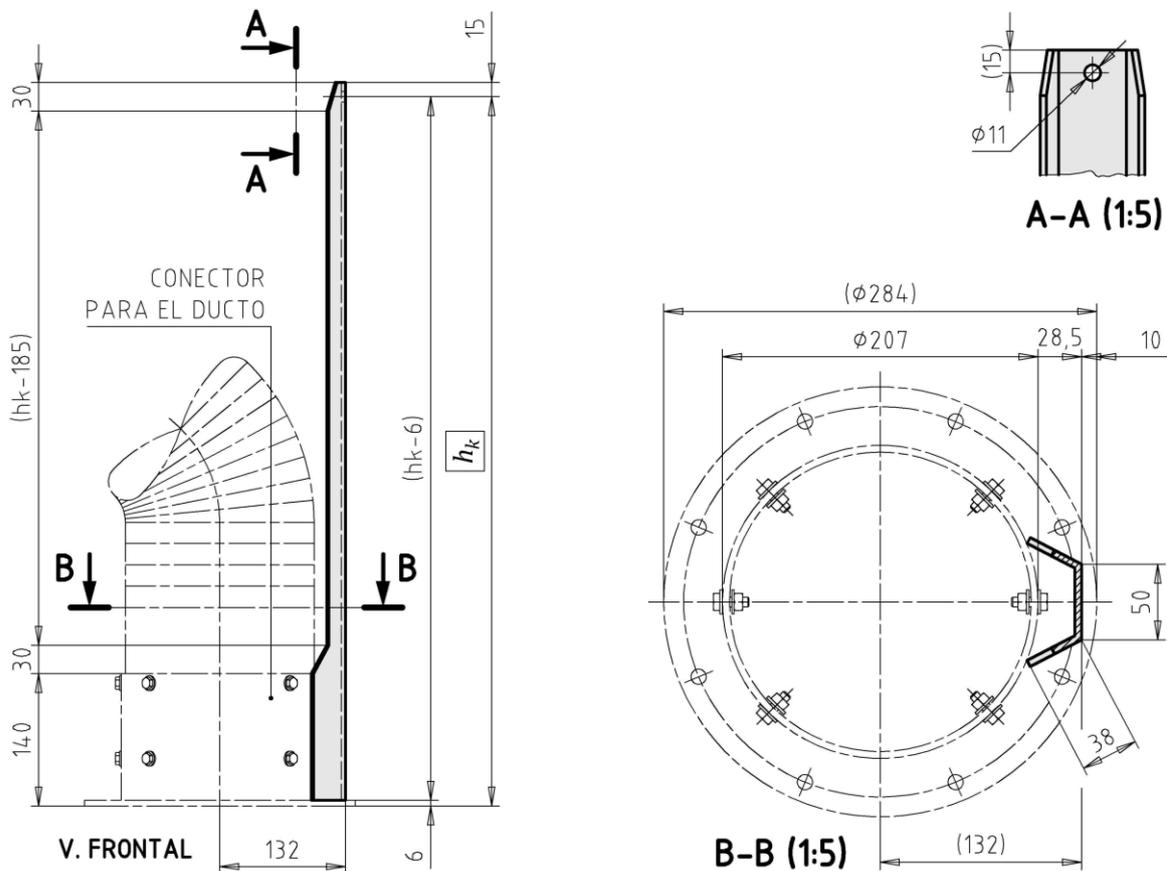
El diseño del conector se compone de un único elemento de plancha con dobleces que refuerzan su estructura. Dado que este elemento se suelda a la brida del conector para el ducto, el espacio disponible es limitado para evitar interferir con las uniones empernadas. Se deja un margen de 10 mm (como se muestra en la Figura 80) para permitir la soldadura alrededor del conector. El perfil del conector tiene forma de "C", con una altura de 50 mm y dos alas de 38 mm cada una, que se abren en un ángulo específico para acoplarse al

conector del ducto sin superar el margen de 10 mm. Debido a estas dimensiones, el espesor del componente se reduce a 4,5 mm en lugar de 6 mm.

Este componente puede considerarse como una columna en voladizo, por lo que debe ser más robusto en su parte inferior que en la superior. Para lograr esto, el perfil en "C" se reduce progresivamente. Primero, a los 140 mm de altura, el ala de 38 mm se reduce a 20 mm para evitar interferencias con la manguera flexible. Luego, en los últimos 30 mm de altura, el ala se reduce nuevamente de 20 mm a 10 mm. En esta sección final, se incorpora un agujero de 11 mm de diámetro que permite la conexión de un resorte a tracción, como se muestra en la Figura 80. La altura de conexión del resorte, representada como  $h_k$ , se determinará posteriormente mediante un análisis estático.

**Figura 80**

*Diseño del conector para el resorte*

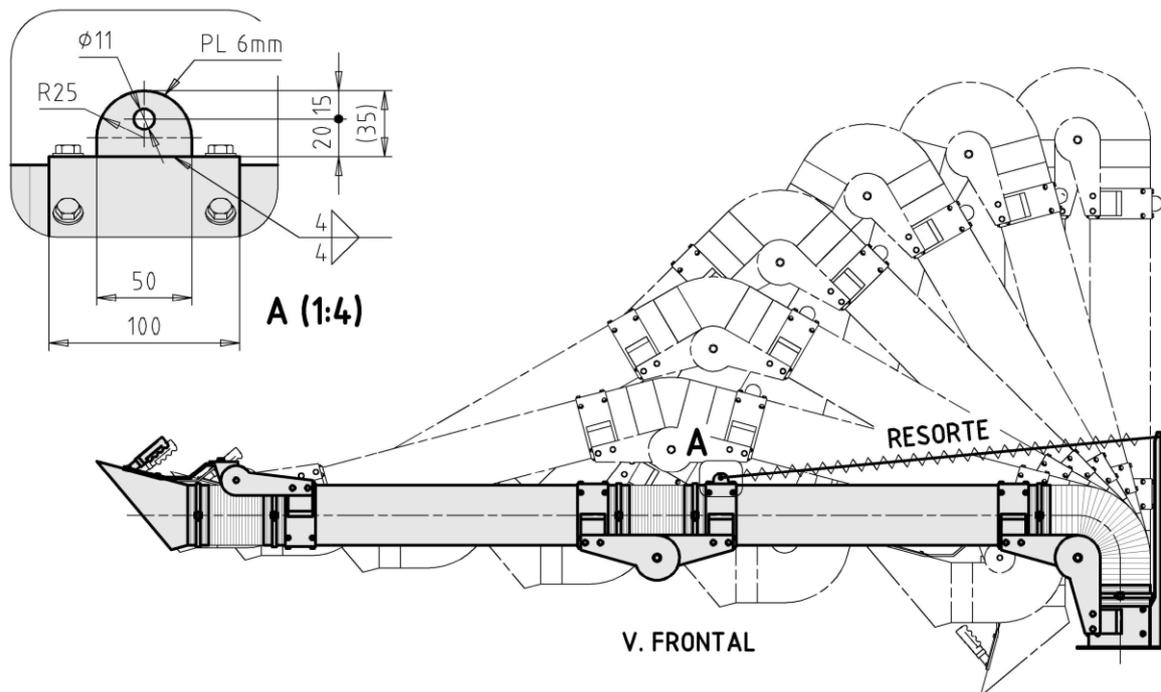


Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Resorte.** Antes de proceder con la selección del resorte de tracción, se requiere de establecer a sus puntos de anclaje, los cuales no deben interrumpir el movimiento natural del brazo articulado. El primer punto de anclaje está situado en la parte más alta del conector para el resorte mostrado en la Figura 80, donde se ubica un agujero de 11 mm de diámetro. El segundo punto de anclaje se incorporará al brazo primario como se muestra en la Figura 81, también posee un agujero de 11 mm de diámetro y estará fabricado con un espesor de 6 mm de aluminio 1050, soldado en el medio del conector del ducto, los espaciamientos están acordes con la Tabla 20 para un ángulo de ala de aproximadamente de 1 1/2" con valores redondeados.

**Figura 81**

*Punto de anclaje del resorte en el brazo primario*

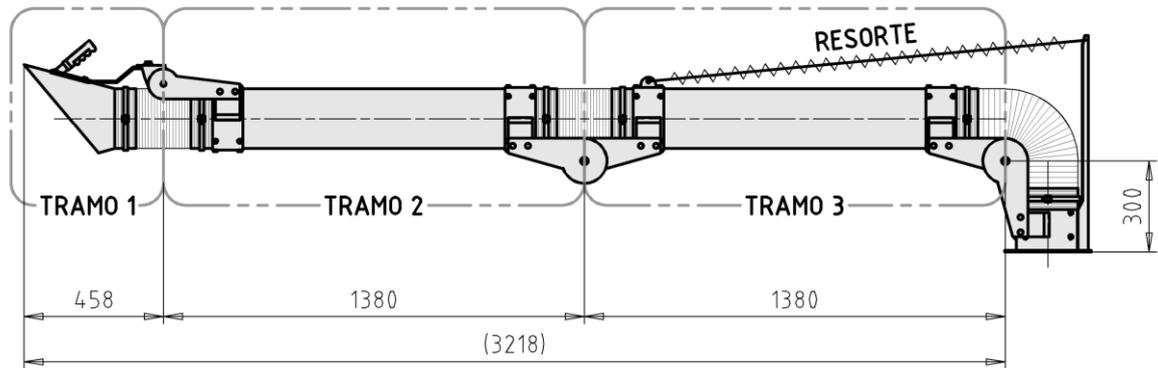


*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

Para seleccionar adecuadamente el resorte a tracción se requiere realizar un análisis estático del mecanismo, para ello se dividirá al brazo articulado en tres tramos, como se muestra en la Figura 82.

**Figura 82**

*División del brazo articulado en tramos*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Tramo 1.** Corresponde a la campana de extracción y todos sus elementos involucrados. Se clasifica a cada componente por su tipo de material y, por medio del Software AutoCAD (Autodesk, 2024) Se obtienen los centroides y volúmenes que ocupan todos los componentes de aluminio 1050, las uniones empernadas de acero ASTM A325 galvanizado, las abrazaderas de acero inoxidable AISI 304 y el tramo de manguera flexible de poliuretano con alambre de acero cobreado como se muestra en la Figura 83.

Se procede a determinar el peso de cada uno de los cuatro componentes del tramo 2, con el uso de las Ecuaciones 3.45 y 3.46, el peso de la funda ergonómica de silicona será despreciado.

$$W = \rho \cdot g \cdot V \quad (3.45)$$

Donde:

$W$  = Peso del componente, N

$\rho$  = Densidad del material,  $\text{kg/m}^3$

$g$  = Aceleración de la gravedad,  $\text{m}^2/\text{s}$

$V$  = Volumen,  $\text{m}^3$

$$W = \rho_L \cdot g \cdot L \quad (3.46)$$

Donde:

$W$  = Peso del componente, N

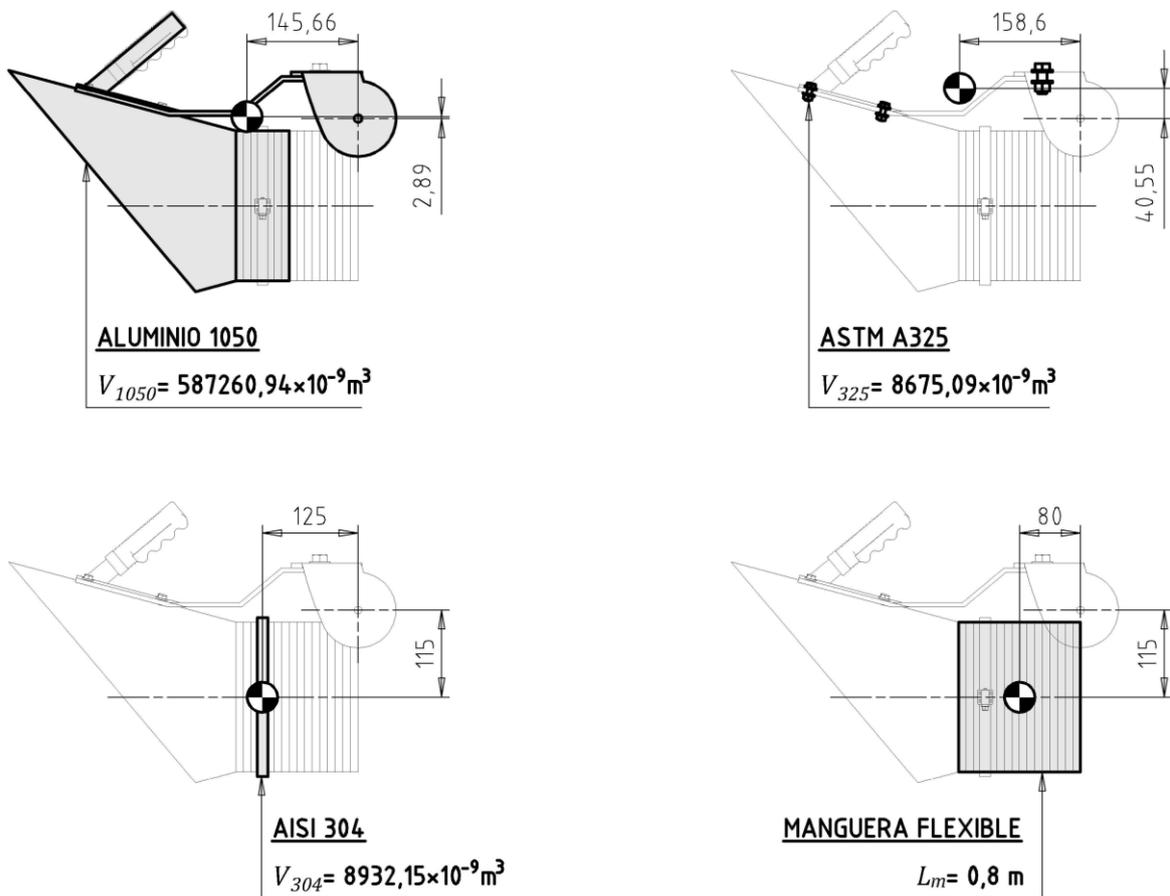
$\rho_L$  = Densidad lineal del material, kg/m

$g$  = Aceleración de la gravedad, m<sup>2</sup>/s

$L$  = Longitud, m

**Figura 83**

*Centroides y volúmenes del tramo 1 clasificados por material*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Peso del Aluminio 1050 en el Tramo 1.** Considerando a la densidad del aluminio 1050 como 2710 kg/m<sup>3</sup> como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como 9,81 m<sup>2</sup>/s y al volumen mostrado en la Figura 83, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{1050} = 2710 \cdot 9,81 \cdot 587260,94 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{1050} = 15,612 \text{ N}$$

**Peso del Acero ASTM A325 en el Tramo 1.** Considerando a la densidad del acero galvanizado ASTM A325 como 7850 kg/m<sup>3</sup> como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como 9,81 m<sup>2</sup>/s y al volumen mostrado en la Figura 83, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{325} = 7850 \cdot 9,81 \cdot 8675,09 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{325} = 0,668 \text{ N}$$

**Peso del Acero AISI 304 en el Tramo 1.** Considerando a la densidad del acero 304 como 7930 kg/m<sup>3</sup> como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como 9,81 m<sup>2</sup>/s y al volumen mostrado en la Figura 83, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{304} = 7930 \cdot 9,81 \cdot 8932,15 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{304} = 0,695 \text{ N}$$

**Peso de la Manguera Flexible en el Tramo 1.** Considerando a la densidad lineal de la manguera flexible como 1,02 kg/m como se indica en la Tabla 10, a la aceleración de la gravedad como 9,81 m<sup>2</sup>/s y a la longitud mostrada en la Figura 83, se obtiene de la Ecuación 3.43:

$$W_m = 1,02 \cdot 9,81 \cdot 0,8$$

$$W_m = 8,005 \text{ N}$$

**Peso del Tramo 1.** Es la sumatoria de todos los pesos obtenidos anteriormente, como se indica en la Ecuación 3.47:

$$W_{b1} = W_{1050} + W_{325} + W_{304} + W_m \quad (3.47)$$

Donde:

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 1, N

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 1, N

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 1, N

$W_m$  = Peso de la manguera flexible en el tramo 1, N

$$W_{b1} = 15,612 + 0,668 + 0,695 + 8,005$$

$$W_{b1} = 24,98 \text{ N}$$

**Centroide del Tramo 1.** Se obtiene de las Ecuaciones 3.48 y 3.49, las cuales relacionan al centroide de cada material con sus respectivos pesos para unificarlos en un solo centroide.

$$\bar{x}_{b1} = \frac{\bar{x}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{x}_{325} \cdot W_{325} + \bar{x}_{304} \cdot W_{304} + \bar{x}_m \cdot W_m}{W_{b1}} \quad (3.48)$$

Donde:

$\bar{x}_{b1}$  = Distancia horizontal del centroide del tramo 1, mm

$\bar{x}_{1050}$  = Distancia horizontal del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 1, N

$\bar{x}_{325}$  = Distancia horizontal del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 1, N

$\bar{x}_{304}$  = Distancia horizontal del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 1, N

$\bar{x}_m$  = Distancia horizontal del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 1, N

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$$\bar{x}_{b1} = \frac{-145,66 \cdot 15,612 - 158,6 \cdot 0,668 - 125 \cdot 0,695 - 80 \cdot 8,005}{24,98}$$

$$\bar{x}_{b1} = -124,39 \text{ mm}$$

$$\bar{z}_{b1} = \frac{\bar{z}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{z}_{325} \cdot W_{325} + \bar{z}_{304} \cdot W_{304} + \bar{z}_m \cdot W_m}{W_{b1}} \quad (3.49)$$

Donde:

$\bar{z}_{b1}$  = Distancia vertical del centroide del tramo 1, mm

$\bar{z}_{1050}$  = Distancia vertical del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 1, N

$\bar{z}_{325}$  = Distancia vertical del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 1, N

$\bar{z}_{304}$  = Distancia vertical del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 1, N

$\bar{z}_m$  = Distancia vertical del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 1, N

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

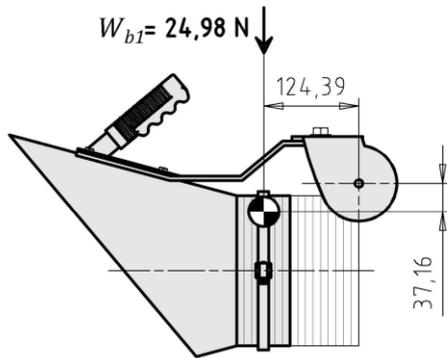
$$\bar{z}_{b1} = \frac{2,89 \cdot 15,612 + 40,55 \cdot 0,668 + 115 \cdot 0,695 + 115 \cdot 8,005}{24,98}$$

$$\bar{z}_{b1} = -37,16 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos, tanto del peso como de la ubicación del centroide del tramo 1 se representan en la Figura 84.

**Figura 84**

*Peso y centroide del tramo 1*



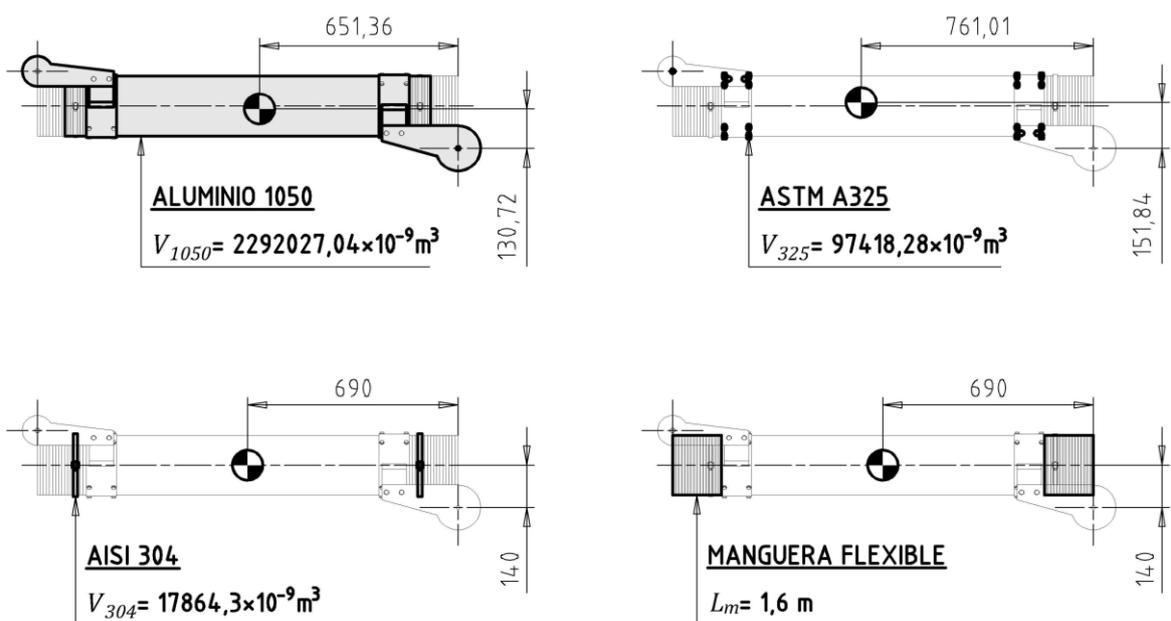
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Tramo 2.** Corresponde al brazo secundario y todos sus elementos involucrados.

Se clasifica a cada componente por su tipo de material y, por medio del Software AutoCAD (Autodesk, 2024) Se obtienen los centroides y volúmenes que ocupan todos los componentes de aluminio 1050, las uniones empernadas de acero ASTM A325 galvanizado, las abrazaderas de acero inoxidable AISI 304 y el tramo de manguera flexible de poliuretano con alambre de acero cobreado como se muestra en la Figura 85.

**Figura 85**

*Centroides y volúmenes del tramo 2 clasificados por material.*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Se procede a determinar el peso de cada uno de los cuatro componentes del tramo 1, con el uso de las Ecuaciones 3.45 y 3.46.

**Peso del Aluminio 1050 en el Tramo 2.** Considerando a la densidad del aluminio 1050 como  $2710 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 85, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{1050} = 2710 \cdot 9,81 \cdot 2292027,04 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{1050} = 60,934 \text{ N}$$

**Peso del Acero ASTM A325 en el Tramo 2.** Considerando a la densidad del acero galvanizado ASTM A325 como  $7850 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 85, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{325} = 7850 \cdot 9,81 \cdot 97418,28 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{325} = 7,502 \text{ N}$$

**Peso del Acero AISI 304 en el Tramo 2.** Considerando a la densidad del acero 304 como  $7930 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 85, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{304} = 7930 \cdot 9,81 \cdot 17864,3 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{304} = 1,39 \text{ N}$$

**Peso de la Manguera Flexible en el Tramo 2.** Considerando a la densidad lineal de la manguera flexible como  $1,02 \text{ kg/m}$  como se indica en la Tabla 10, a la aceleración de

la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y a la longitud mostrada en la Figura 85, se obtiene de la Ecuación 3.43:

$$W_m = 1,02 \cdot 9,81 \cdot 1,6$$

$$W_m = 16,01 \text{ N}$$

**Peso del Tramo 2.** Es la sumatoria de todos los pesos obtenidos anteriormente, como se indica en la Ecuación 3.50:

$$W_{b2} = W_{1050} + W_{325} + W_{304} + W_m \quad (3.50)$$

Donde:

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 2, N

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 2, N

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 2, N

$W_m$  = Peso de la manguera flexible en el tramo 2, N

$$W_{b2} = 60,934 + 7,502 + 1,39 + 16,01$$

$$W_{b2} = 85,836 \text{ N}$$

**Centroide del Tramo 2.** Se obtiene de las Ecuaciones 3.51 y 3.52, las cuales relacionan al centroide de cada material con sus respectivos pesos para unificarlos en un solo centroide.

$$\bar{x}_{b2} = \frac{\bar{x}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{x}_{325} \cdot W_{325} + \bar{x}_{304} \cdot W_{304} + \bar{x}_m \cdot W_m}{W_{b2}} \quad (3.51)$$

Donde:

$\bar{x}_{b2}$  = Distancia horizontal del centroide del tramo 2, mm

$\bar{x}_{1050}$  = Distancia horizontal del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 2, N

$\bar{x}_{325}$  = Distancia horizontal del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 2, N

$\bar{x}_{304}$  = Distancia horizontal del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 2, N

$\bar{x}_m$  = Distancia horizontal del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 2, N

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$$\bar{x}_{b2} = \frac{-651,36 \cdot 60,934 - 761,01 \cdot 7,502 - 690 \cdot 1,39 - 690 \cdot 16,01}{85,836}$$

$$\bar{x}_{b2} = -668,78 \text{ mm}$$

$$\bar{z}_{b2} = \frac{\bar{z}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{z}_{325} \cdot W_{325} + \bar{z}_{304} \cdot W_{304} + \bar{z}_m \cdot W_m}{W_{b2}} \quad (3.52)$$

Donde:

$\bar{z}_{b2}$  = Distancia vertical del centroide del tramo 2, mm

$\bar{z}_{1050}$  = Distancia vertical del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 2, N

$\bar{z}_{325}$  = Distancia vertical del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 2, N

$\bar{z}_{304}$  = Distancia vertical del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 2, N

$\bar{z}_m$  = Distancia vertical del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 2, N

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

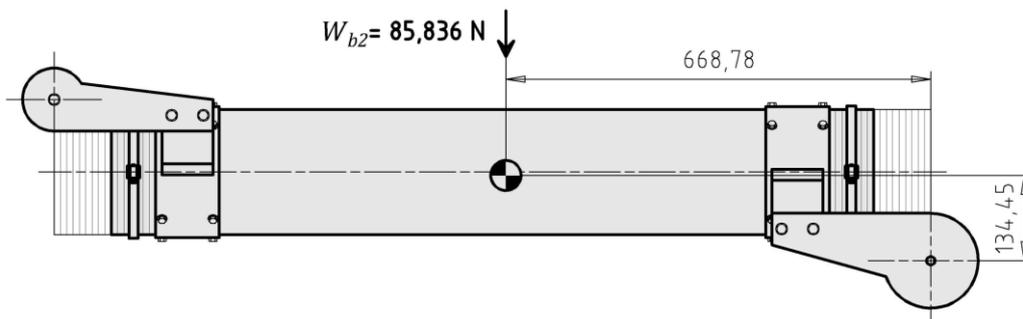
$$\bar{z}_{b1} = \frac{130,72 \cdot 60,934 + 151,84 \cdot 7,502 + 140 \cdot 1,39 + 140 \cdot 16,01}{85,836}$$

$$\bar{z}_{b1} = 134,45 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos, tanto del peso como de la ubicación del centroide del tramo 2 se representan en la Figura 86.

**Figura 86**

*Peso y centroide del tramo 2*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Tramo 3.** Corresponde al brazo primario y todos sus elementos involucrados. Se clasifica a cada componente por su tipo de material y, por medio del Software AutoCAD (Autodesk, 2024) Se obtienen los centroides y volúmenes que ocupan todos los componentes de aluminio 1050, las uniones empernadas de acero ASTM A325 galvanizado, las abrazaderas de acero inoxidable AISI 304 y el tramo de manguera flexible de poliuretano con alambre de acero cobreado como se muestra en la Figura 85.

Se procede a determinar el peso de cada uno de los cuatro componentes del tramo 3, con el uso de las Ecuaciones 3.45 y 3.46.

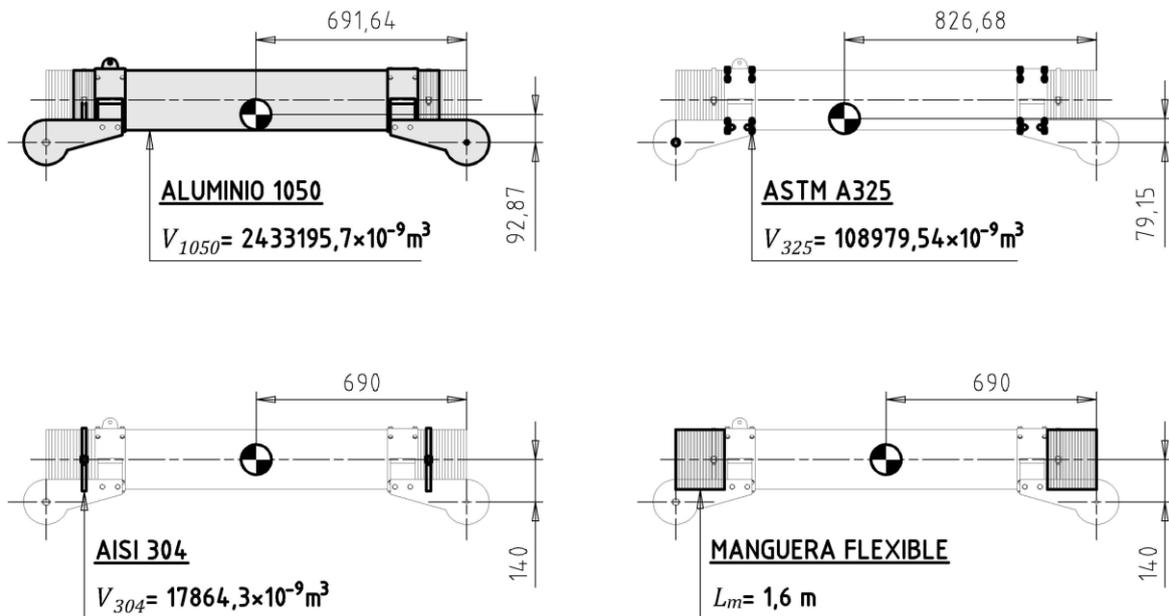
**Peso del Aluminio 1050 en el Tramo 3.** Considerando a la densidad del aluminio 1050 como  $2710 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 87, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{1050} = 2710 \cdot 9,81 \cdot 2433195,7 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{1050} = 64,687 \text{ N}$$

**Figura 87**

*Centroides y volúmenes del tramo 3 clasificados por material*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Peso del Acero ASTM A325 en el Tramo 3.** Considerando a la densidad del acero galvanizado ASTM A325 como  $7850 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 87, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{325} = 7850 \cdot 9,81 \cdot 108979,54 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{325} = 8,392 \text{ N}$$

**Peso del Acero AISI 304 en el Tramo 3.** Considerando a la densidad del acero 304 como  $7930 \text{ kg/m}^3$  como se indica en la Tabla 9, a la aceleración de la gravedad como  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$  y al volumen mostrado en la Figura 87, se obtiene de la Ecuación 3.42:

$$W_{304} = 7930 \cdot 9,81 \cdot 17864,3 \cdot 10^{-9}$$

$$W_{304} = 1,39 \text{ N}$$

**Peso de la Manguera Flexible en el Tramo 3.** Considerando a la densidad lineal de la manguera flexible como 1,02 kg/m como se indica en la Tabla10, a la aceleración de la gravedad como 9,81 m<sup>2</sup>/s y a la longitud mostrada en la Figura 87, se obtiene de la Ecuación 3.43:

$$W_m = 1,02 \cdot 9,81 \cdot 1,6$$

$$W_m = 16,01 \text{ N}$$

**Peso del Tramo 3.** Es la sumatoria de todos los pesos obtenidos anteriormente, como se indica en la Ecuación 3.53:

$$W_{b3} = W_{1050} + W_{325} + W_{304} + W_m \quad (3.53)$$

Donde:

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 3, N

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 3, N

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 3, N

$W_m$  = Peso de la manguera flexible en el tramo 3, N

$$W_{b3} = 64,687 + 8,392 + 1,39 + 16,01$$

$$W_{b3} = 90,479 \text{ N}$$

**Centroide del Tramo 3.** Se obtiene de las Ecuaciones 3.54 y 3.55, las cuales relacionan al centroide de cada material con sus respectivos pesos para unificarlos en un solo centroide.

$$\bar{x}_{b3} = \frac{\bar{x}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{x}_{325} \cdot W_{325} + \bar{x}_{304} \cdot W_{304} + \bar{x}_m \cdot W_m}{W_{b3}} \quad (3.54)$$

Donde:

$\bar{x}_{b3}$  = Distancia horizontal del centroide del tramo 3, mm

$\bar{x}_{1050}$  = Distancia horizontal del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 3, N

$\bar{x}_{325}$  = Distancia horizontal del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 3, N

$\bar{x}_{304}$  = Distancia horizontal del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 3, N

$\bar{x}_m$  = Distancia horizontal del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 3, N

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$$\bar{x}_{b3} = \frac{-691,64 \cdot 64,687 - 826,68 \cdot 8,392 - 690 \cdot 1,39 - 690 \cdot 16,01}{90,479}$$

$$\bar{x}_{b3} = -703,85 \text{ mm}$$

$$\bar{z}_{b3} = \frac{\bar{z}_{1050} \cdot W_{1050} + \bar{z}_{325} \cdot W_{325} + \bar{z}_{304} \cdot W_{304} + \bar{z}_m \cdot W_m}{W_{b3}} \quad (3.55)$$

Donde:

$\bar{z}_{b3}$  = Distancia vertical del centroide del tramo 3, mm

$\bar{z}_{1050}$  = Distancia vertical del centroide del aluminio 1050, mm

$W_{1050}$  = Peso del aluminio 1050 en el tramo 3, N

$\bar{z}_{325}$  = Distancia vertical del centroide del acero ASTM A325, mm

$W_{325}$  = Peso del acero ASTM A325 en el tramo 3, N

$\bar{z}_{304}$  = Distancia vertical del centroide del acero AISI 304, mm

$W_{304}$  = Peso del acero AISI 304 en el tramo 3, N

$\bar{z}_m$  = Distancia vertical del centroide de la manguera, mm

$W_m$  = Peso de la manguera en el tramo 3, N

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

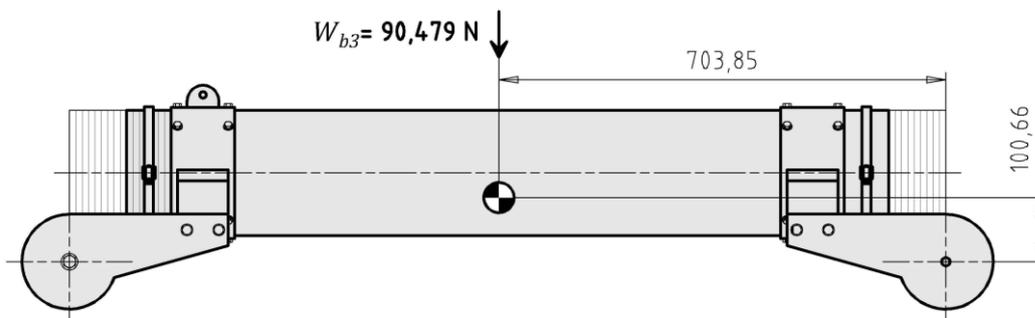
$$\bar{z}_{b3} = \frac{92,87 \cdot 64,687 + 79,15 \cdot 8,392 + 140 \cdot 1,39 + 140 \cdot 16,01}{90,479}$$

$$\bar{z}_{b3} = 100,66 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos, tanto del peso como de la ubicación del centroide del tramo 3 se representan en la Figura 88.

### Figura 88

*Peso y centroide del tramo 3*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

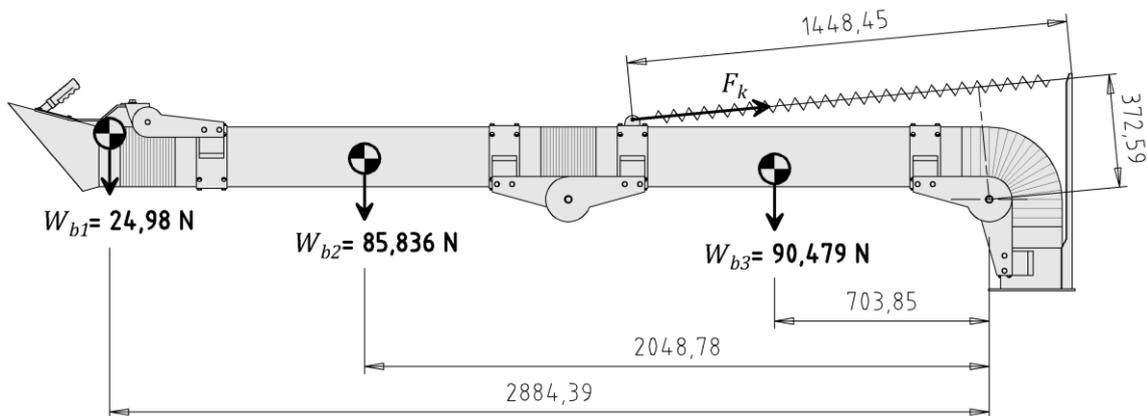
**Fuerza en el Resorte de tracción.** Para determinar la fuerza que actúa en el resorte se deben considerar a varias configuraciones del brazo articulado, en las que, a cada una le corresponde un valor distinto de fuerza así como también una longitud del resorte estirado. Se analizará cada posición del brazo articulado cada  $15^\circ$  con una altura de conexión del resorte, representada como  $h_k$  en la Figura 80, de  $700 \text{ mm}$ , la cual es la distancia mínima para no interferir con el movimiento natural del brazo articulado.

$$h_k = 700 \text{ mm}$$

**Brazo Articulado a 0°.** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a 0° en la Figura 89. En esta posición, el brazo primario está orientado a 0° respecto a la horizontal.

**Figura 89**

Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 0°



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.56.

$$F_{k(0^\circ)} \cdot d_{k(0^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.56)$$

Donde:

$F_{k(0^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a 0°, N

$d_{k(0^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(0^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

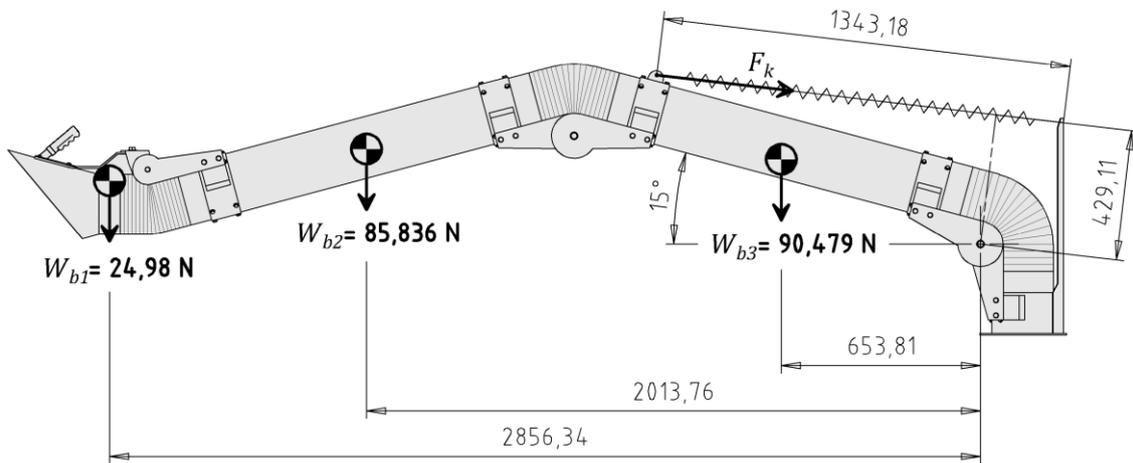
$$F_{k(0^\circ)} \cdot 372,59 = 24,98 \cdot 2884,39 + 85,836 \cdot 2048,78 + 90,479 \cdot 703,85$$

$$F_{k(0^\circ)} = 836,294 \text{ N}$$

**Brazo Articulado a 15°.** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a 15° en la Figura 90. En esta posición, el brazo primario está orientado a 15° respecto a la horizontal.

**Figura 90**

Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 15°



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.57.

$$F_{k(15^\circ)} \cdot d_{k(15^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.57)$$

Donde:

$F_{k(15^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a 15°, N

$d_{k(15^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(15^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

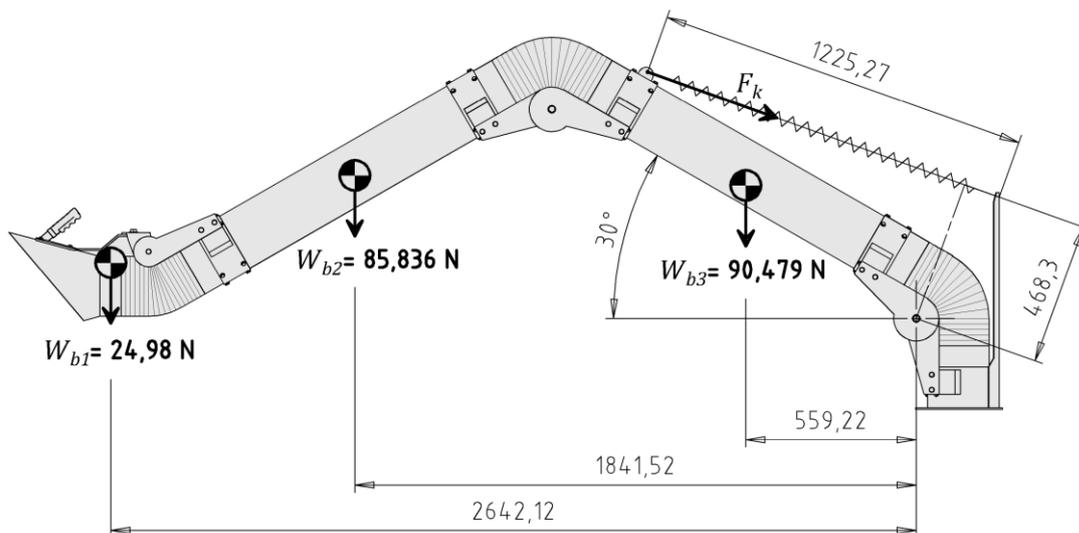
$$F_{k(15^\circ)} \cdot 429,11 = 24,98 \cdot 2856,34 + 85,836 \cdot 2013,76 + 90,479 \cdot 653,81$$

$$F_{k(15^\circ)} = 706,953 \text{ N}$$

**Brazo Articulado a 30°.** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a 30° en la Figura 91. En esta posición, el brazo primario está orientado a 30° respecto a la horizontal.

**Figura 91**

*Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 30°*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.58.

$$F_{k(30^\circ)} \cdot d_{k(30^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.58)$$

Donde:

$F_{k(30^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a  $30^\circ$ , N

$d_{k(30^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(30^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

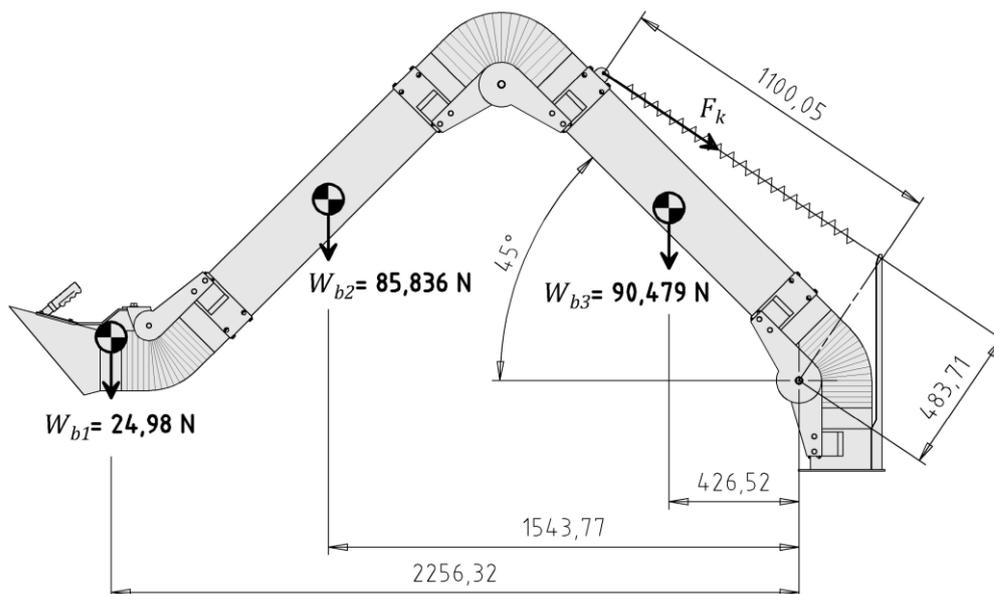
$$F_{k(30^\circ)} \cdot 468,3 = 24,98 \cdot 2642,12 + 85,836 \cdot 1841,52 + 90,479 \cdot 559,22$$

$$F_{k(30^\circ)} = 586,518 \text{ N}$$

**Brazo Articulado a  $45^\circ$ .** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a  $45^\circ$  en la Figura 92. En esta posición, el brazo primario está orientado a  $45^\circ$  respecto a la horizontal.

**Figura 92**

*Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a  $45^\circ$*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.59.

$$F_{k(45^\circ)} \cdot d_{k(45^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.59)$$

Donde:

$F_{k(45^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a  $45^\circ$ , N

$d_{k(45^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(45^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

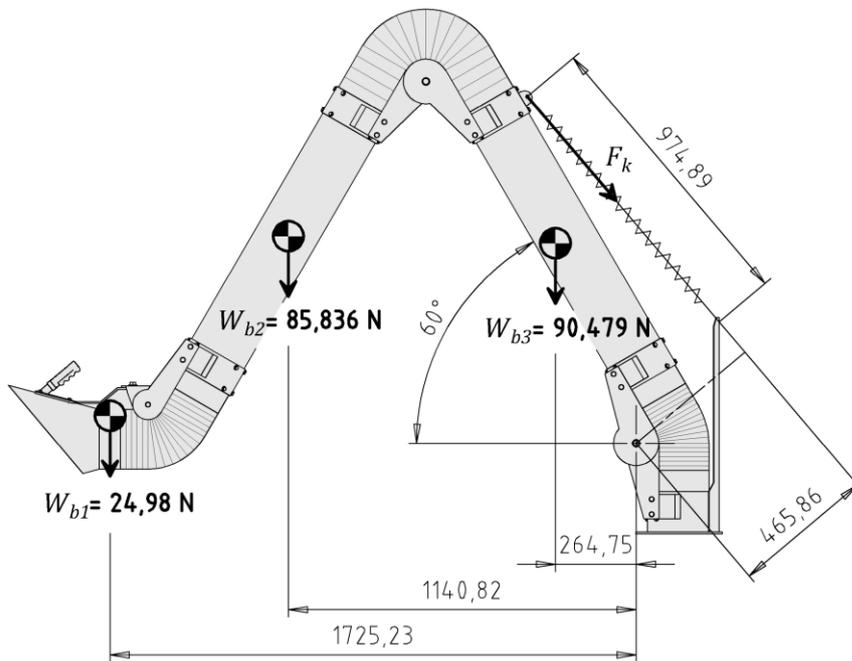
$$F_{k(45^\circ)} \cdot 483,71 = 24,98 \cdot 2256,32 + 85,836 \cdot 1543,77 + 90,479 \cdot 426,52$$

$$F_{k(45^\circ)} = 470,251 \text{ N}$$

**Brazo Articulado a  $60^\circ$ .** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a  $60^\circ$  en la Figura 93. En esta posición, el brazo primario está orientado a  $60^\circ$  respecto a la horizontal.

**Figura 93**

*Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 60°*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.60.

$$F_{k(60^\circ)} \cdot d_{k(60^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.60)$$

Donde:

$F_{k(60^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a 60°, N

$d_{k(60^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(60^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

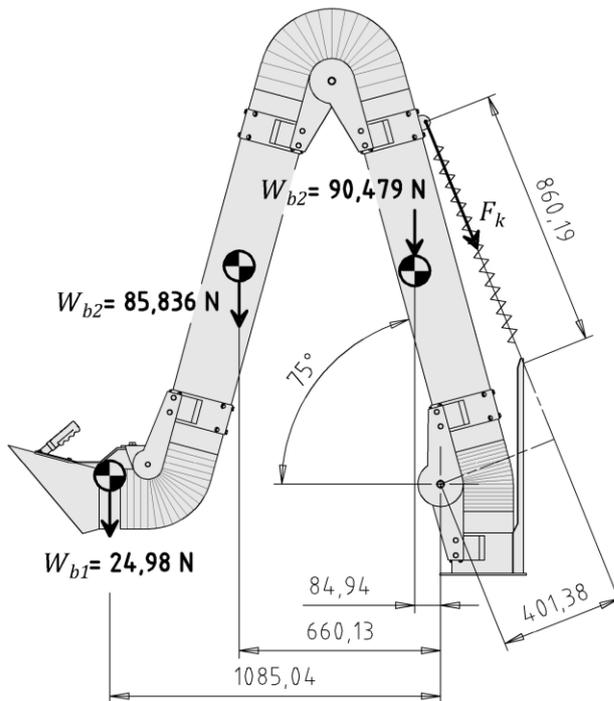
$$F_{k(60^\circ)} \cdot 465,86 = 24,98 \cdot 1725,23 + 85,836 \cdot 1140,82 + 90,479 \cdot 264,75$$

$$F_{k(60^\circ)} = 354,128 \text{ N}$$

**Brazo Articulado a 75°.** Se realiza el diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo articulado a 75° en la Figura 94. En esta posición, el brazo primario está orientado a 75° respecto a la horizontal.

**Figura 94**

Diagrama de cuerpo libre del brazo articulado a 75°



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se realiza el equilibrio de momentos en el Eje Y respecto al eje de rotación, para determinar el valor de la Fuerza en el resorte de tracción, con la Ecuación 3.61.

$$F_{k(75^\circ)} \cdot d_{k(75^\circ)} = W_{b1} \cdot d_{b1} + W_{b2} \cdot d_{b2} + W_{b3} \cdot d_{b3} \quad (3.61)$$

Donde:

$F_{k(75^\circ)}$  = Fuerza en el resorte de tracción con el brazo articulado a 75°, N

$d_{k(75^\circ)}$  = Brazo de momento para  $F_{k(75^\circ)}$ , mm

$W_{b1}$  = Peso del tramo 1, N

$d_{b1}$  = Brazo de momento para  $W_{b1}$ , mm

$W_{b2}$  = Peso del tramo 2, N

$d_{b2}$  = Brazo de momento para  $W_{b2}$ , mm

$W_{b3}$  = Peso del tramo 3, N

$d_{b3}$  = Brazo de momento para  $W_{b3}$ , mm

$$F_{k(75^\circ)} \cdot 401,38 = 24,98 \cdot 1085,04 + 85,836 \cdot 660,13 + 90,479 \cdot 84,94$$

$$F_{k(75^\circ)} = 227,845 \text{ N}$$

Además, como se muestra en la Figura 94, la longitud del resorte estirado con el brazo articulado a  $75^\circ$  es de 860,19 mm

$$L_{k(75^\circ)} = 860,19 \text{ mm}$$

Con los seis valores obtenidos de fuerzas en el resorte de tracción, así como de sus respectivas longitudes estiradas, se elabora una gráfica de longitud vs fuerza como se muestra en la Figura 95, donde se ubica cada par de puntos y se traza una línea recta de tendencia indicada en la Ecuación 3.62.

$$F_k = 1,0098 \cdot L_k - 639,66 \quad (3.62)$$

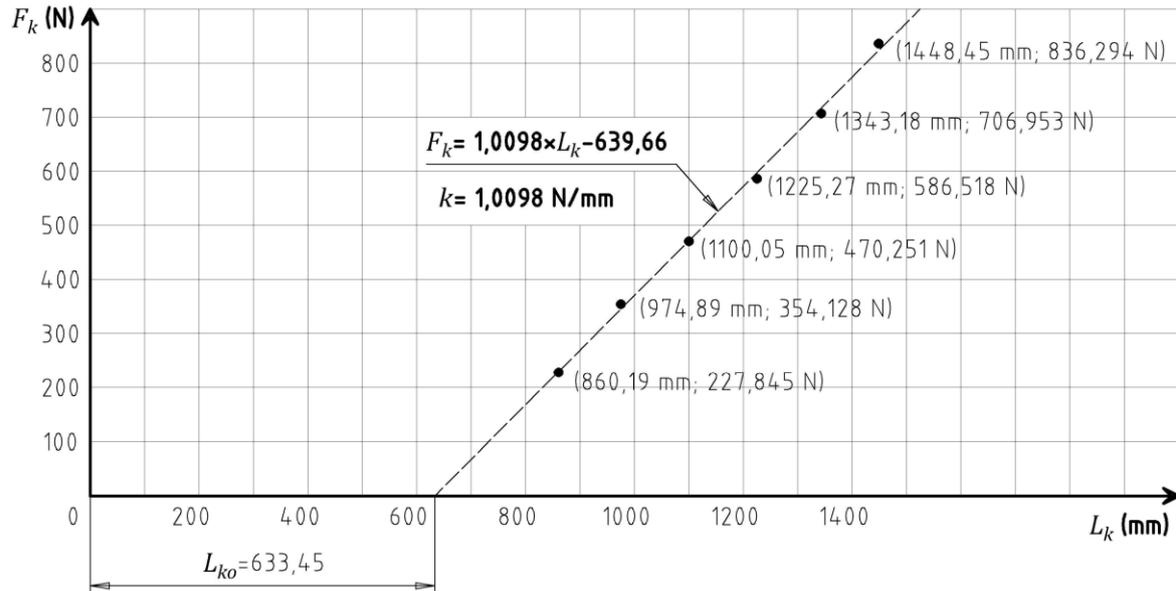
Donde:

$F_k$  = Fuerza en el resorte de tracción, N

$L_k$  = Longitud del resorte estirado, mm

**Figura 95**

*Longitud del resorte estirado vs fuerza en el resorte*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Se sabe que la línea recta de tendencia debe cumplir la ley de Hooke, por ello la constante del resorte ( $k$ ) se determina como la pendiente de la Ecuación 3.59.

$$k = 1,0098 \text{ N/mm}$$

La longitud del resorte sin carga ( $L_{k0}$ ) se determina haciendo a  $F_k$  igual a cero en la Ecuación 3.59:

$$0 = 1,0098 \cdot L_{k0} - 639,66$$

$$L_{k0} = 633,45 \text{ mm}$$

Con los valores obtenidos, se procede a determinar las dimensiones del resorte helicoidal de tracción que cumpla con lo solicitado. Para ello, se establece que el material del resorte será UNE-EN 10270-1, el cual es un acero específico de alambres para resortes mecánicos. Los valores de resistencia mecánica de este tipo de aceros se encuentran en la norma DIN-17223-84, como se indica en la Tabla 22, donde SL indica que el resorte

estará sometido a una tensión estática baja, SM indica que el resorte estará sometido a tensiones estáticas medias altas o algunas tensiones dinámicas, DM indica que el resorte estará sometido a tensiones dinámicas medias altas.

**Tabla 22**

*Resistencia a la tracción en alambres de acero*

Diámetro del alambre (mm)	Resistencia a tracción (MPa)		
	SL	SM	DM
2	1520	1760	1980
3	1410	1630	1840
4	1320	1530	1740
5	1260	1460	1660

*Nota. Fuente. DIN 17223-84: Round Steel Wire for Springs, por Instituto Alemán de Normalización [DIN], 1984.*

Dado que un resorte helicoidal a tracción sin carga tiene a toda su helicoide comprimida, la longitud del resorte sin carga ( $L_{ko}$ ) es equivalente a el número de espiras ( $n_k$ ) por el diámetro del alambre utilizado ( $d_k$ ) más dos veces el diámetro interior, como se muestra en la Figura 96, donde  $D_k$  es el diámetro medio del resorte y  $D_{ke}$  es el diámetro exterior del resorte. Esta equivalencia se indica en la Ecuación 3.63.

$$L_{ko} = n_k \cdot d_k + 2(D_k - d_k) \quad (3.63)$$

Donde:

$L_{ko}$  = Longitud del resorte sin carga, mm

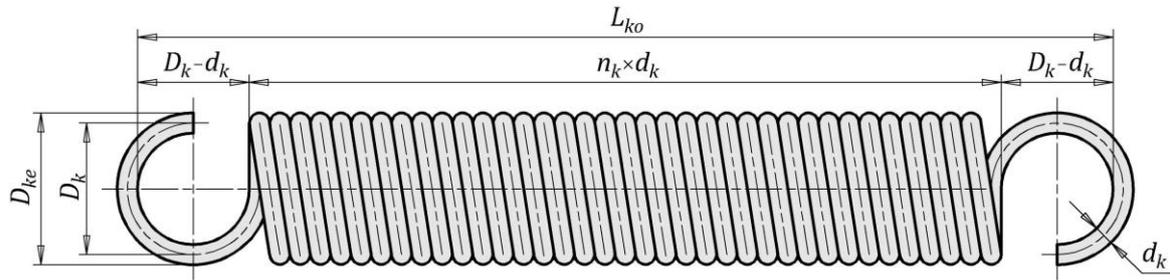
$n_k$  = Número de espiras

$D_k$  = Diámetro medio del resorte, mm

$d_k$  = Diámetro del alambre, mm

**Figura 96**

*Dimensiones del resorte helicoidal a tracción sin carga*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

A partir de la Ecuación 3.61, se puede determinar el número de espiras como se indica en la Ecuación 3.64 al reemplazar el valor calculado de la longitud del resorte sin carga el cual es 633,45 mm.

$$n_k = \frac{633,45 - 2(D_k - d_k)}{d_k} \quad (3.64)$$

Donde:

$n_k$  = Número de espiras

$L_{ko}$  = Longitud del resorte sin carga, mm

$D_k$  = Diámetro medio del resorte, mm

$d_k$  = Diámetro del alambre, mm

**Constante del Resorte.** Si bien este valor ya fue calculado con la Ecuación 3.59, también se corresponde con las dimensiones mostradas en la Figura 96 y con su material de fabricación como se indica en la Ecuación 3.65.

$$k = \frac{G \cdot d_k^4}{8 \cdot D_k^3 \cdot n_k} \quad (3.65)$$

Donde:

$k$  = Constante del resorte, N/mm

$G =$  Módulo de elasticidad a cortante, Mpa

$d_k =$  Diámetro del alambre, mm

$D_k =$  Diámetro medio del resorte, mm

$n_k =$  Número de espiras

Se reemplaza a la Ecuación 3.64 en la Ecuación 3.65 considerando el valor calculado de la constante del resorte el cual es 1,0098 N/mm y que el módulo de elasticidad a cortante del acero UNE-EN 10270-1 es de 81500 Mpa como se indica en la Ecuación 3.66.

$$1,0098 = \frac{81500 \cdot d_k^4}{8 \cdot D_k^3 \cdot \left( \frac{633,45 - 2(D_k - d_k)}{d_k} \right)} \quad (3.66)$$

Donde:

$D_k =$  Diámetro medio del resorte, mm

$d_k =$  Diámetro del alambre, mm

El criterio de falla por fatiga para un resorte helicoidal de tracción se indica en la Ecuación 3.67, la cual se corresponde con las dimensiones mostradas en la Figura 96 y su material de fabricación.

$$k_w \cdot \frac{8 \cdot F \cdot D_k}{\pi \cdot d_k^3} = \frac{S_u}{F_s} \quad (3.67)$$

Donde:

$k_w =$  Factor de Wahl

$F =$  Fuerza de tracción máxima, N

$D_k =$  Diámetro medio del resorte, mm

$d_k =$  Diámetro del alambre, mm

$S_u =$  Resistencia a la tracción, Mpa

$F_s =$  Factor de seguridad

El factor de Wahl indica la concentración de tensiones por la curvatura del alambre que intensifica el esfuerzo interior del resorte cuando se presenta fatiga, está definido por la Ecuación 3.68.

$$k_w = \frac{4D_k - d_k}{4D_k - 4d_k} + \frac{0,615 \cdot d_k}{D_k} \quad (3.68)$$

Donde:

$k_w =$  Factor de Wahl

$D_k =$  Diámetro medio del resorte, mm

$d_k =$  Diámetro del alambre, mm

Se reemplaza a la Ecuación 3.68 en la Ecuación 3.67 considerando el valor calculado de la fuerza de tracción en la posición horizontal del brazo articulado, donde es máxima e igual a 836,294 N. Además de la Tabla 22 se selecciona un acero UNE-EN 10270-1 del tipo SM ya que el resorte estará sometido a algunas tensiones dinámicas, del cual se obtiene una resistencia a la tracción estimada en 1530 Mpa. El factor de seguridad se establece en 1,4 como se indica en la Ecuación 3.69.

$$\left( \frac{4D_k - d_k}{4D_k - 4d_k} + \frac{0,615 \cdot d_k}{D_k} \right) \cdot \frac{8 \cdot 836,29 \cdot D_k}{\pi \cdot d_k^3} = \frac{1530}{1,4} \quad (3.69)$$

Donde:

$D_k =$  Diámetro medio del resorte, mm

$d_k =$  Diámetro del alambre, mm

Con las Ecuaciones 3.66 y 3.69 se forma un sistema de dos ecuaciones con dos variables,  $D_k$  y  $d_k$ , el cual se procede a resolver con métodos numéricos.

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,0098 = \frac{81500 \cdot d_k^4}{8 \cdot D_k^3 \cdot \left( \frac{633,45 - 2(D_k - d_k)}{d_k} \right)} \\ \left( \frac{4D_k - d_k}{4D_k - 4d_k} + \frac{0,615 \cdot d_k}{D_k} \right) \cdot \frac{8 \cdot 836,29 \cdot D_k}{\pi \cdot d_k^3} = \frac{1530}{1,4} \end{array} \right.$$

Resultando:

$$d_k = 3,927 \text{ mm}$$

$$D_k = 25,165 \text{ mm}$$

Se considera el diámetro comercial de alambre ( $d_k$ ) más cercano igual a 4 mm, el cual se reintroduce en la Ecuación 3.66, obteniéndose un diámetro medio del resorte ( $D_k$ ) igual a 25,975 mm el cual se redondea a 26 mm.

$$d_k = 4 \text{ mm}$$

$$D_k = 26 \text{ mm}$$

Se reintroducen estos valores en la Ecuación 3.64 para calcular el número de espiras, el cual debe ser un número entero.

$$n_k = \frac{633,45 - 2(26 - 4)}{4}$$

$$n_k = 147,363$$

$$n_k = 147$$

Se reintroduce este valor en la Ecuación 3.63 para calcular la nueva longitud del resorte sin carga.

$$L_{k0} = 147 \cdot 4 + 2(26 - 4)$$

$$L_{k0} = 632 \text{ mm}$$

Se reintroducen todos los valores calculados en la Ecuación 3.67 para calcular la nueva constante del resorte.

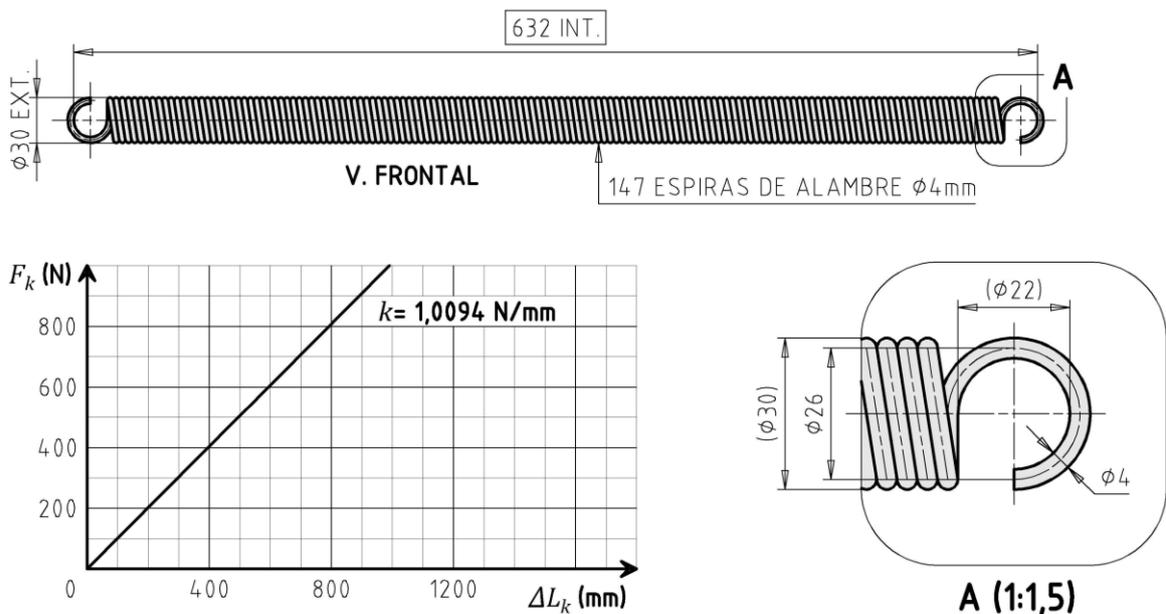
$$k = \frac{81500 \cdot (4)^4}{8 \cdot (26)^3 \cdot 147}$$

$$k = 1,0094 \text{ N/mm}$$

El diseño del resorte helicoidal de tracción para el brazo articulado queda definido con todas las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 97.

**Figura 97**

*Diseño del resorte helicoidal a tracción*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

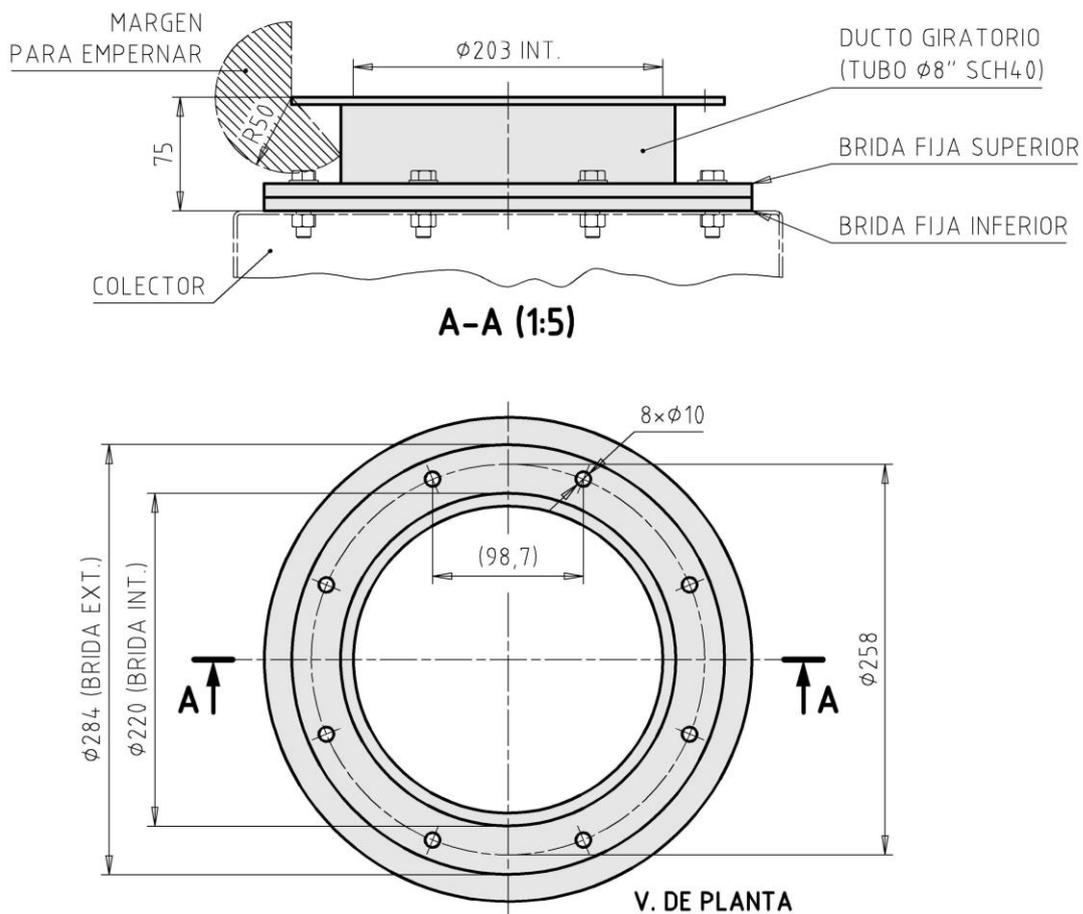
**Soporte Giratorio.** Este componente es la parte giratoria sobre la que descansa todo el peso del brazo articulado, por lo que se requiere un material más resistente que el aluminio 1050. En este caso, se seleccionará al acero ASTM A53 para el tubo de 8" con cédula 40, tal como se especificó en el diseño de la brida del conector para el ducto, y al acero ASTM A36 para los demás componentes. El soporte giratorio se acoplará al soporte

articulado mediante una unión embrizada, como se muestra en la Figura 98. Se compone de tres elementos:

- Ducto giratorio
- Brida fija superior
- Brida fija inferior

**Figura 98**

*Soporte giratorio*



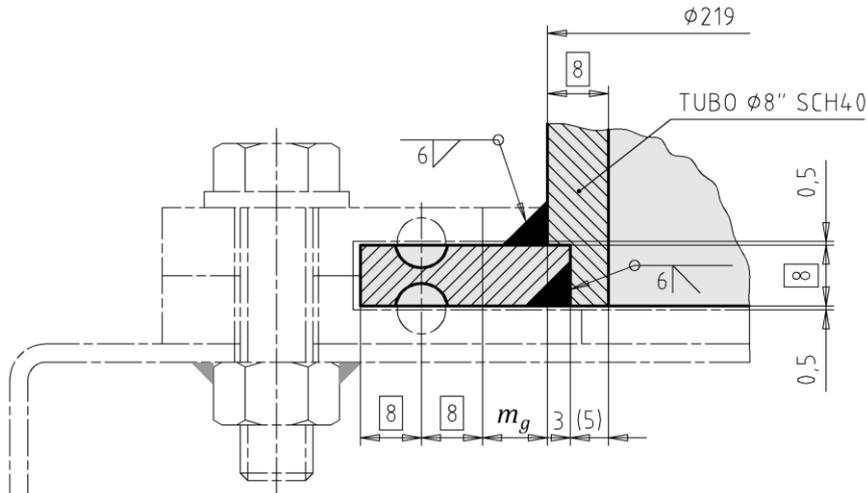
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Ducto Giratorio.** Este elemento consta de tubo de 8" en cédula 40 de acero ASTM A53 con una brida de acero ASTM A36 en la parte superior que se une al brazo articulado, la cual ya fue determinada desde la Figura 79, y un disco de acero ASTM A36 en la parte inferior con dos ranuras para el deslizamiento de billas de rodamiento como se muestra en

la Figura 99, donde  $m_g$  es el margen que permitirá el giro entre componentes para no interferir con la soldadura de filete del ducto giratorio.

**Figura 99**

*Ducto giratorio*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

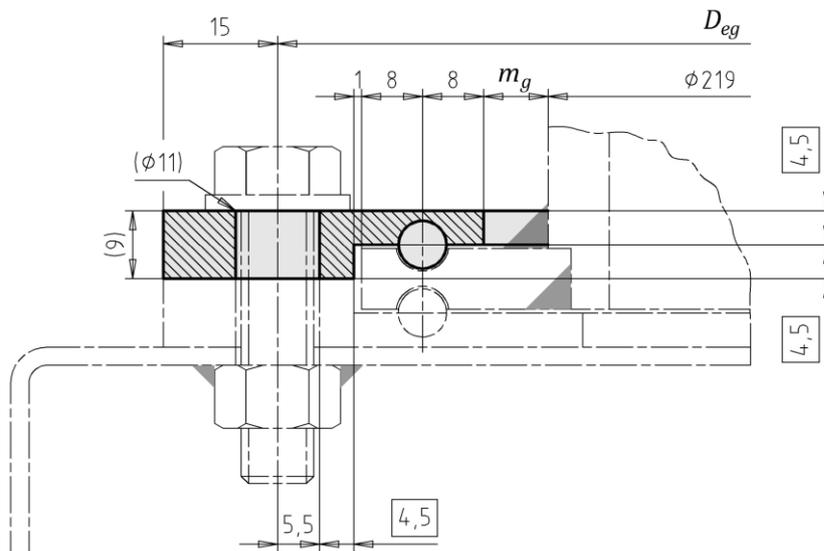
Como se muestra en la Figura 99, el tubo de 8" en cédula 40 posee un espesor de 8 mm, el cual se toma de referencia para establecer el espesor del disco con dos ranuras de deslizamiento en la parte inferior, además se usa el mismo valor para ambos alejamientos, tanto hacia afuera como hacia adentro en 8 mm.

Con respecto a la unión soldada se usa una unión de bisel en la parte inferior del disco y una de filete en la parte superior, ambas con un cateto de 6 mm. Se deja una luz de separación de 0,5 mm en ambas caras del disco para evitar el contacto entre superficies horizontales.

**Brida Fija Superior.** Este elemento tiene la función de retener al ducto giratorio por la parte superior y posee en su interior una serie de billas las cuales se engrasarán por dentro para permitir una rotación con muy bajo rozamiento como se muestra en la Figura 100.

**Figura 100**

*Brida fija superior*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 100, debido a que la brida fija superior se asienta a partir de la mitad del disco del ducto giratorio cuyo espesor es de 8 mm, se dispone de 4 mm más una luz de 0,5 mm, lo que da como resultado 4,5 mm de profundidad que deben ser maquinados. Este valor se toma como referencia para establecer el espesor donde se asentarán las billas y también el alejamiento para el perno de 3/8"NC, el cual requiere de un agujero de 11 mm.

Con respecto a luz de separación, se dejará 1 mm desde la parte interior de la cavidad para evitar el contacto entre superficies concéntricas. Se suman a todas las medidas que conducen a obtener el diámetro del eje de los agujeros para los pernos de esta brida, como se indica en la Ecuación 3.70.

$$D_{eg} = 2 \cdot (5,5 + 4,5 + 1 + 8 + 8 + m_g) + 219 \quad (3.70)$$

Donde:

$D_{eg}$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos de la brida fija superior,  
mm

$m_g =$  Margen que permite el giro entre componentes, mm

Este margen debe ser de aproximadamente 8 mm, al igual que las otras dimensiones del ducto giratorio, para no interferir con la soldadura de filete de cateto 5 mm.

$$D_{eg} \approx 2 \cdot (5,5 + 4,5 + 1 + 8 + 8 + 8) + 219$$

$$D_{eg} \approx 289 \text{ mm}$$

Se prefiere que este valor sea un múltiplo de 10 para facilitar la fabricación y el montaje entre componentes.

$$D_{eg} = 290 \text{ mm}$$

Se reintroduce este valor en la Ecuación 3.67 para obtener al margen.

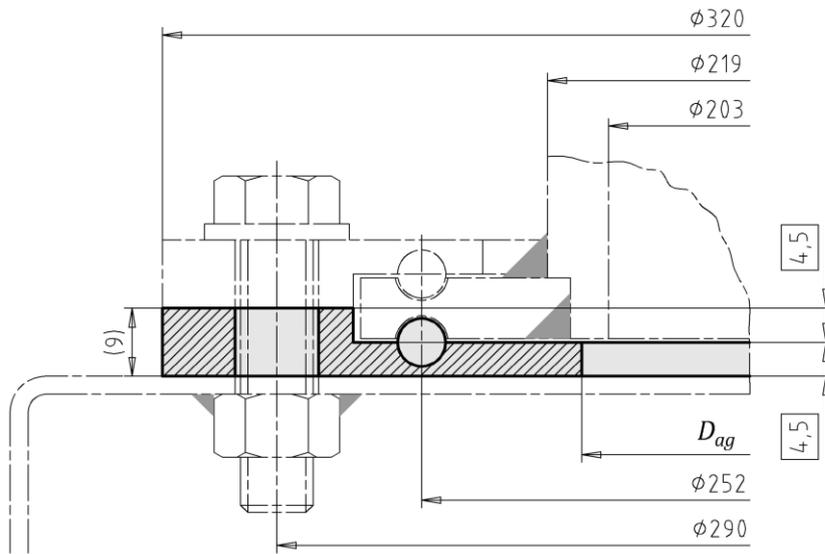
$$m_g = 8,5 \text{ mm}$$

**Brida Fija Inferior.** Este elemento se unirá al cuerpo del colector mediante pernos de diámetro 3/8"NC de acero A325 y posee en su interior una serie de billas las cuales se engrasarán por dentro para permitir una rotación con muy bajo rozamiento como se muestra en la Figura 101.

Con respecto a las medidas que tendrá este elemento, son las mismas que la brida fija superior, con la única diferencia que en la parte inferior, el agujero es más pequeño para ocultar al disco del ducto giratorio, además este también será el diámetro del agujero realizado en el colector para permitir el paso del aire. Este diámetro ( $D_{ag}$ ) se encuentra entre los diámetros del tubo de cédula, es decir entre 203 y 219 mm como se indica en la Ecuación 3.71.

**Figura 101**

*Brida fija inferior*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

$$D_{ag} \approx \frac{203 + 219}{2} \quad (3.71)$$

Donde:

$D_{ag}$  = Diámetro del agujero para el colector, mm

$$D_{ag} \approx 211 \text{ mm}$$

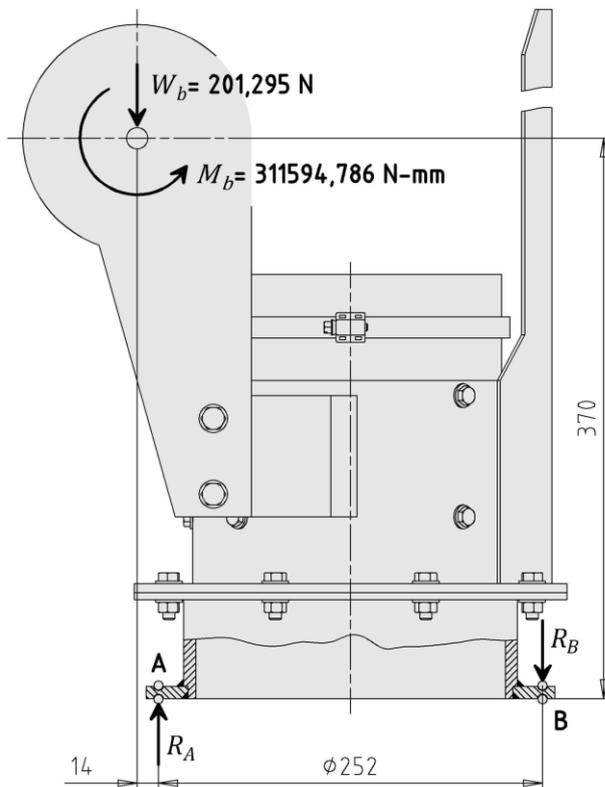
Se prefiere que este valor sea un múltiplo de 10 para facilitar la fabricación y el montaje entre componentes.

$$D_{eg} = 210 \text{ mm}$$

**Billas de Acero.** Estas billas son un elemento básico de los rodamientos rígidos de bolas. Están fabricadas en acero templado hasta el núcleo y deberán soportar en compresión a las cargas del peso y el momento del brazo, las cuales están representadas en la Figura 102.

**Figura 102**

*Cargas en las billas de acero*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Fuerza de Reacción en A.** Se realiza el equilibrio de momentos en el punto B mostrado en la Figura 102 para determinar el valor de la Fuerza de reacción con la Ecuación 3.72.

$$R_A \cdot 252 = W_b \cdot (14 + 252) + M_b \quad (3.72)$$

Donde:

$R_A$  = Fuerza de reacción en el punto A, N

$W_b$  = Peso del brazo articulado, N

$M_b$  = Momento del brazo articulado, N-mm

$$R_A \cdot 252 = 201,295 \cdot (14 + 252) + 311594,786$$

$$R_A = 1448,965 \text{ N}$$

**Fuerza de Reacción en B.** Se realiza el equilibrio de fuerzas verticales para determinar el valor de la Fuerza de reacción con la Ecuación 3.73.

$$R_B = R_A - W_B \quad (3.73)$$

Donde:

$R_B$  = Fuerza de reacción en el punto B, N

$R_A$  = Fuerza de reacción en el punto A, N

$W_b$  = Peso del brazo articulado, N

$$R_B = 1448,965 - 201,295$$

$$R_B = 1247,67 \text{ N}$$

Para determinar la carga máxima estática que puede soportar la billa de acero, se toma el valor de la fuerza de reacción más alta y se incluye un factor de seguridad de 3, como se indica en la Ecuación 3.74.

$$C_o = 3R_A \quad (3.74)$$

Donde:

$C_o$  = Capacidad de carga estática, N

$R_A$  = Fuerza de reacción en el punto A, N

$$C_o = 3(1448,965)$$

$$C_o = 4346,895 \text{ N}$$

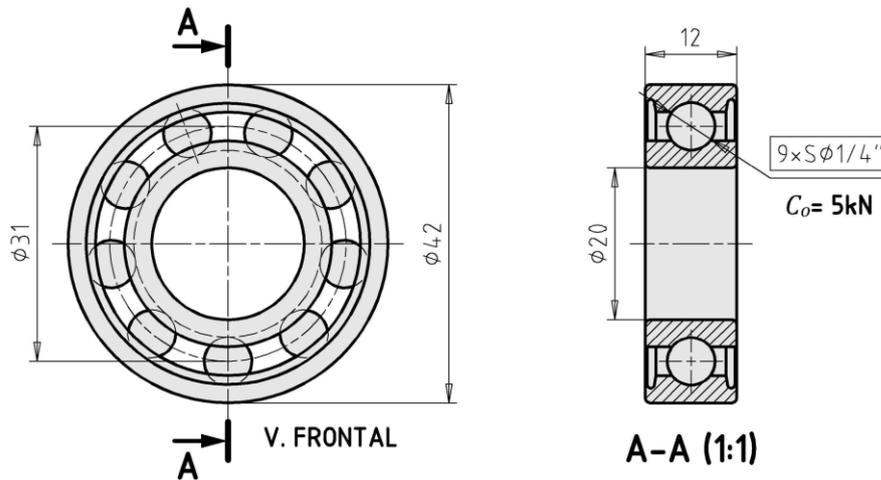
$$C_o = 4,347 \text{ kN}$$

Debido a que el movimiento será muy lento no se consideran a las cargas dinámicas, las billas sólo soportarán cargas de estáticas mientras se deslizan. Se toma en

cuenta el valor calculado de 4,347 kN y se selecciona a un rodamiento rígido de bolas de código 6004, el cual posee una capacidad de carga estática ( $C_o$ ) de 5 kN como se muestra en la Figura 103, el cual consta de nueve billas de diámetro 1/4" (6,35 mm) en su interior

**Figura 103**

*Rodamiento de bolas 6004*



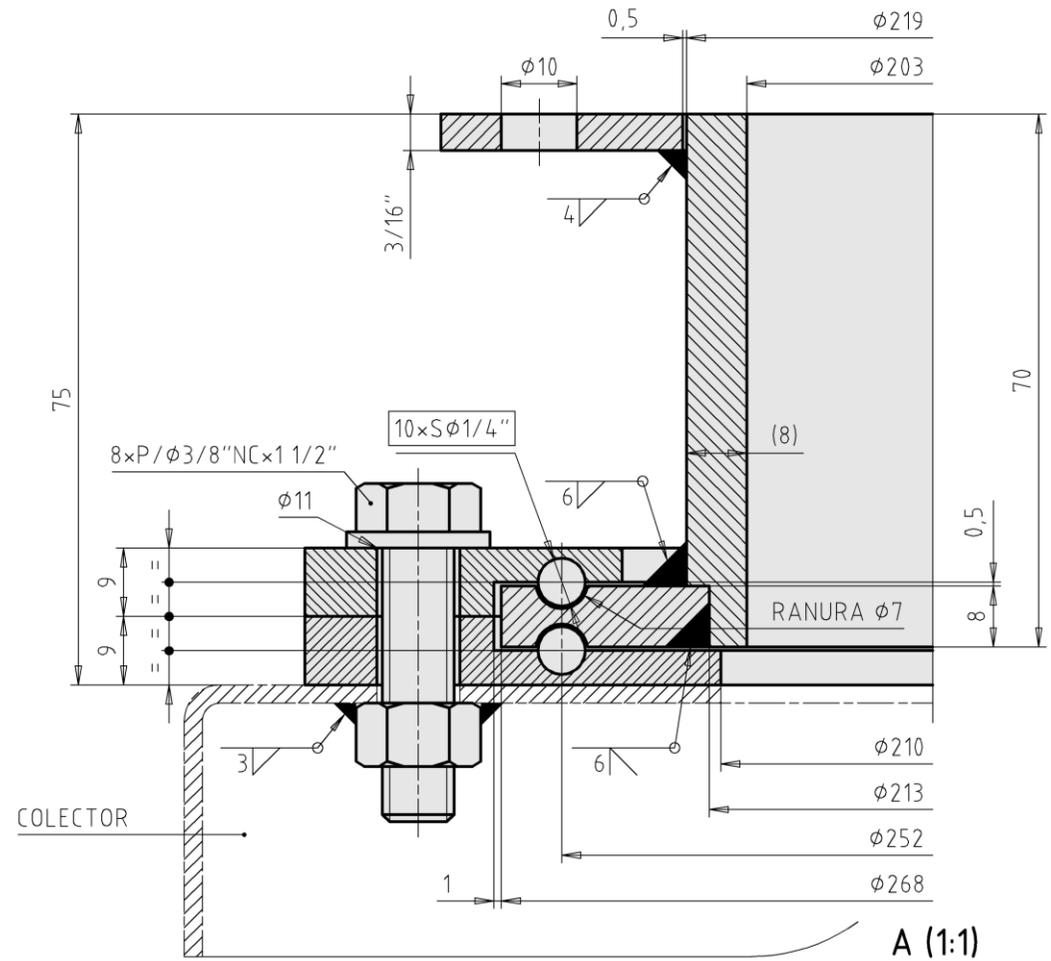
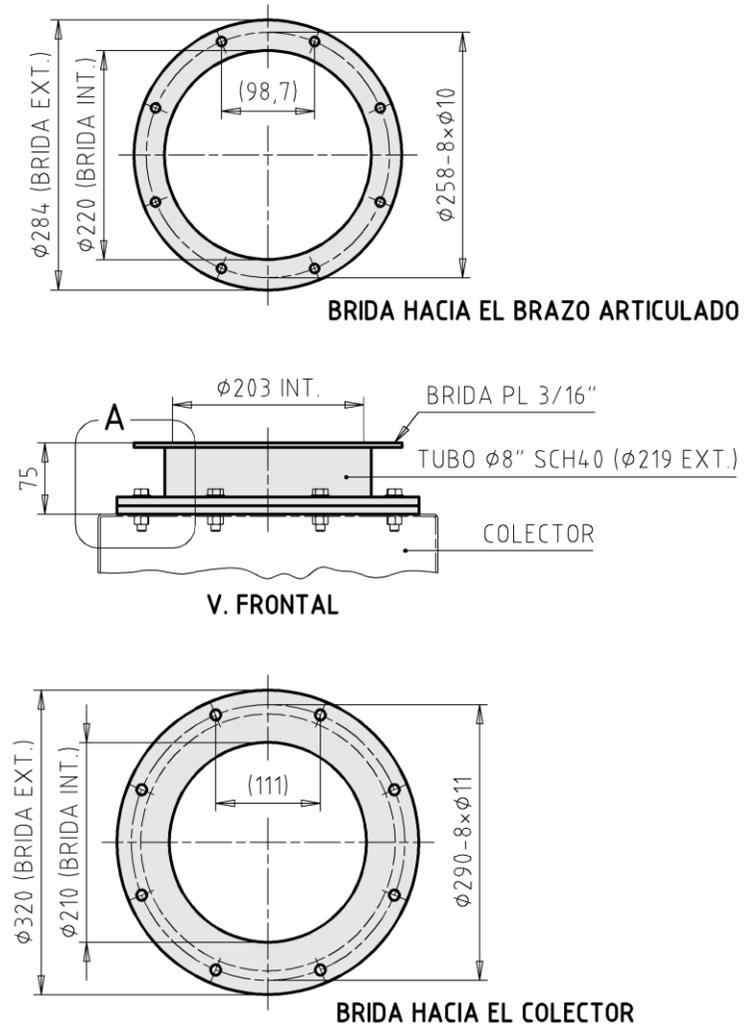
*Nota. Fuente. SKF, 2024 (<https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6004>).*

Se insertan estas billas de acero a cada una de las bridas fijas con engrasamiento para que cumplan la función de para permitir una rotación con muy bajo rozamiento, dado que la cantidad es de 9 billas por hilera, se tomará el valor de 10 para una distribución más simétrica y uniforme de las cargas. Es importante señalar que estas billas pueden adquirirse de forma independiente, es decir, no es necesario adquirir rodamientos originales para obtener estos componentes. El diseño del soporte giratorio queda definido con todos las dimensiones antes calculadas, como se muestra en la Figura 104.

**Dimensionamiento.** Se realiza el dimensionamiento del brazo articulado, como se muestra en la Figura 105. Además, se presenta un modelo tridimensional del diseño en la Figura 106. El material utilizado para el brazo es aluminio 1050, las uniones empernadas son de acero ASTM A325, las abrazaderas están fabricadas en acero AISI 304, y la manguera flexible es de poliuretano con alambre de acero cobreado.

**Figura 104**

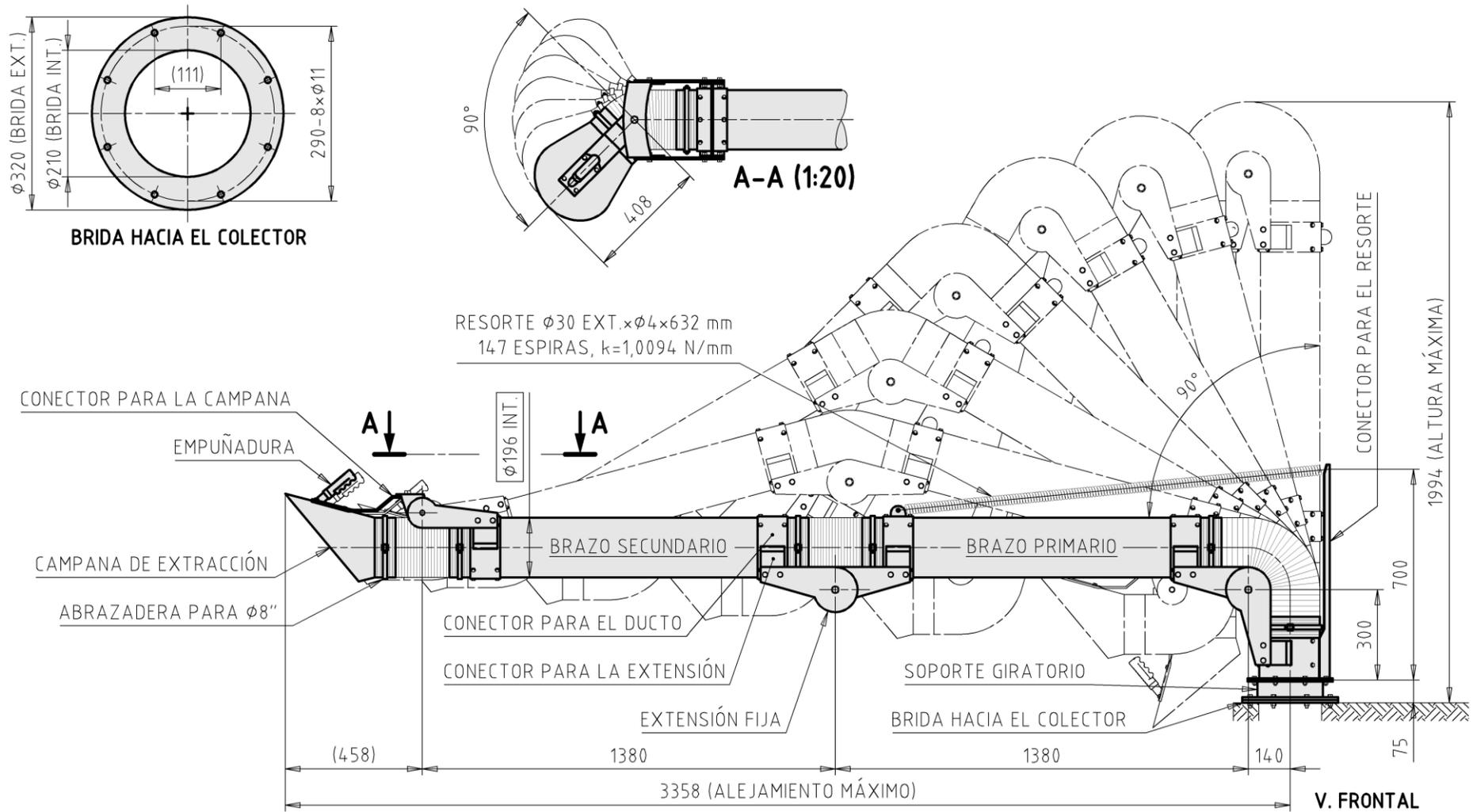
*Diseño del soporte giratorio*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 105**

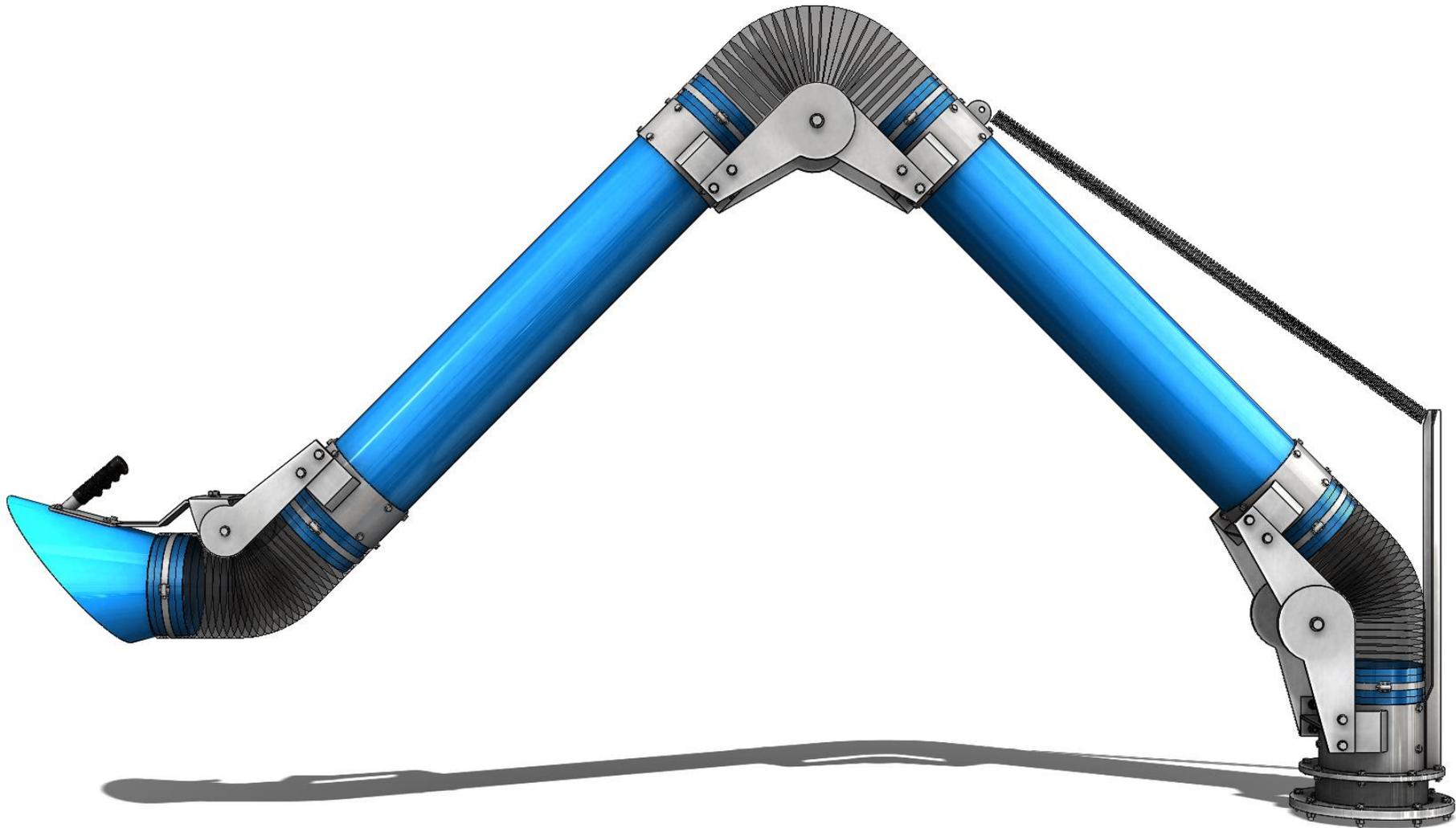
*Dimensionamiento del brazo articulado*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 106**

*Modelo tridimensional del brazo articulado*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

### 3.1.3. Diseño del Colector

**Especificaciones de Desempeño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran que debe hacer el colector

- Filtración eficiente de humos de soldadura.
- Dimensiones compactas que ocupen poco espacio
- Facilidad de traslado entre ambientes
- Facilidad para la instalación y el cambio del filtro.

**Caudal ( $Q$ ).** El colector funcionará con el mismo caudal de operación del brazo articulado, es decir con  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Especificaciones de Diseño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran cómo debe ser el colector.

**Material de Fabricación.** Como se estableció en el soporte giratorio, el material de fabricación elegido para el colector será el acero ASTM A36, por su costo y resistencia estructural a espesores delgados.

**Componentes.** Después de que los humos de soldadura son captados por el brazo articulado, ingresan al colector, que cuenta con un cuerpo diseñado para cambiar la dirección del flujo de descendente a ascendente. El colector está equipado con deflectores de aire que desvían las partículas de mayor tamaño, evitando que estas lleguen al filtro y garantizando su protección. El filtro se encarga de retener las partículas finas y los humos de soldadura, mientras que el sistema de limpieza por aire comprimido remueve las partículas acumuladas en el filtro mediante la inyección de un pulso de aire a alta presión.

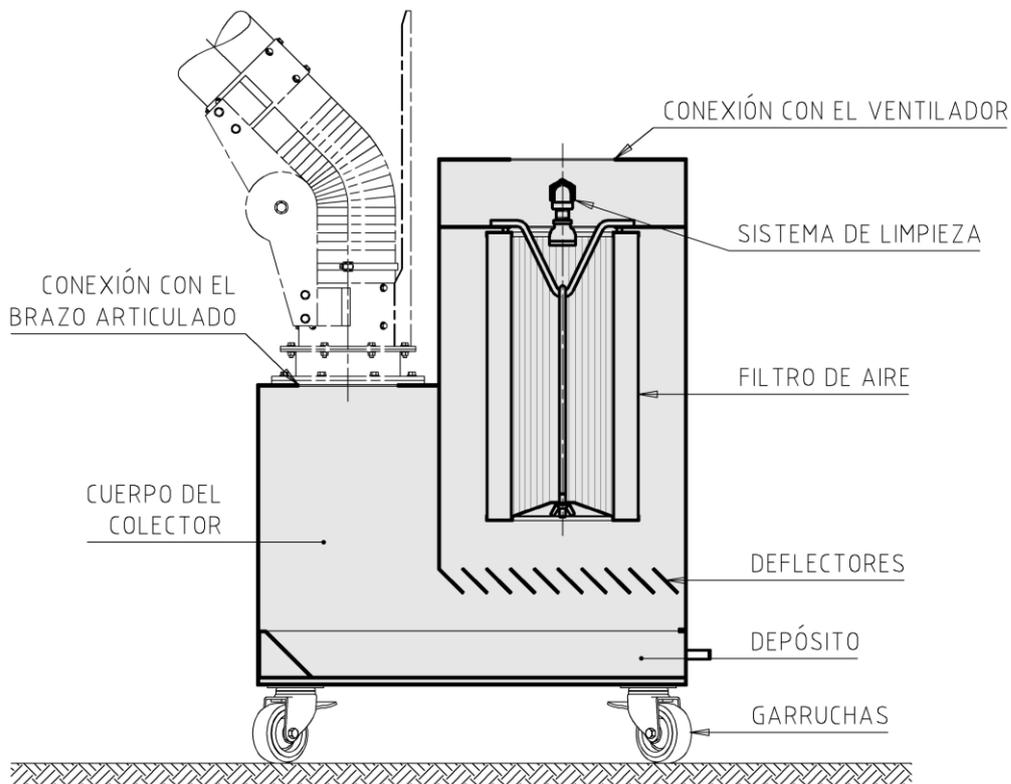
Finalmente, un depósito recolecta las partículas filtradas, facilitando su disposición adecuada. El colector está compuesto por cinco elementos principales:

- Filtro de aire
- Sistema de limpieza
- Cuerpo del colector
- Deflectores
- Depósito

Como se muestra en la Figura 107, el diseño incluye las conexiones necesarias para la instalación del brazo articulado y del ventilador. Además, se incorporan garruchas para facilitar la movilidad de la máquina.

**Figura 107**

*Componentes del colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Filtro de Aire.** Se elegirá un filtro de cartucho debido a su diseño compacto, ya que un filtro de mangas ocuparía más volumen, lo que incrementaría el tamaño del colector. Los filtros de cartucho ofrecen un flujo de aire adecuado mientras capturan eficazmente humos y partículas gracias a su material filtrante, como se ilustra en la Figura 108.

**Figura 108**

*Funcionamiento de un filtro de cartucho*



*Nota. Fuente.* HE Filtration Engineering S.L., 2024 (<https://hefiltration.com/productos/cartuchos-y-mangas-filtrantes-repuestos/>).

Un filtro de cartucho limpio generalmente presenta una caída de presión estática de 1" ca (una pulgada de columna de agua). A medida que el filtro acumula polvo, la resistencia al paso del aire aumenta, lo que incrementa progresivamente la caída de presión estática hasta alcanzar un máximo de 4" ca cuando el filtro está completamente saturado. Se recomienda realizar la limpieza del filtro cuando la caída de presión estática alcance un valor de 2,5" ca. Este nivel indica que el filtro ha acumulado una cantidad

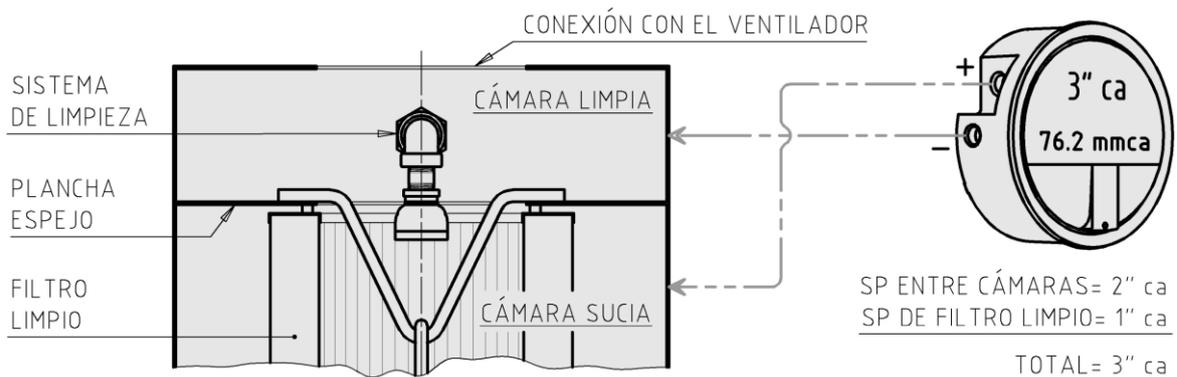
significativa de partículas, lo cual podría afectar su eficiencia si no se realiza una intervención oportuna.

Es importante aclarar que no es posible obtener una lectura directa de estas presiones, sino que debe realizarse a través de un manómetro diferencial. Este dispositivo compara la presión estática en la cámara donde se encuentra instalado el filtro (cámara sucia) con la presión de la cámara donde se ubica el sistema de limpieza (cámara limpia).

Esta configuración entre la cámara sucia y la cámara limpia introduce inevitablemente un incremento adicional de 2" ca en la lectura, debido a la caída de presión que ocurre cuando el aire atraviesa ambas cámaras a través de una placa perforada, conocida como plancha espejo. En la Figura 109 se ilustra la caída de presión estática entre las cámaras con un filtro limpio, mientras que la Figura 110 muestra la misma configuración con un filtro sucio.

### Figura 109

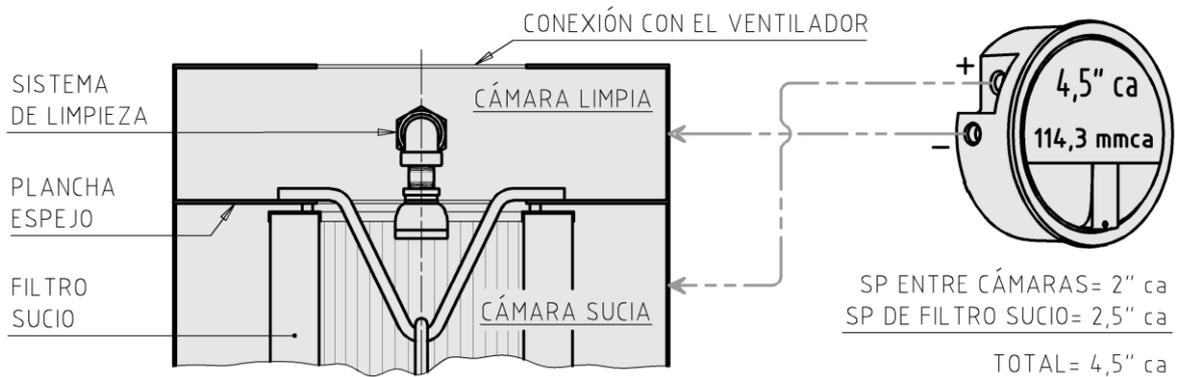
*Caída de presión estática con un filtro de cartucho limpio*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 110**

*Caída de presión estática con un filtro de cartucho sucio*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Un filtro desgastado pierde eficiencia en la retención de partículas, lo que provoca un aumento más rápido en la caída de presión. En estos casos, la caída de presión estática del filtro puede alcanzar hasta 6" ca, lo que indica no solo una saturación completa, sino también una pérdida significativa de su capacidad de filtración. Aunque la limpieza puede reducir temporalmente la caída de presión estática, el filtro debe ser reemplazado, ya que su uso prolongado compromete la eficiencia del sistema y la calidad del aire.

Estas caídas de presión están resumidas en la Tabla 23, donde se describe el significado de las lecturas obtenidas con un manómetro. Este dispositivo debe instalarse en un lugar visible y contar con un rango de medición de 0 a 10" ca como medida de precaución.

**Tabla 23**

*Caída de presión estática en filtros de cartuchos*

Caída de presión en el filtro	Lectura en el manómetro	Significado
1" ca	3" ca	Filtro limpio
2,5" ca	4,5" ca	Iniciar limpieza
4" ca	6" ca	Filtro saturado
6" ca	8" ca	Reemplazar el filtro

*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Superficie Filtrante.** Es la superficie que retiene humos y partículas, depende de la velocidad por la cual el aire atraviesa al filtro, esta velocidad para esta aplicación en particular (humos de soldadura) posee un valor de 0,035 m/s. Se realiza el cálculo de la superficie filtrante con la Ecuación 3.75.

$$A_f = \frac{Q}{v_f} \quad (3.75)$$

Donde:

$A_f$  = Superficie filtrante, m<sup>2</sup>

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$v_f$  = Velocidad del aire en el filtro, m/s

$$A_f = \frac{0,63}{0,035}$$

$$A_f = 18 \text{ m}^2$$

Existen dos materiales usuales para la fabricación de un filtros de cartuchos, la microfibras de celulosa y la microfibras de poliéster, en la Tabla 24 se indican las diferencias entre ambos materiales.

**Tabla 24**

*Materiales típicos en filtros de cartuchos*

Característica	Material del filtro de cartucho	
	Microfibras de celulosa	Microfibras de poliéster
Costo	Bajo	Alto
Resistencia a la humedad	Baja	Alta
Resistencia a la temperatura	Baja	Alta
Durabilidad	Menor	Mayor
Capacidad de filtración	Buena para partículas grandes	Buena para partículas finas y humos

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

Se selecciona la microfibras de poliéster debido a su buena capacidad para filtrar partículas finas y humos. Con base en la superficie filtrante calculada, se elige el filtro adecuado de la Tabla 25, que presenta las dimensiones de los filtros de la marca HE Filtration Engineering S.L. Se priorizan los filtros de menor tamaño para evitar un aumento en las dimensiones del colector.

**Tabla 25**

*Catálogo de filtros de cartuchos*

CODICE	Superficie filtrante m <sup>2</sup>	Ø mm	H mm	Material filtrante *
C010	7	325	600	Micro-fibra de celulosa
C014	10	325	600	Micro-fibra de celulosa
C014-XL	20	325	1200	Micro-fibra de celulosa
C018	20	325	600	Micro-fibra de celulosa
C018-XL	40	325	1200	Micro-fibra de celulosa
C025	20	325	1200	Micro-fibra de celulosa
C026	40	325	1200	Micro-fibra de celulosa
C037	7	325	600	Micro-fibra de poliéster
C041	10	325	600	Micro-fibra de poliéster
C041-TEFLON	10	325	600	Micro-fibra de poliéster teflonado
C041-TEFLON-XL	20	325	1200	Micro-fibra de poliéster teflonado
C041-XL	20	325	1200	Micro-fibra de poliéster
C045	20	325	600	Micro-fibra de poliéster
C045-XL	40	325	1200	Micro-fibra de poliéster

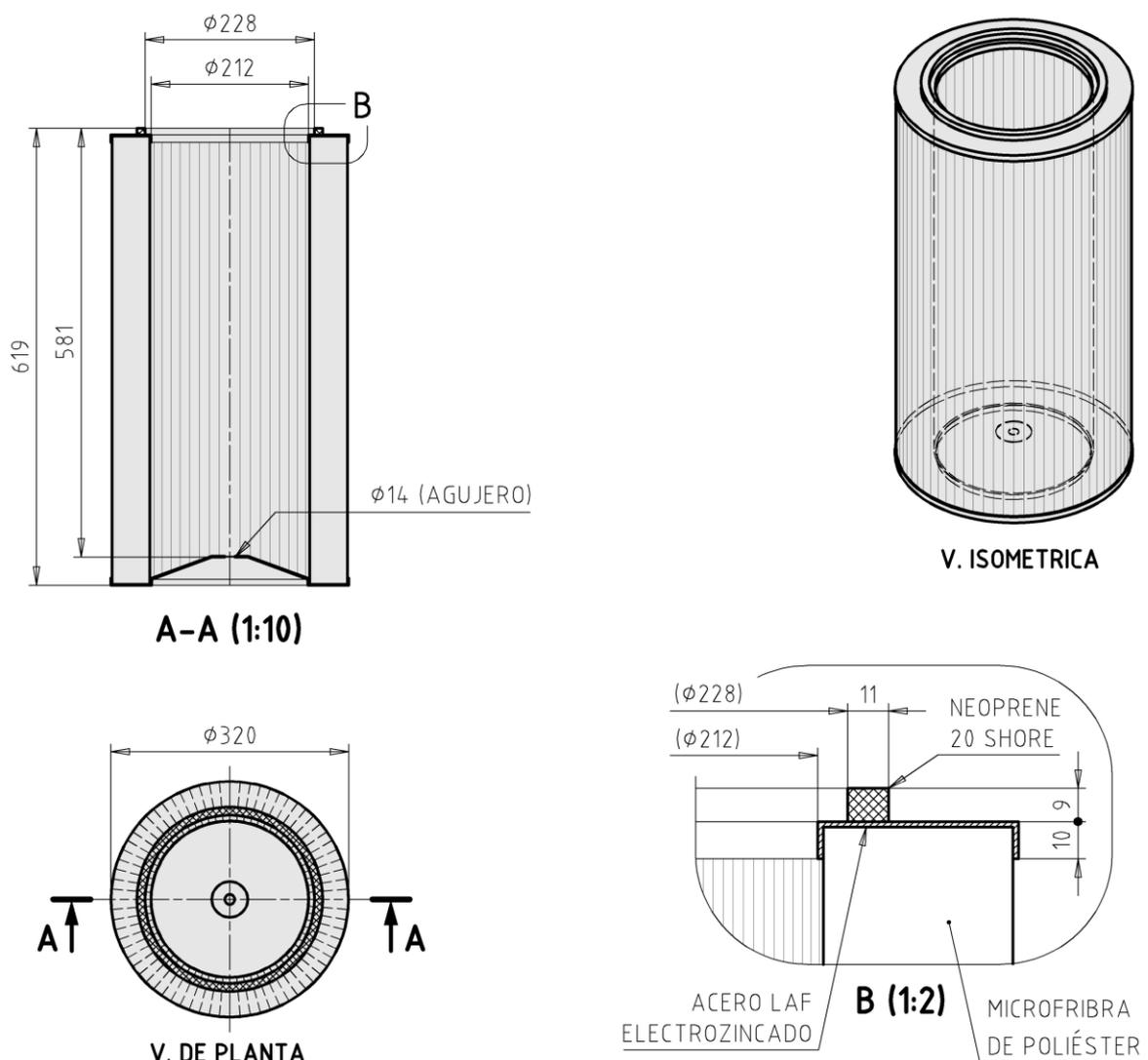
*Nota. Fuente.* HE Filtration Engineering S.L., 2024 (<https://hefiltration.com/productos/cartuchos-y-mangas-filtrantes-repuestos/>).

Se selecciona el filtro C045 debido a su diseño compacto con una altura de 600 mm, su material de microfibras de poliéster y una superficie filtrante de 20 m<sup>2</sup>, cumpliendo con todas las condiciones requeridas. Las dimensiones de este filtro se presentan en la Figura 111.

El filtro cuenta con 300 pliegues de microfibras de poliéster y dos tapas: una superior y otra inferior. La tapa superior incluye un anillo de neopreno, que asegura un sellado adecuado para evitar filtraciones de aire durante la instalación. La tapa inferior tiene un agujero de 14 mm de diámetro, diseñado para insertar un espárrago de 1/2" NC (12,7 mm) con una tuerca, lo que permite fijarlo dentro del colector.

**Figura 111**

*Dimensiones del filtro de cartucho*



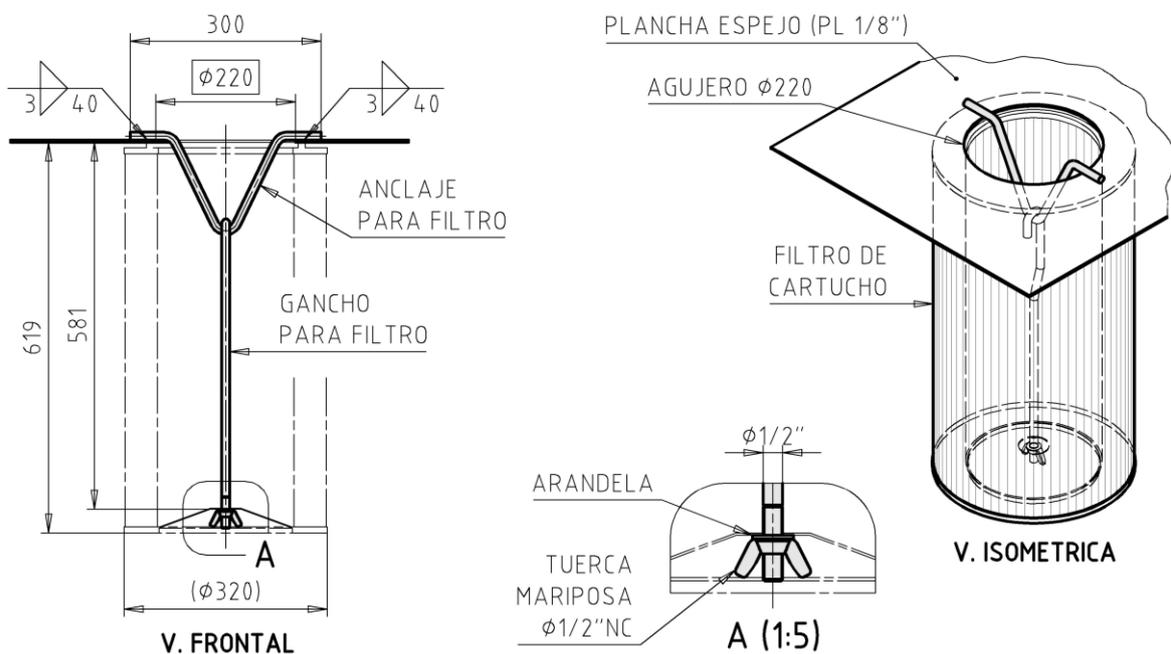
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Anclaje del Filtro.** Para facilitar la instalación del filtro, se empleará un gancho con una punta roscada en su parte inferior, que se ajustará al filtro mediante una tuerca

mariposa, como se muestra en la Figura 112. Este gancho estará conectado a un anclaje con forma de “V”, el cual será soldado a una plancha espejo, que es la superficie destinada para la colocación del filtro. La plancha espejo tendrá un espesor de 1/8” (3,175 mm) para garantizar su resistencia a los esfuerzos de presión y a las tensiones generadas por la soldadura del anclaje. En la Figura 113 se muestra un ejemplo de esta fabricación.

**Figura 112**

*Método de anclaje del filtro*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

El anclaje para el filtro se diseña a partir de una barra con un diámetro de 1/2" (12,7 mm), doblada alrededor de un diámetro de 1" (25,4 mm) en cada radio. El gancho que asegura el filtro está fabricado con la misma barra, pero doblada alrededor de un diámetro de 5/8" (15,875 mm) en el radio. Las dimensiones detalladas de ambos componentes se presentan en la Figura 114.

**Figura 113**

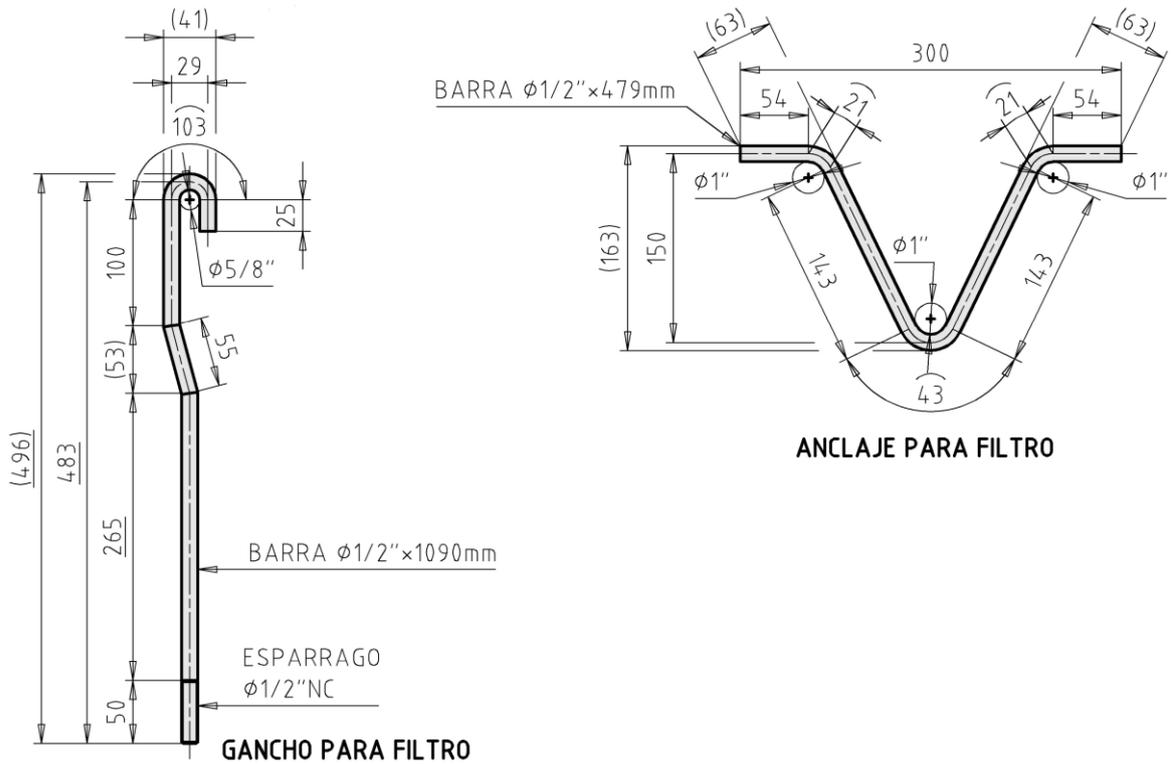
*Ejemplo de la fabricación del anclaje para el filtro*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 114**

*Dimensiones del gancho y del anclaje para el filtro*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Cuerpo del Colector.** Para garantizar facilidad de traslado entre ambientes, el colector tendrá un ancho máximo de 600 mm, lo que asegura un margen suficiente para girar y atravesar puertas y pasadizos, cumpliendo con el requisito de ser menor a 800 mm. Este diseño incluye cuatro garruchas con ruedas de 5" (127 mm) de diámetro y una altura estándar de 165 mm, adecuadas para superar obstáculos en entornos industriales. Las dos garruchas más cercanas al brazo articulado no contarán con freno, mientras que las dos restantes estarán equipadas con frenos de activación manual. En la Figura 115 se muestra un ejemplo de la instalación de este tipo de garruchas.

### Figura 115

*Ejemplo de la instalación de garruchas*



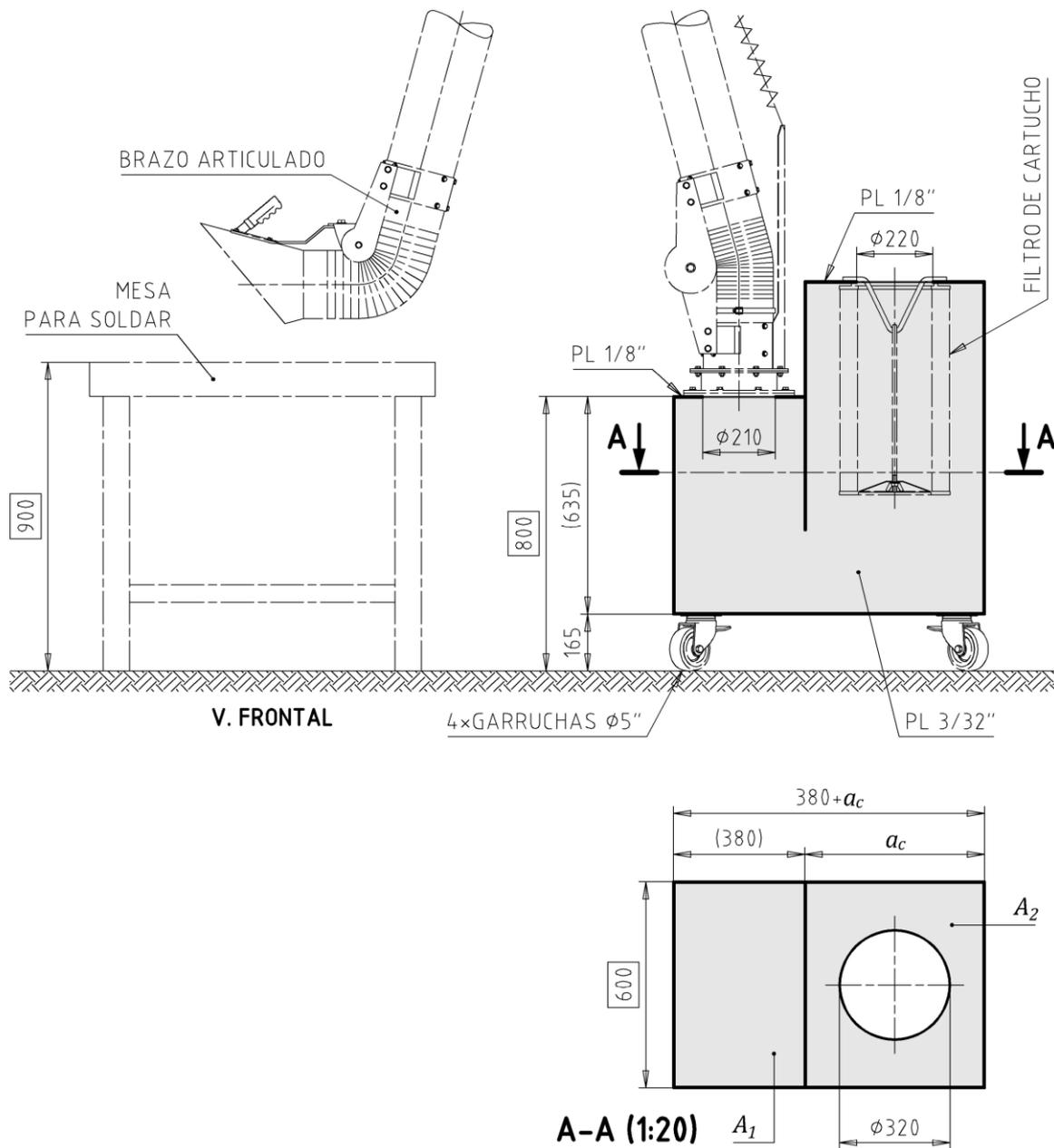
*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

El cuerpo del colector se divide en dos conductos: uno destinado a la conexión con el brazo articulado y otro para alojar el filtro. Ambos conductos mantienen un ancho constante de 600 mm, como se muestra en la Figura 116, donde  $a_c$  representa el largo del conducto del filtro,  $A_1$  corresponde al área del conducto para el brazo articulado, y  $A_2$  al área del conducto para el filtro.

La altura del conducto que conecta el brazo articulado será de 800 mm, lo que permite posicionar la campana de extracción de manera adecuada sobre una mesa de soldadura estándar de 900 mm de altura. Al descontar los 165 mm ocupados por las garruchas, la altura efectiva del conducto para la conexión con el brazo articulado será de 635 mm.

**Figura 116**

*Conductos del cuerpo del colector*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

El colector tendrá un espesor estimado de 3/32" (2,38 mm) en su estructura, excepto en la parte superior, cuyo espesor será de 1/8" (3,175 mm) para soportar adecuadamente el filtro de cartucho y permitir la instalación de un sistema de limpieza y un ventilador en la parte superior.

**Área del Conducto para el Brazo Articulado ( $A_1$ ).** El conducto donde se conecta el brazo articulado debe poseer un largo suficiente para que la base del brazo pueda girar con libertad mientras se encuentra en operación, para lograr esto, las dimensiones de este conducto serán de 380x600 mm. Con esta información se determinará el área de la sección de este conducto ( $A_1$ ) en  $mm^2$  multiplicando ambas dimensiones.

$$A_1 = 228000 \text{ mm}^2$$

**Área del Conducto para el Filtro ( $A_2$ ).** El conducto donde se encuentra el filtro consiste en una sección rectangular a la cual se le sustrae una sección circular que corresponde al espacio que ocupa el filtro en  $mm^2$  como se indica en la Ecuación 3.76.

$$A_2 \approx a_c \cdot 600 - \frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \quad (3.76)$$

Donde:

$A_2 =$  Área del conducto para el filtro,  $mm^2$

$a_c =$  Largo del conducto para el filtro, mm

$D_f =$  Diámetro exterior del filtro, mm

De la Figura 111, se obtiene que el diámetro exterior del filtro es 320 mm, y para una uniformidad en el flujo de aire dentro del colector, se hará una igualdad entre  $A_1$  y  $A_2$  usando a la Ecuación 3.76.

$$228000 \approx a_c \cdot 600 - \frac{\pi}{4} \cdot 320^2$$

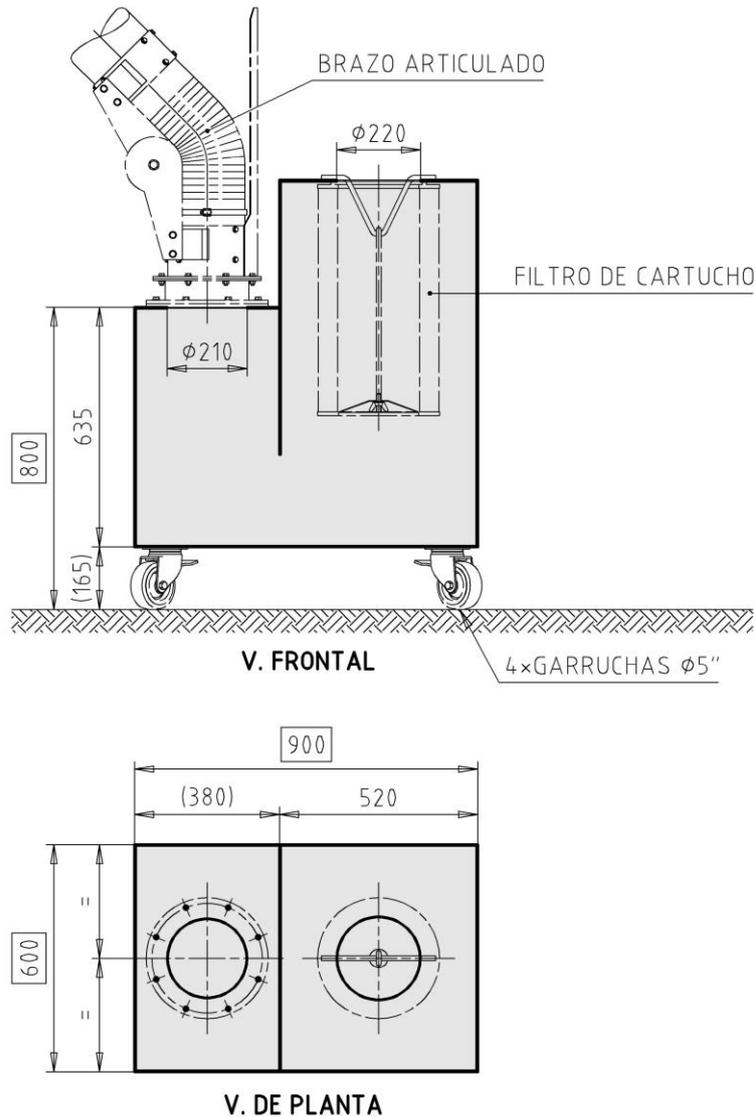
$$a_c \approx 514 \text{ mm}$$

Se redondea este largo a 520 mm para obtener una suma conveniente de 900 mm junto al largo del otro conducto, como se muestra en la Figura 117.

$$a_c = 520 \text{ mm}$$

**Figura 117**

*Dimensiones de la sección de los conductos del cuerpo del colector*



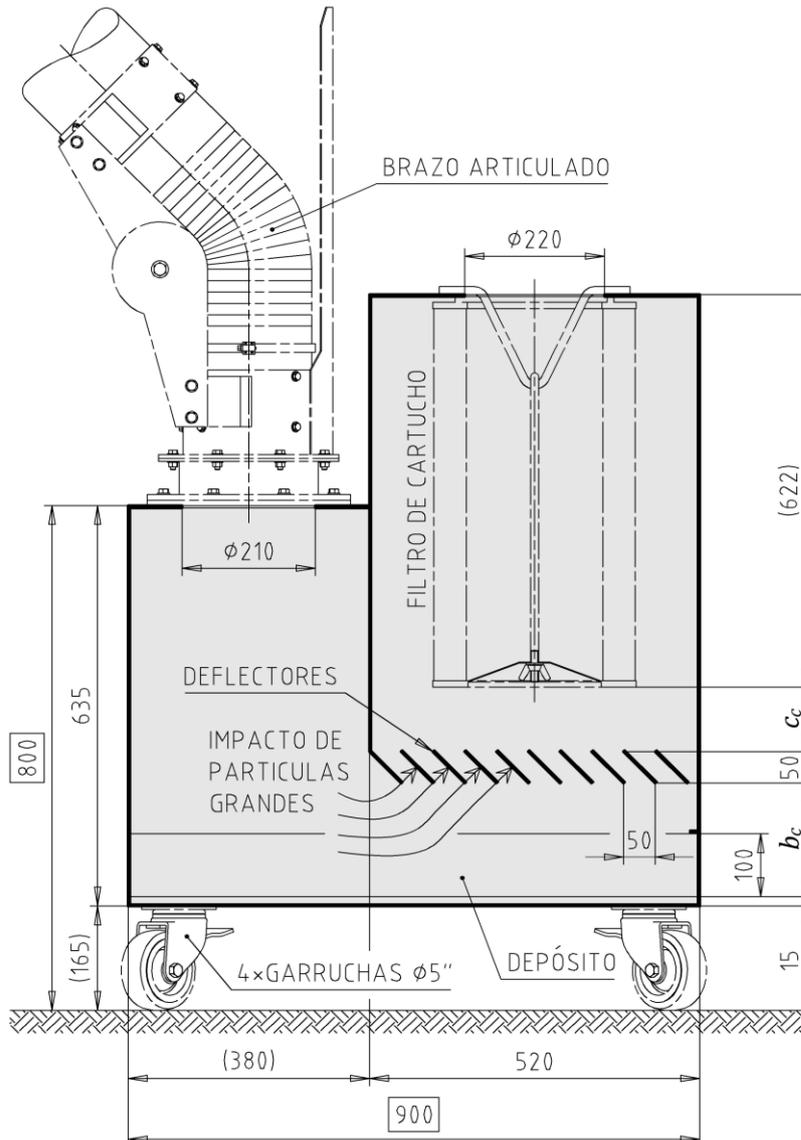
Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Deflectores.** Antes de que los humos de soldadura lleguen al filtro, se dispone de un paso de aire con deflectores de impacto, estos deflectores se acomodarán a modo de rejilla con platinas de acero como se muestra en la Figura 118, donde  $b_c$  es la altura de la

transición entre conductos, el cual a su vez establece el espacio adecuado para un depósito, el cual se establece en 100 mm.

**Figura 118**

*Deflectores del colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

La altura de la transición entre conductos ( $b_c$ ) depende del caudal y de la velocidad del aire en la transición entre conductos, como se indica en la Ecuación 3.77. Esta velocidad se asume en 6 m/s.

$$v_{af} \approx \frac{Q}{0,6 \cdot b_c} \quad (3.77)$$

Donde:

$v_{af}$  = Velocidad del aire en la transición entre conductos, m/s

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$b_c$  = Altura de la transición entre conductos

$$6 \approx \frac{0,63}{0,6 \cdot b_c}$$

$$b_c \approx 0,175 \text{ m}$$

Se redondea esta altura a 180 mm.

$$b_c = 180 \text{ mm}$$

El diseño de estos deflectores se realiza con la forma de una rejilla con un paso de 50 mm entre sí, y está orientado en contra del flujo natural del aire, con un ángulo asumido de 45° para provocar un impacto de las partículas grandes que serán enviadas al depósito y así no lleguen a dañar al filtro, además actúa como un direccionador del flujo, haciendo que los humos recorran más distancia, ya que de no existir los deflectores se generaría un corto entre el conducto para el brazo articulado y el conducto para el filtro. En la Figura 119 se muestra un ejemplo de esta fabricación.

Como se muestra en la Figura 118, luego de que los humos atraviesen a los deflectores serán dirigidos hacia el filtro, el cual deberá contar con un margen ( $c_c$ ) que le permita descender en el momento que se requiera montar y desmontar el filtro. Este margen se asume en aproximadamente 100 mm, para permitir el paso de las manos de un operario de mantenimiento.

$$c_c \approx 100 \text{ mm}$$

## Figura 119

*Ejemplo de la fabricación de los deflectores*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

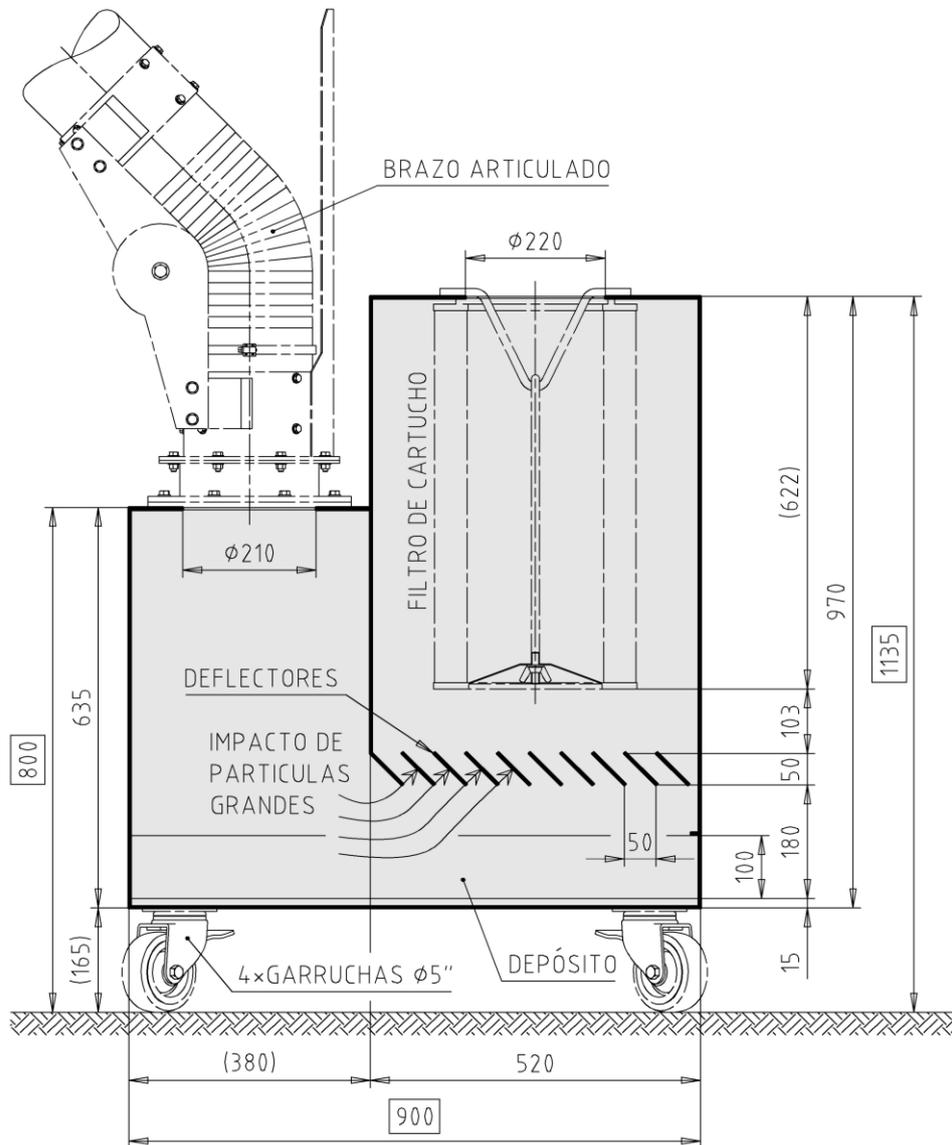
Se conoce que la altura del filtro más la plancha espejo dan un total de 622 mm, por lo que sería más conveniente que este margen sea de 103 mm en lugar de 100 mm para ocasionar una suma múltiplo de cinco, al prever esto, a futuro nos permitirá obtener valores redondeados con mayor facilidad.

$$c_c = 103 \text{ mm}$$

Con las dimensiones del establecidas se procede a dimensionar tanto a los deflectores como a los conductos del cuerpo del colector como se muestra en la Figura 120.

**Figura 120**

*Dimensiones de los conductos del cuerpo del colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

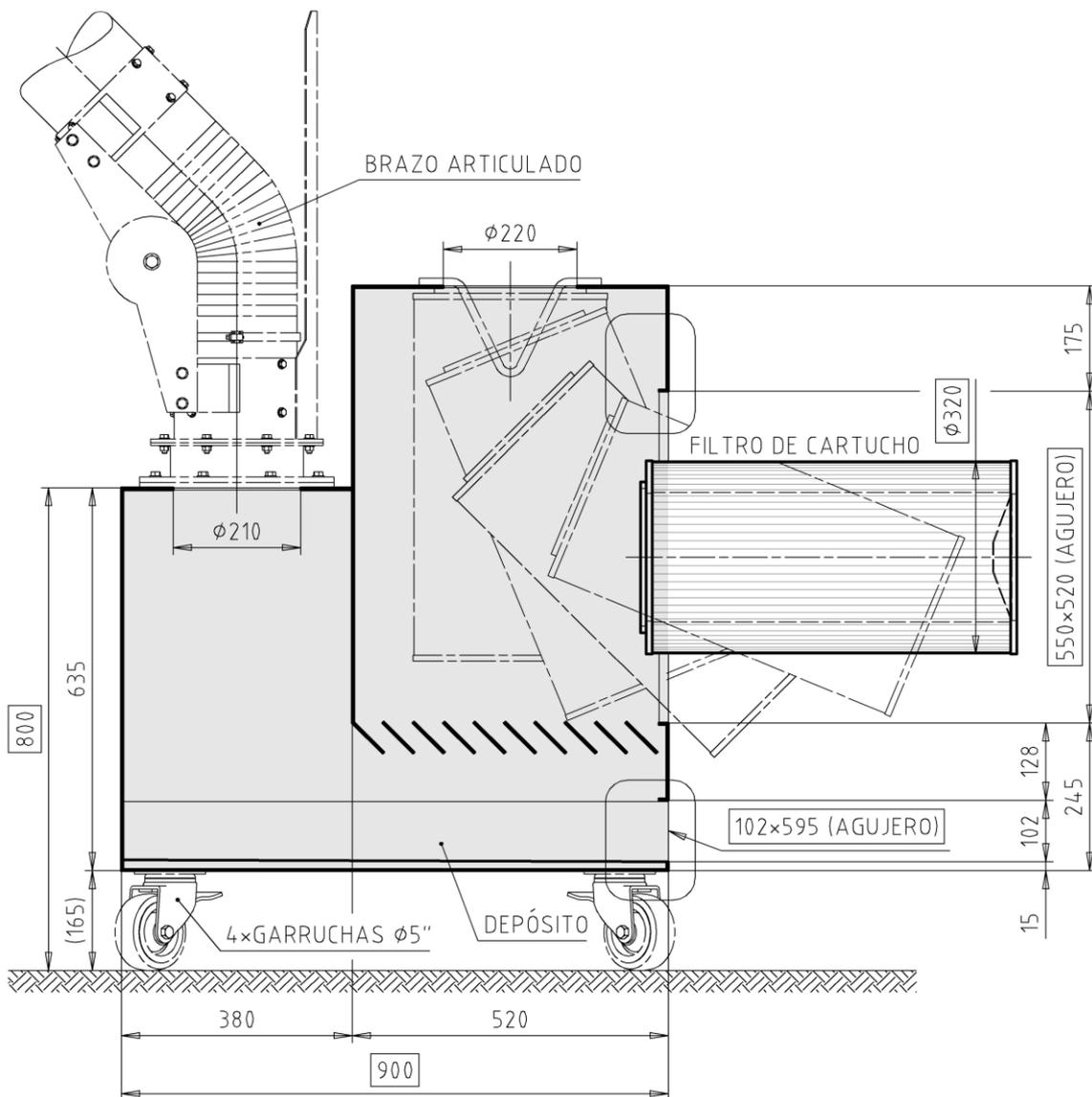
**Agujero para el Filtro.** Para facilitar el montaje y desmontaje del filtro de cartucho se requiere de un agujero rectangular en el cuerpo del colector, con un ancho 100 mm mayor que el diámetro exterior del filtro, el cual es 320 mm para permitir el paso de las manos del operario de mantenimiento, es decir que el ancho será de 420 mm. Además la altura de este agujero dependerá de la maniobra que se realice para extraer el filtro, como se muestra en la Figura 121 se establece esta altura en 550 mm. Este agujero tendrá unos dobleces hacia adentro de 15 mm cada uno para rigidizar la superficie que recibirá a una

tapa. Además, posee una serie de 10 agujeros de diámetro 11 mm distribuidos en un perímetro alejado 25 mm del agujero este alejamiento es acorde con el espaciamento para pernos de 3/8"NC en un ala de 1 1/2" como se indica en la Tabla 20. Cada uno de estos agujeros posee una tuerca de 3/8"NC (9,525 mm) soldada en el interior del colector.

*Agujero = 420 × 550 mm*

**Figura 121**

*Maniobra para retirar el filtro*



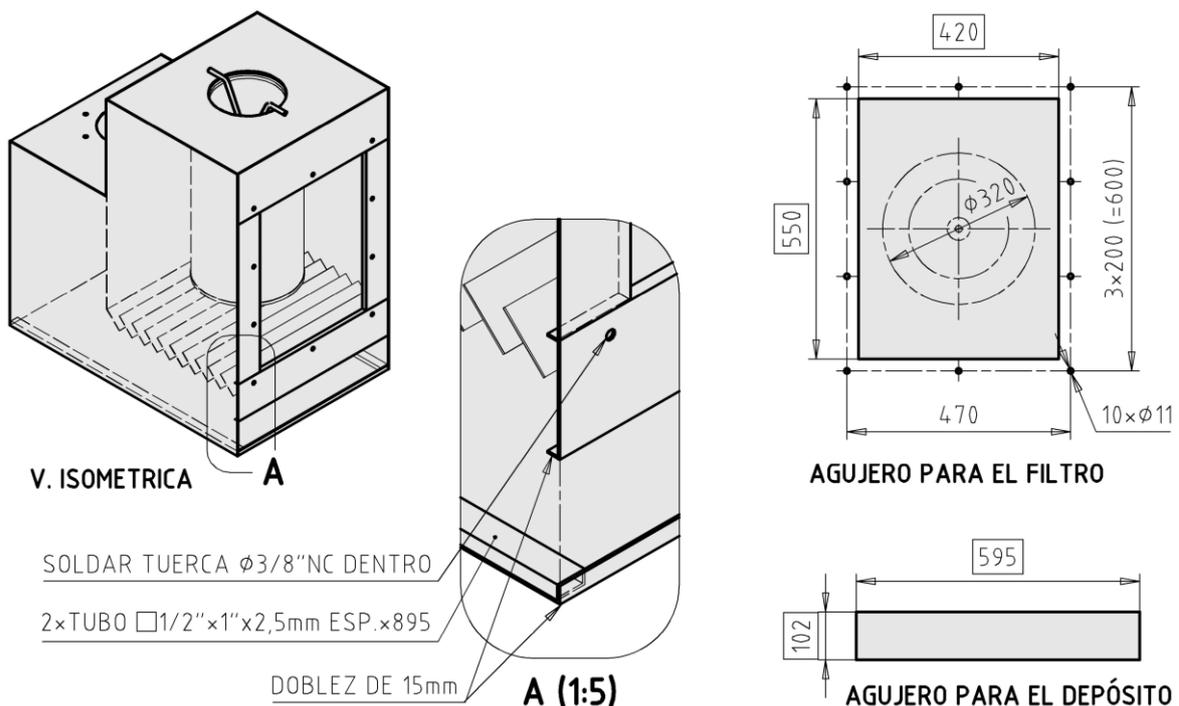
Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Agujero para el Depósito.** Para facilitar el retiro y la inserción del depósito ubicado en la parte inferior del colector se dispondrá de dos carriles hechos con tubos rectangulares con una dimensión conveniente de 1/2" (12,7 mm) que sumado al espesor del colector (3/32") da como resultado un dobléz de 15 mm que servirá como tope. Además, debido a que el depósito posee una altura considerada de 100 mm, el agujero donde se insertará tendrá 2 mm más para obtener una luz que le permita deslizarse con facilidad, es decir que la altura será de 102 mm y el ancho abarcará a todo el espacio interior del ancho del colector, es decir 600 mm menos dos espesores de 3/32" lo que da como resultado 595 mm como se muestra en la Figura 122.

$$\text{Agujero} = 595 \times 102 \text{ mm}$$

**Figura 122**

*Agujeros para el filtro y el depósito*



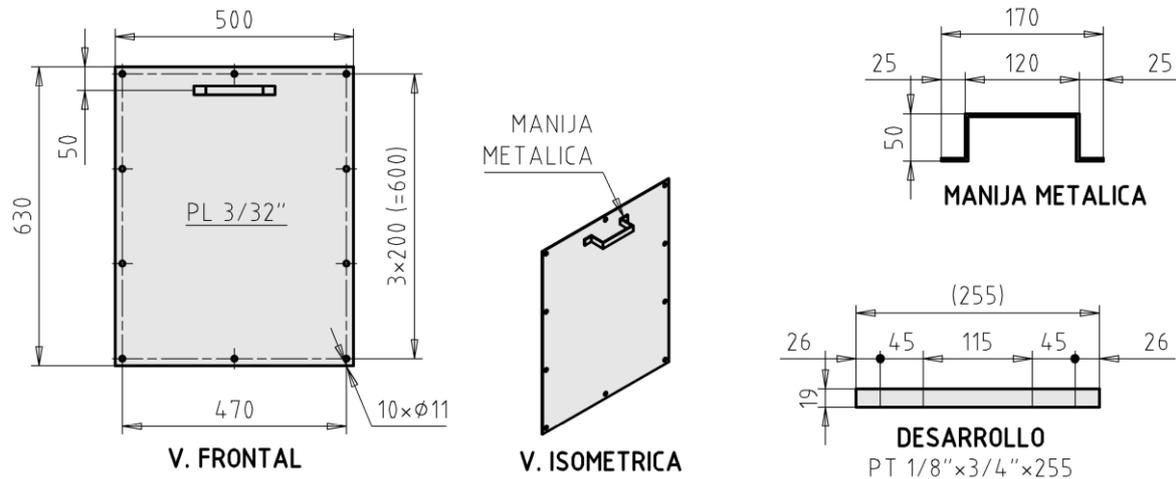
Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Tapa para el Filtro.** Su diseño se basa en las dimensiones del agujero para el filtro mostrado en la Figura 122. Esta tapa tendrá la misma distribución de agujeros más un espaciamiento libre de 15 mm, acorde con lo establecido en la Tabla 20 para pernos de

3/8"NC en un ala de 1 1/2". Dando como resultado una tapa con las dimensiones que se muestran en la Figura 123.

**Figura 123**

*Tapa para el filtro*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

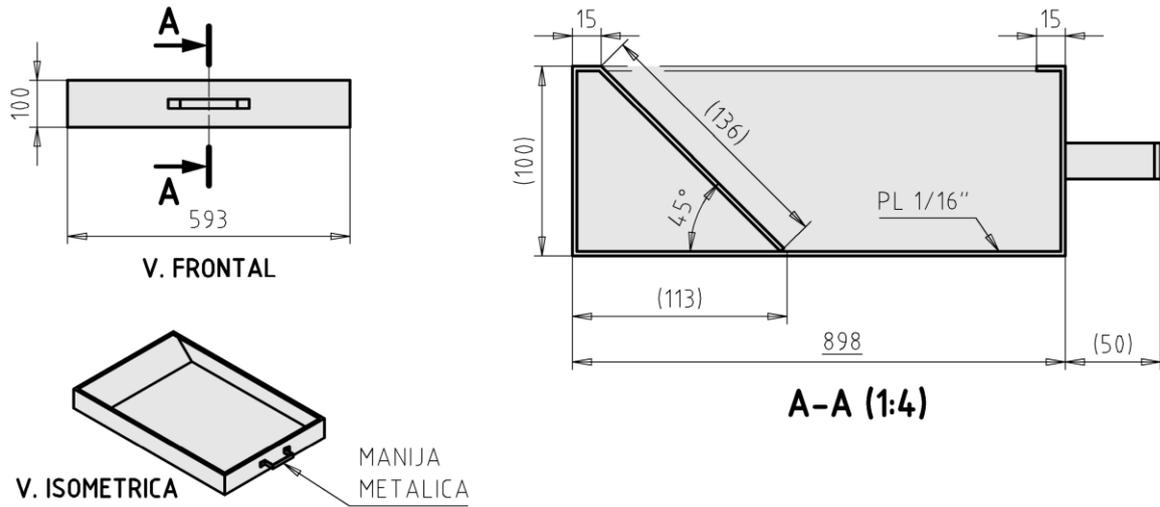
Como se muestra en la Figura 123, la tapa posee una manija metálica con dimensiones estándar para permitir un agarre ergonómico por parte del operario de mantenimiento. Esta manija está fabricada con una platina de 1/8" (3,175 mm) de espesor y un ala de 3/4" (19,05 mm) mediante dobleces.

**Depósito del Colector.** Su diseño se basa en las dimensiones del agujero para el depósito mostradas en la Figura 122, al cual se le descontarán 2 mm por lado para tener una luz que permita deslizar fácilmente cuando se le requiera. El largo del depósito será de 898 mm, que corresponde a todo el largo del colector menos 3/32" (2,38 mm) de espesor correspondientes al colector como se muestra en la Figura 124. Este depósito posee un doblez de 15 mm a todo su alrededor para evitar lesiones por corte durante su manipulación, además cuenta con una superficie a 45° en la parte posterior para mejorar el flujo de aire dentro del colector y además cuenta con una manija metálica que es idéntica a la manija usada en la tapa del filtro. El depósito estará fabricado con un espesor inferior

que el colector, ya que no estará sometido a pesos o cargas fluidodinámicas grandes, el espesor considerado será de 1/16" (1,59 mm). En la Figura 125 se muestra un ejemplo de esta fabricación.

**Figura 124**

*Depósito del colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 125**

*Ejemplo de la fabricación del depósito para el colector*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*



se dimensionan a las tuberías tomando en cuenta espacio disponible del colector para crear una cámara de 140 mm de altura, que corresponde al doble de la distancia a la cual se ubicará el sistema de limpieza respecto a la plancha espejo. Este sistema consta, además de la reducción de 1 1/4" NPT, de un codo a 90° y una unión universal de 3/4" NPT la cual permite alinear y desmontar facilitando su mantenimiento. En la Figura 127 se muestra un ejemplo de esta fabricación.

### Figura 127

*Ejemplo de la fabricación del sistema de limpieza*



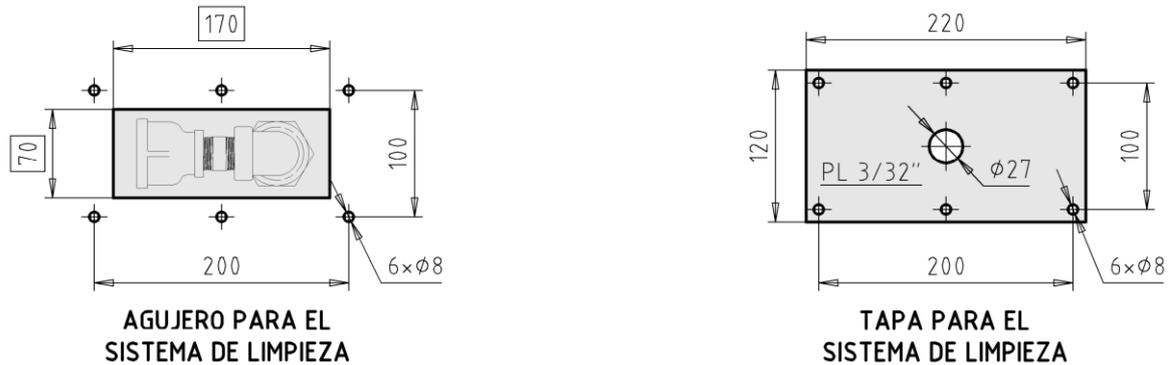
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Agujero para el Sistema de Limpieza.** Para facilitar el montaje y desmontaje del sistema de limpieza se requiere de un agujero rectangular en el cuerpo del colector con las dimensiones suficientes para que pase con facilidad todo el sistema de limpieza haciendo una maniobra de giro, como se muestra en la Figura 128. Además, posee una serie de 6 agujeros de diámetro 8 mm distribuidos en un perímetro alejado 15 mm del agujero este alejamiento es acorde con el espaciamiento para pernos de 1/4"NC en un ala de 1" como se indica en la Tabla 20. Cada uno de estos agujeros posee una tuerca de 1/4"NC (6,35 mm) soldada en el interior del colector.

*Agujero = 170 × 70 mm*

**Figura 128**

*Agujero y tapa para el sistema de limpieza*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

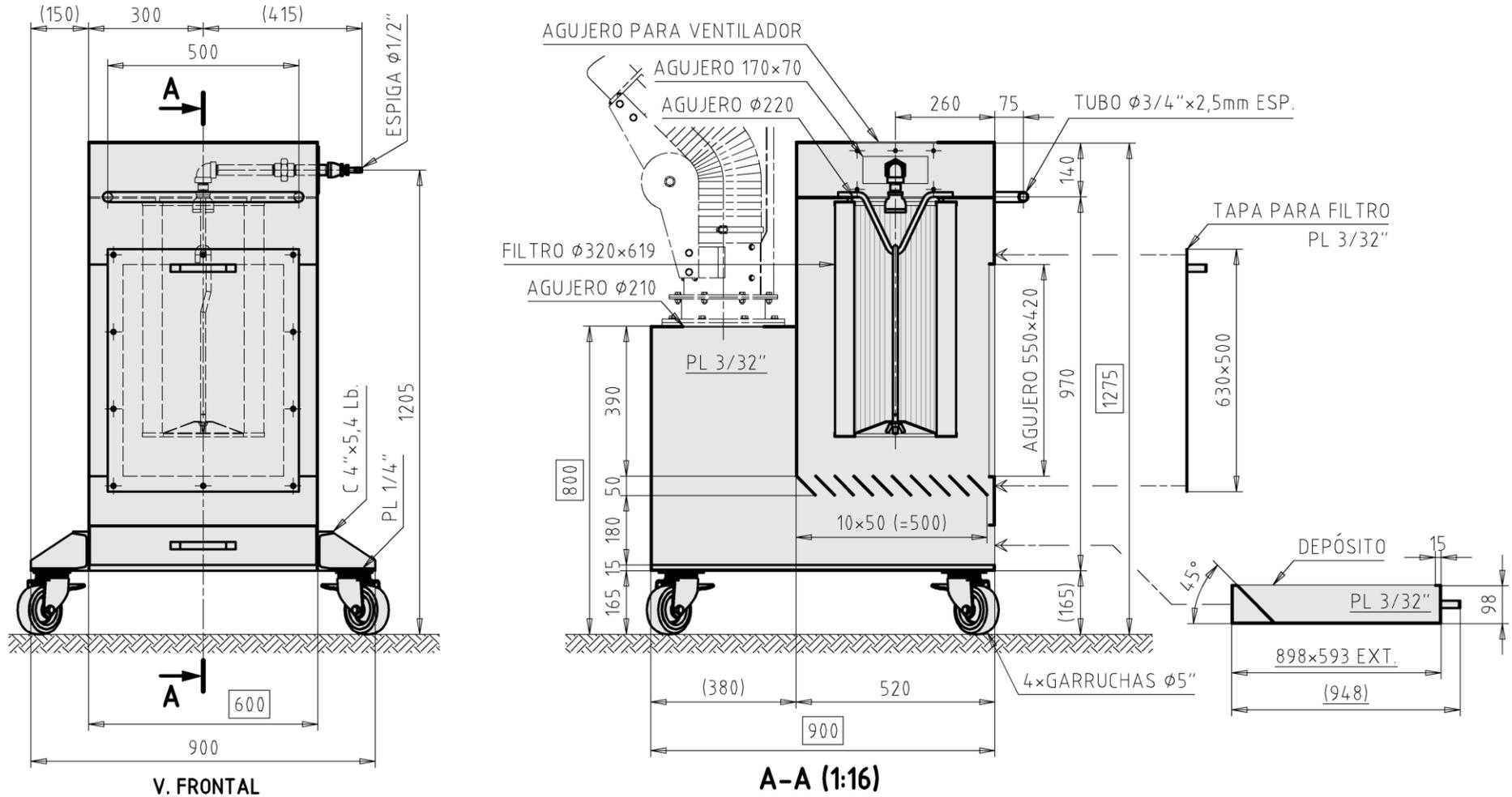
**Tapa para el Sistema de Limpieza.** Su diseño se basa en las dimensiones del agujero para el sistema de limpieza como se muestra en la Figura 128. Esta tapa tendrá un espesor de 3/32" (2,38 mm) y la misma distribución de agujeros para los pernos más un espaciado libre de 10 mm, acorde con lo establecido en la Tabla 20 para pernos de 1/4"NC en un ala de 1".

**Dimensionamiento.** Se realiza el dimensionamiento del colector, como se muestra en la Figura 129. Se añadieron dos canales de acero a ambos lados del colector, reforzados con rigidizadores y placas, que permiten la instalación de cuatro garruchas en la parte inferior. Además, se incorporó una empuñadura horizontal en todo el ancho del colector, la cual sirve como punto de apoyo para facilitar su desplazamiento en diferentes entornos. La empuñadura está fabricada con una tubería estándar de 3/4" (26,67 mm de diámetro exterior) y 2,5 mm de espesor, permitiendo su rolado en forma de "U". Asimismo, en la Figura 130 se presenta un modelo tridimensional del colector.

El material seleccionado para el colector es acero ASTM A36, mientras que las uniones emperradas están fabricadas con acero ASTM A325, garantizando su resistencia y durabilidad.

**Figura 129**

*Dimensionamiento del Colector*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 130**

*Modelo tridimensional del colector*

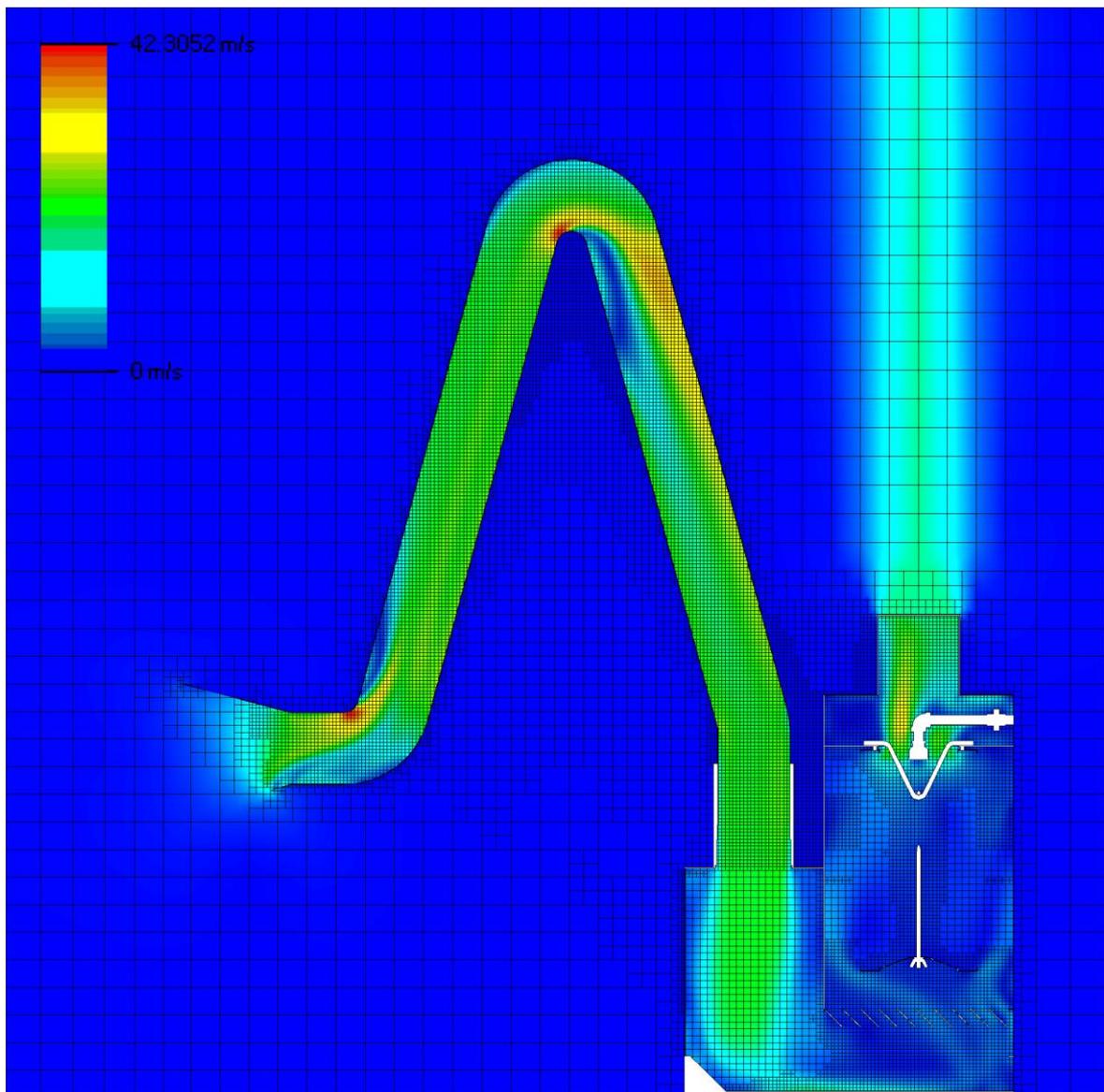


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Análisis de la Presión Estática en el Sistema.** Se llevará a cabo una simulación computacional utilizando el método de volúmenes finitos para determinar la caída de presión estática en el sistema, en relación con el ambiente, cuya presión es de 101325 Pa. La geometría para evaluar incluye la campana de extracción, el brazo articulado en su posición desfavorable más habitual (a 75°) y el colector. Se considerará un caudal de 0,63 m<sup>3</sup>/s. En este análisis, solo se tendrán en cuenta las superficies que entren en contacto por el flujo de aire.

**Figura 131**

*Velocidades del aire en el sistema*

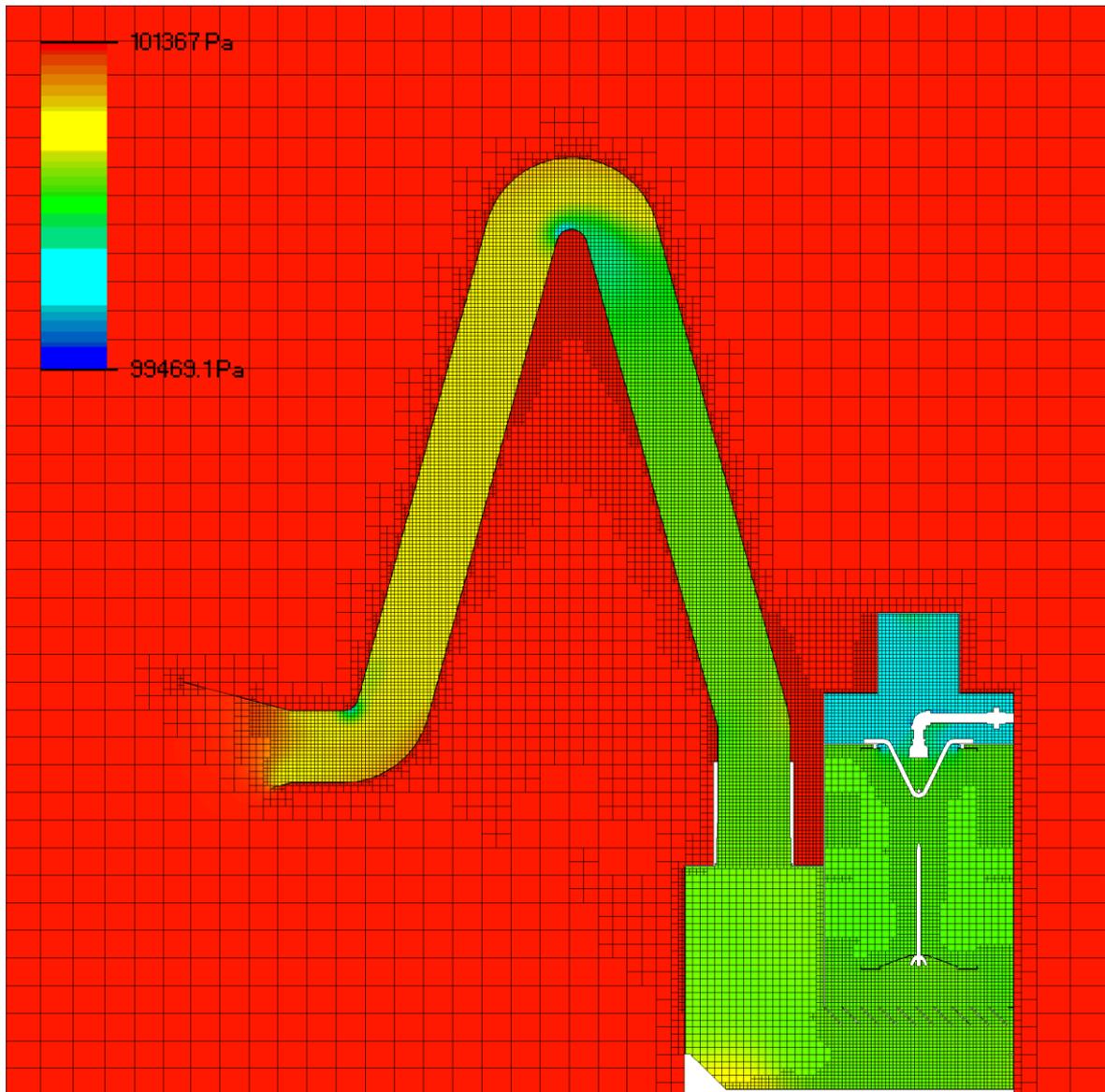


*Nota.* Simulación de 500 iteraciones. *Fuente.* Elaboración propia.

En la Figura 131 se presentan los resultados de las velocidades del aire, que muestran la distribución del flujo a lo largo de toda la máquina. En la Figura 132 se ilustran los resultados de las presiones en el fluido, calculadas mediante una simulación transitoria (en el tiempo), la cual se estabiliza después de 500 iteraciones, como se observa en la Figura 133. En esta figura se obtiene el valor de la caída de presión estática sin el filtro, que es de 123,346 mmca. Este valor no incluye la caída de presión estática en el filtro, la cual debe sumarse para obtener la presión estática del sistema

### Figura 132

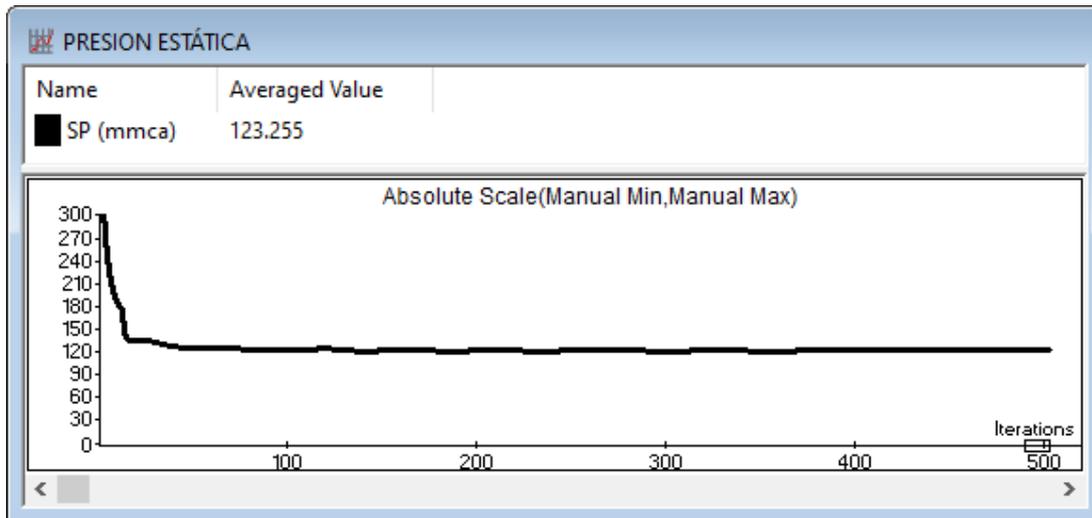
*Presiones del aire en el sistema*



*Nota.* Simulación de 500 iteraciones. *Fuente.* Elaboración propia.

**Figura 133**

*Caída de presión estática sin el filtro*



*Nota.* Simulación de 500 iteraciones. *Fuente.* Elaboración propia.

**Presión estática del sistema (SP).** Esta presión se obtiene al sumar la caída de presión estática sin el filtro, mostrada en la Figura 133, con la caída de presión estática en el filtro como se indica en la Ecuación 3.78.

$$SP = SP_s + SP_f \quad (3.78)$$

Donde:

SP = Presión estática, mmca

SP<sub>s</sub> = Caída de presión estática sin el filtro, mmca

SP<sub>f</sub> = Caída de presión estática en el filtro, mmca

Debido a que la caída de presión estática en el filtro es un valor que oscila periódicamente entre 1 y 2,5" ca cada vez que el filtro se limpie y se ensucie durante su operación normal, se establecerá el promedio de estos valores.

$$SP = 123,255 + \left(\frac{1 + 2,5}{2}\right) \cdot 25,4$$

$$SP = 167,705 \text{ mmca}$$

### 3.1.4. Diseño del Ventilador

**Especificaciones de Desempeño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran que debe hacer el ventilador.

**Caudal ( $Q$ ).** El ventilador debe ser diseñado para aportar un caudal de  $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$  en su punto de operación, el cual deberá ser lo más cercano a su punto de máxima eficiencia.

$$Q = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Presión Estática ( $SP$ ).** El ventilador del sistema debe ser diseñado para manejar una diferencia de presión que contemple tanto la resistencia del filtro como las pérdidas adicionales en el sistema, como la campana de extracción, el brazo articulado y el colector. Este valor fue determinado en el diseño del colector.

$$SP = 167,705 \text{ mmca}$$

**Velocidad de Descarga ( $v_d$ ).** Esta velocidad no debe perturbar a una persona que pueda estar cerca de la descarga de aire al ambiente. En la Tabla 26 se indican las velocidades de la escala de Beaufort, las cuales se clasifican por la percepción del ser humano, se selecciona a una brisa fresca, la cual posee una velocidad de  $11 \text{ m/s}$ .

$$v_d = 11 \text{ m/s.}$$

**Tabla 26***Escala de Beaufort*

Escala de Beaufort	Nombre de viento	Velocidad (m/s)
0	Calma	0,5
1	Aire ligero	1,5
2	Brisa ligera	3
3	Brisa suave	6
4	Brisa moderada	8
5	Brisa fresca	11
6	Brisa fuerte	14
7	Viento moderado	17
8	Viento fresco	21
9	Viento fuerte	24

*Nota. Fuente.* Soler & Palau, 2024b (<https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>).

**Nivel de Ruido del Ventilador ( $R_v$ ).** El ventilador no deberá generar un nivel de ruido mayor a 80 dbA (decibeles en la escala de ponderación A) de acuerdo a los estándares nacionales de calidad ambiental para ruido en zonas industriales, como se indica en la Tabla 27, esto corresponde al D.S. N°085-2003-PCM.

**Tabla 27***Estándares nacionales del nivel de ruido*

Zonas de aplicación	Nivel de ruido (dbA)	
	Horario Diurno	Horario Nocturno
Zona de protección especial	50	40
Zona residencial	60	50
Zona comercial	70	60
Zona industrial	80	70

*Nota. Fuente.* D.S. N°085-2003-PCMD: Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental para ruido.

**Especificaciones de Diseño.** Se procede a especificar una lista de parámetros que muestran cómo debe ser el ventilador.

**Material de Fabricación.** Como se estableció en el colector, el material de fabricación elegido será el acero ASTM A36, por su costo y resistencia estructural a espesores delgados, las uniones empernadas serán de acero ASTM A325.

**Tipo de Ventilador.** Para determinar el tipo de ventilador se realiza el cálculo del número específico de revoluciones del caudal ( $N_Q$ ), el cual se calcula mediante la Ecuación 3.79. Si este número resulta mayor a 80 se trata de un ventilador axial, en cambio si resulta menor a 80 se trata de un ventilador centrífugo.

$$N_Q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (3.79)$$

Donde:

$N_Q$  = Número específico de revoluciones del caudal

$n$  = Velocidad de rotación, RPM

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$H$  = Altura del aire, m

**Velocidad de Rotación ( $n$ ).** Para determinar esta velocidad se considera que, el motor para este ventilador será del tipo eléctrico trifásico por tratarse de un entorno industrial. Los motores trifásicos ocupan menos espacio para la gran potencia que otorgan. Para determinar la velocidad de rotación de un motor, antes se debe realizar una estimación de la potencia con la Ecuación 3.80, la cual posee un factor de elevación de potencia ( $k_p$ ) el cual permite que el motor no sufra de una sobrecarga durante su operación normal.

$$P_o = k_p \cdot \frac{Q \cdot SP}{\eta_o} \quad (3.80)$$

Donde:

$P_o =$  Potencia estimada, W

$k_p =$  Factor de elevación de potencia.

$Q =$  Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

SP = Presión estática, Pa

$\eta_o =$  Eficiencia estimada del ventilador

$$P_o = 1,2 \cdot \frac{0,63 \cdot (9,8 \cdot 167,705)}{60\%}$$

$$P_o = 2070,821 \text{ W}$$

$$P_o = 2,777 \text{ HP}$$

Dado que los motores eléctricos trifásicos están disponibles en potencias estándar como 1, 1,5, 2, 3 y 4 HP, se opta por un motor de 3 HP. Además, estos motores se clasifican según su velocidad de rotación, como se muestra en la Tabla 28. Para este caso, se selecciona el motor en alta debido a su menor peso y mayor velocidad de rotación.

**Tabla 28**

*Clasificación de motores por velocidad de rotación*

Tipo de motor trifásico	Número de polos	Velocidad de rotación (RPM)	Peso (kg)
Motor en baja	6	1140	34
Motor en media	4	1730	23
Motor en alta	2	3465	20

*Nota.* Datos técnicos para motores de 3 HP a 60 Hz. *Fuente.* Motores trifásicos cerrados IEC-60Hz-W21, por Grupo WEG Unidad Motores, 2002

Para facilitar el mantenimiento del ventilador, se utilizará un acoplamiento directo entre el motor y el rotor. De este modo, se evitarán pérdidas adicionales por transmisión y se eliminarán piezas móviles susceptibles al desgaste, como fajas y poleas. La velocidad del rotor será la misma que la velocidad de giro de su motor.

$$n = 3465 \text{ RPM}$$

**Altura de Elevación (H).** Es una manera de expresar a la presión estática por medio de metros de columna de aire, para determinar esta altura se usa la Ecuación 3.81, la cual se relaciona con las densidades del agua y del aire.

$$H = \frac{SP \cdot \rho_w}{1000 \cdot \rho_a} \quad (3.81)$$

Donde:

$H$  = Altura del aire, m

$SP$  = Presión estática, mmca

$\rho_w$  = Densidad del agua a 20° y 1 atm, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_a$  = Densidad del aire a 20° y 1 atm, kg/m<sup>3</sup>

$$H = \frac{167,705 \cdot 998}{1000 \cdot 1,2}$$

$$H = 139,475 \text{ m}$$

Se reemplazan los valores calculados en la Ecuación 3.76.

$$N_Q = \frac{3465 \cdot \sqrt{0,63}}{139,475^{3/4}}$$

$$N_Q = 67,764$$

Dado que  $N_Q < 80$  se diseñará un ventilador centrífugo.

**Componentes.** Un ventilador centrífugo de acople directo consta de los siguientes componentes:

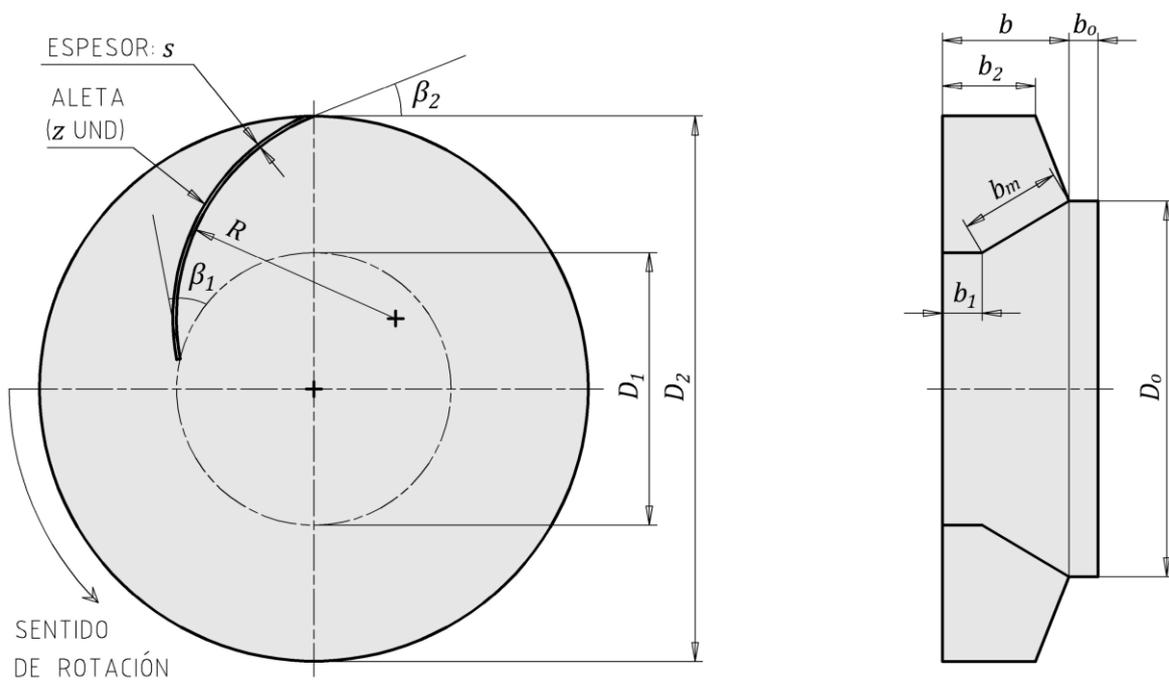
- Rotor centrífugo
- Carcasa

- Motor

**Rotor.** El diseño del rotor centrífugo consta de los parámetros mostrados en la Figura 134, donde  $D_o$  es el diámetro de ingreso,  $D_1$  es el diámetro interior,  $D_2$  es el diámetro exterior,  $\beta_1$  es el ángulo interior de la aleta,  $\beta_2$  es el ángulo exterior de la aleta,  $R$  es el radio de curvatura de la aleta,  $z$  es el número de aletas,  $s$  es el espesor de las aletas,  $b_o$  es el alto del anillo de ingreso,  $b_1$  es el alto interior de la aleta,  $b_2$  es el alto exterior de la aleta,  $b_m$  es la longitud del cono virtual de la aleta y  $b$  es el alto de la aleta.

**Figura 134**

*Parámetros de diseño de un rotor centrífugo*



*Nota. Fuente. Elaboración propia*

**Velocidad de Ingreso ( $c_o$ ).** Es la velocidad con la cual el aire ingresa al rotor centrífugo. Se determina a partir de la altura de elevación mediante la Ecuación 3.82.

$$c_o = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.82)$$

Donde:

$c_o =$  Velocidad de ingreso, m/s

$g =$  Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$H =$  Altura de elevación, m

$$c_o = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 139,475}$$

$$c_o = 13,078 \text{ m/s}$$

**Diámetro de Ingreso ( $D_o$ ).** Es el diámetro que corresponde al anillo de ingreso del rotor centrífugo. Se determina a partir de la velocidad de ingreso y el caudal mediante la Ecuación 3.83.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2 \cdot c_o \quad (3.83)$$

Donde:

$Q =$  Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$D_o =$  Diámetro de ingreso, m

$c_o =$  Velocidad de ingreso, m/s

$$0,63 = \frac{\pi}{4} \cdot D_o^2 \cdot 13,078$$

$$D_o = 0,248 \text{ m}$$

$$D_o = 248 \text{ mm}$$

**Diámetro Exterior ( $D_2$ ).** Se estima aproximadamente en 1,5 veces el diámetro de ingreso como se indica en la Ecuación 3.84.

$$D_2 \approx 1,5 \cdot D_o \quad (3.84)$$

Donde:

$D_2 =$  Diámetro exterior, m

$D_o =$  Diámetro de ingreso, m

$$D_2 \approx 1,5 \cdot 0.248$$

$$D_2 \approx 0,372 \text{ m}$$

En la industria de la ventilación, existe un tamaño estándar para el diámetro exterior de los rotores centrífugos, con el cual coinciden los fabricantes. Los diámetros disponibles son: 250, 280, 320, 360, 400, 450, 500, 560, 630, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1250, 1400, 1600, 1800 y 2000 mm. Se selecciona el diámetro que más se acerque al valor calculado. En este caso, el diámetro de descarga se establece en 360 mm.

$$D_2 = 0,360 \text{ m}$$

$$D_2 = 360 \text{ mm}$$

**Diámetro Interior ( $D_1$ ).** Se estima en 0,5 veces el diámetro exterior como se indica en la Ecuación 3.85.

$$D_1 = 0,5 \cdot D_2 \tag{3.85}$$

Donde:

$D_1 =$  Diámetro interior, m

$D_2 =$  Diámetro exterior, m

$$D_1 = 0,5 \cdot 0.360$$

$$D_1 = 0,180 \text{ m}$$

$$D_1 = 180 \text{ mm}$$

**Velocidad Tangencial Interior ( $u_1$ ).** Se determina a partir del diámetro interior y la velocidad de rotación mediante la Ecuación 3.86.

$$u_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} \quad (3.86)$$

Donde:

$u_1$  = Velocidad tangencial interior, m/s

$D_1$  = Diámetro interior, m

$n$  = Velocidad de rotación, RPM

$$u_1 = \frac{\pi \cdot 0,180 \cdot 3465}{60}$$

$$u_1 = 32,657 \text{ m/s}$$

**Velocidad Tangencial Exterior ( $u_2$ ).** Se determina a partir del diámetro exterior y la velocidad de rotación mediante la Ecuación 3.87.

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60} \quad (3.87)$$

Donde:

$u_2$  = Velocidad tangencial exterior, m/s

$D_2$  = Diámetro exterior, m

$n$  = Velocidad de rotación, RPM

$$u_2 = \frac{\pi \cdot 0,320 \cdot 3465}{60}$$

$$u_2 = 65,314 \text{ m/s}$$

**Ángulo Interior de la Aleta ( $\beta_1$ ).** Es el ángulo que se forma entre la aleta y una tangente al diámetro interior. Se determina a partir de la velocidad de ingreso, la velocidad tangencial interior, el diámetro interior, el número de aletas y el espesor de las aletas mediante la Ecuación 3.88.

$$\tan\beta_1 = \frac{c_o}{u_1} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_1}{\pi \cdot D_1 - \frac{z \cdot s}{\text{sen}\beta_1}} \right) \quad (3.88)$$

Donde:

$\beta_1$  = Ángulo interior de la aleta, °

$c_o$  = Velocidad de ingreso, m/s

$u_1$  = Velocidad tangencial interior, m/s

$z$  = Número de aletas

$s$  = Espesor de las aletas, m

Se estima el número de aletas en 7 unidades y su espesor en 3/32" (2,38 mm) el cual no presenta problemas al momento de soldar en acero ASTM A36 y mantiene una buena rigidez para vencer a las fuerzas centrífugas que serán analizadas más adelante.

$$\tan\beta_1 = \frac{13,078}{32,657} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 0,180}{\pi \cdot 0,180 - \frac{7 \cdot 0,00238}{\text{sen}\beta_1}} \right)$$

$$\beta_1 = 23,392^\circ$$

**Ángulo Exterior de la Aleta ( $\beta_2$ ).** Es el ángulo que se forma entre la aleta y una tangente al diámetro exterior. Se determina a partir de la velocidad tangencial exterior, la velocidad de ingreso y la altura teórica de elevación para infinitas aletas mediante la Ecuación 3.89.

$$u_2 = \frac{c_o}{2 \cdot \tan\beta_2} + \sqrt{\left(\frac{c_o}{2 \cdot \tan\beta_2}\right)^2 + g \cdot H_{th\infty}} \quad (3.89)$$

Donde:

$u_2$  = Velocidad tangencial exterior, m/s

$c_o$  = Velocidad de ingreso, m/s

$\beta_2$  = Ángulo exterior de la aleta, °

$g$  = Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$H_{th\infty}$  = Altura teórica de elevación para infinitas aletas, m

**Altura Teórica de Elevación para Infinitas Aletas ( $H_{th\infty}$ ).** Se determina a partir de la altura de elevación al incorporar un factor de elevación y un coeficiente de disminución de potencia mediante en la Ecuación 3.90

$$H_{th\infty} = \frac{H}{r_{th}} \cdot (1 + p) \quad (3.90)$$

Donde:

$H_{th\infty}$  = Altura teórica de elevación para infinitas aletas, m

$H$  = Altura de elevación, m

$r_{th}$  = Factor de elevación

$p$  = Coeficiente de disminución de potencia

**Coeficiente de Disminución de Potencia ( $p$ ).** Se determina a partir del coeficiente de presión, el número de aletas, el diámetro exterior y el diámetro interior mediante la Ecuación 3.91.

$$p = 2 \cdot \frac{\psi}{z} \cdot \frac{D_2^2}{D_2^2 - D_1^2} \quad (3.91)$$

Donde:

$p =$  Coeficiente de disminución de potencia

$\psi =$  Coeficiente de presión

$z =$  Número de aletas

$D_2 =$  Diámetro exterior, m

$D_1 =$  Diámetro interior, m

**Coeficiente de Presión ( $\psi$ ).** Se determina a partir del ángulo exterior de la aleta y la relación entre los diámetros del rotor mediante en la Ecuación 3.92.

$$\psi = 1,2 \cdot (1 + \operatorname{sen}\beta_2) \cdot \frac{D_1}{D_2} \quad (3.92)$$

Donde:

$\psi =$  Coeficiente de presión

$\beta_2 =$  Ángulo exterior de la aleta, °

$D_1 =$  Diámetro interior, m

$D_2 =$  Diámetro exterior, m

Se reemplaza a la Ecuación 3.92 en la Ecuación 3.91 y ésta a su vez en la Ecuación 3.93, estimando un factor de elevación ( $r_{th}$ ) en 0,84.

$$H_{th\infty} = \frac{H}{r_{th}} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{1,2 \cdot (1 + \operatorname{sen}\beta_2) \cdot \frac{D_1}{D_2}}{z} \cdot \frac{D_2^2}{D_2^2 - D_1^2} \right)$$
$$H_{th\infty} = \frac{139,475}{0,84} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \frac{1,2 \cdot (1 + \operatorname{sen}\beta_2) \cdot \frac{0,180}{0,360}}{7} \cdot \frac{0,360^2}{0,360^2 - 0,180^2} \right)$$
$$H_{th\infty} = 166,0417 \cdot (1 + 0,2286 \cdot (1 + \operatorname{sen}\beta_2)) \quad (3.93)$$

Se reemplaza a la Ecuación 3.93 en la Ecuación 3.89.

$$u_2 = \frac{c_o}{2 \cdot \tan\beta_2} + \sqrt{\left(\frac{c_o}{2 \cdot \tan\beta_2}\right)^2 + g \cdot 164,042 \cdot (1 + 0,229 \cdot (1 + \text{sen}\beta_2))}$$

$$65,314 = \frac{13,078}{2 \cdot \tan\beta_2} + \sqrt{\left(\frac{13,078}{2 \cdot \tan\beta_2}\right)^2 + 9,81 \cdot 164,042 \cdot (1 + 0,229 \cdot (1 + \text{sen}\beta_2))}$$

$$\beta_2 = 21,890^\circ$$

**Número de aletas (z).** Se verifica que el valor estimado del número de aletas (7) sea el correcto mediante la Ecuación 3.94.

$$z \approx k_z \cdot \left(\frac{D_2 - D_1}{D_2 + D_1}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\beta_2 + \beta_1}{2}\right) \quad (3.94)$$

Donde:

$z$  = Número de aletas

$k_z$  = Coeficiente del número de aletas

$D_2$  = Diámetro exterior, m

$D_1$  = Diámetro interior, m

$\beta_2$  = Ángulo exterior de la aleta, °

$\beta_1$  = Ángulo interior de la aleta, °

Se estima el coeficiente del número de aletas ( $k_z$ ) en 6, esto corresponde al diseño de rotores centrífugos de media y alta velocidad de rotación (1750 a 3500 RPM)

$$z \approx 6 \cdot \left(\frac{0,360 - 0,180}{0,360 + 0,180}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{21,890 + 23,392}{2}\right)$$

$$z \approx 6,929$$

$$z = 7$$

La verificación del número de aletas es correcta.

**Radio de Curvatura de la Aleta ( $R$ ).** Es el radio que aporta la curvatura a la aleta, como se muestra en la Figura 135, generando con su trazo a los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$ . Se determina a partir de los diámetros del rotor y los ángulos de la aleta mediante en la Ecuación 3.95.

$$R = \frac{D_2^2 - D_1^2}{4 \cdot (D_2 \cdot \cos\beta_2 - D_1 \cdot \cos\beta_1)} \quad (3.95)$$

Donde:

$D_2$  = Diámetro exterior, m

$D_1$  = Diámetro interior, m

$\beta_2$  = Ángulo exterior de la aleta, °

$\beta_1$  = Ángulo interior de la aleta, °

$$R = \frac{0,360^2 - 0,180^2}{4 \cdot (0,360 \cdot \cos(21,890^\circ) - 0,180 \cdot \cos(23,392^\circ))}$$

$$R = 0,1439 \text{ m}$$

$$R = 143,9 \text{ mm}$$

**Longitud de la Aleta ( $L_a$ ).** La longitud del desarrollo de la aleta permite dimensionar las 7 aletas, las cuales tienen un espesor de 3/32" (2,38 mm), y que posteriormente serán roladas hasta alcanzar el radio de curvatura indicado en 143,9 mm. Con los valores calculados, se procede a trazar la forma de la aleta en su vista frontal, como se muestra en la Figura 135. En ella, se determina esta longitud.

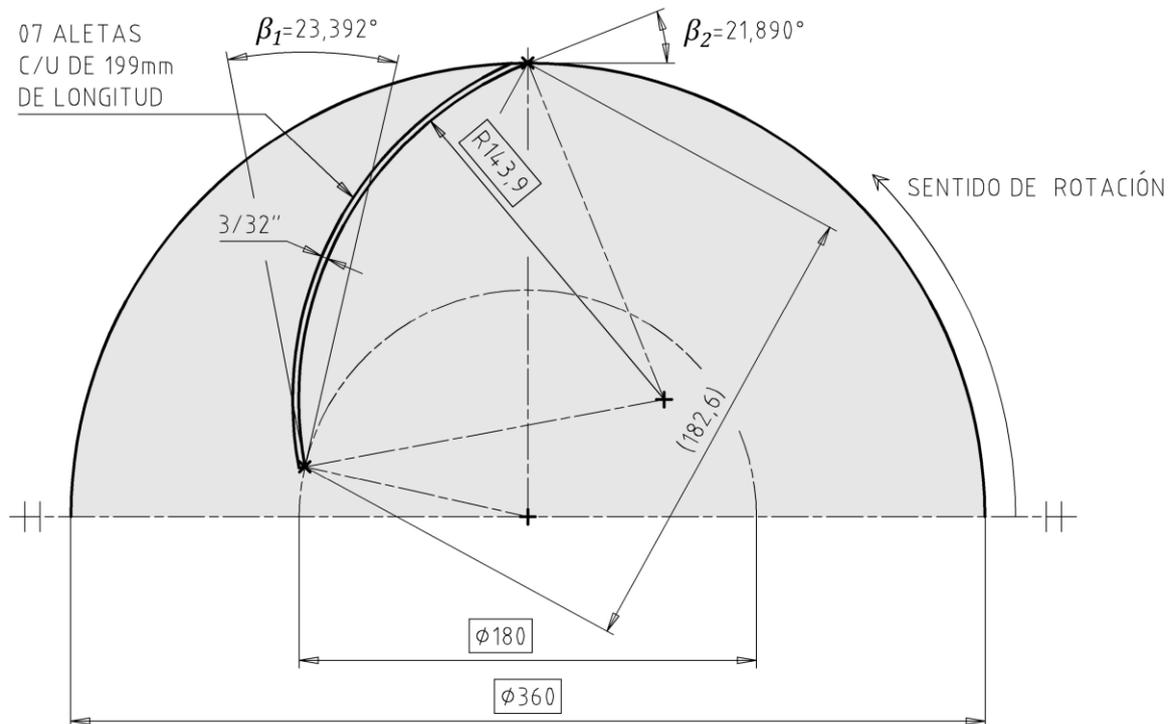
$$L_a = 199 \text{ mm}$$

**Cuerda de la Aleta ( $c_a$ ).** La cuerda del arco circular que forma la aleta se utiliza para elaborar el trazado geométrico en la base del rotor centrífugo, mediante un compás, una punta para rayar metales y un punzón. Este valor se obtiene de la Figura 135.

$$c_a = 182,6 \text{ mm}$$

**Figura 135**

*Trazado frontal de la aleta del rotor centrífugo*

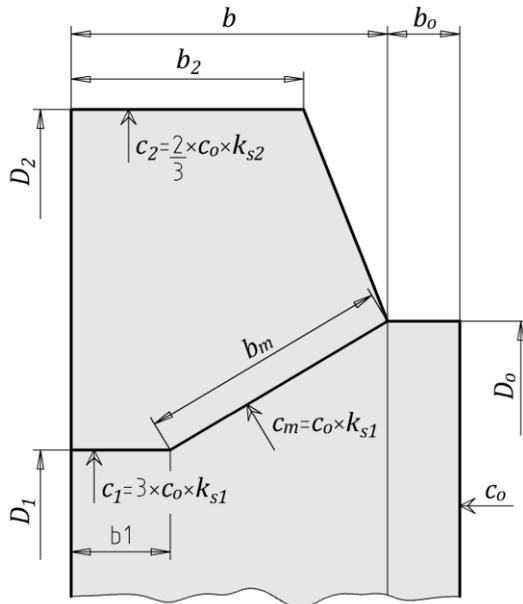


Nota. Fuente. Elaboración propia

**Velocidades del Aire en la Aleta.** Para el diseño de rotores centrífugos de media y alta velocidad de rotación (1750 a 3500 RPM), se considera una forma de aleta que incluye un bisel de recepción, el cual orienta el flujo de aire de manera más eficiente que una aleta recta, como se muestra en la Figura 136. En esta figura,  $c_1$  representa la velocidad en el diámetro interior,  $c_m$  es la velocidad en el diámetro medio y  $c_2$  es la velocidad en el diámetro exterior. Los coeficientes 3, 1 y 2/3 que acompañan la velocidad de ingreso ( $c_o$ ) en cada sección corresponden a criterios experimentales obtenidos por el autor en su experiencia en el diseño de rotores centrífugos. Los factores de aumento por espesor de aleta ( $k_{s1}$  y  $k_{s2}$ ) corresponden a la relación entre el área sin aletas y con aletas del área lateral de un cilindro virtual que pasa por D1 y D2 respectivamente.

**Figura 136**

*Velocidades del aire en la aleta*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

$$k_{s1} = \frac{\text{ÁREA SIN ALETAS EN } D_1}{\text{ÁREA CON ALETAS EN } D_1} = \frac{\pi \cdot D_1}{\pi \cdot D_1 - \frac{z \cdot s}{\sin(\beta_1)}}$$

$$k_{s2} = \frac{\text{ÁREA SIN ALETAS EN } D_2}{\text{ÁREA CON ALETAS EN } D_2} = \frac{\pi \cdot D_2}{\pi \cdot D_2 - \frac{z \cdot s}{\sin(\beta_2)}}$$

**Velocidad en el Diámetro Interior ( $c_1$ ).** Se obtiene a partir de la velocidad de ingreso al incorporar un factor de aumento por espesor de aleta en  $D_1$  según lo indicado en la Figura 136 que se expresa mediante en la Ecuación 3.96.

$$c_1 = 3 \cdot c_o \cdot \frac{\pi \cdot D_1}{\pi \cdot D_1 - \frac{z \cdot s}{\text{sen}\beta_1}} \quad (3.96)$$

Donde:

$c_1$  = Velocidad en el diámetro interior, m/s

$c_o$  = Velocidad de ingreso, m/s

$D_1$  = Diámetro interior, m

$z$  = Número de aletas

$s$  = Espesor de las aletas, m

$\beta_1$  = Ángulo interior de la aleta, °

$$c_1 = 3 \cdot 13,078 \cdot \frac{\pi \cdot 0,180}{\pi \cdot 0,180 - \frac{7 \cdot 0,00238}{\text{sen}(23,392^\circ)}}$$

$$c_1 = 42,379 \text{ m/s}$$

**Velocidad en el Diámetro Medio ( $c_m$ ).** Se obtiene a partir de la velocidad de ingreso al incorporar un factor de aumento por espesor de aleta en  $D_1$  según lo indicado en la Figura 136 que se expresa mediante en la Ecuación 3.97.

$$c_m = c_o \cdot \frac{\pi \cdot D_1}{\pi \cdot D_1 - \frac{z \cdot s}{\text{sen}\beta_1}} \quad (3.97)$$

Donde:

$c_m$  = Velocidad en el diámetro medio, m/s

$c_o$  = Velocidad de ingreso, m/s

$D_1$  = Diámetro interior, m

$z$  = Número de aletas

$s$  = Espesor de las aletas, m

$\beta_1$  = Ángulo interior de la aleta, °

$$c_m = c_o \cdot \frac{\pi \cdot 0,180}{\pi \cdot 0,180 - \frac{7 \cdot 0,00238}{\text{sen}(23,392^\circ)}}$$

$$c_m = 14,126 \text{ m/s}$$

**Velocidad en el Diámetro Exterior ( $c_2$ ).** Se obtiene a partir de la velocidad de ingreso al incorporar un factor de aumento por espesor de aleta en  $D_2$  según lo indicado en la Figura 136 y se expresa mediante en la Ecuación 3.98.

$$c_2 = \frac{2}{3} \cdot c_o \cdot \frac{\pi \cdot D_2}{\pi \cdot D_2 - \frac{z \cdot s}{\text{sen}\beta_2}} \quad (3.98)$$

Donde:

$c_2$  = Velocidad en el diámetro exterior, m/s

$c_o$  = Velocidad de ingreso, m/s

$D_2$  = Diámetro exterior, m

$z$  = Número de aletas

$s$  = Espesor de las aletas, m

$\beta_2$  = Ángulo exterior de la aleta, °

$$c_2 = \frac{2}{3} \cdot 13,078 \cdot \frac{\pi \cdot 0,360}{\pi \cdot 0,360 - \frac{7 \cdot 0,00238}{\text{sen}(21,890^\circ)}}$$

$$c_2 = 9,077 \text{ m/s}$$

**Alto del Anillo de Ingreso ( $b_o$ ).** Corresponde al diámetro de ingreso, como se muestra en la Figura 136. El anillo se fabricará utilizando una platina con un espesor mínimo de 1/8" (3,175 mm) para permitir su mecanizado. Se considera una platina estándar de 1/8" x 3/4" (3,175 x 19,05 mm), y dado que este anillo de ingreso estará montado sobre el cono del rotor, su longitud se incrementará en más de 20 mm, lo que también requerirá ser mecanizado. Por lo tanto, se establece que la altura final del anillo de ingreso sea de 19 mm.

$$b_o = 19 \text{ mm}$$

**Alto Interior de la Aleta ( $b_1$ ).** Corresponde al alto de un cilindro virtual que pasa por  $D_1$  por cuya área lateral circula el caudal de aire, como se muestra en la Figura 136. Se determina a partir del caudal, el diámetro interior y la velocidad en el diámetro interior mediante la Ecuación 3.99.

$$b_1 = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot c_1} \quad (3.99)$$

Donde:

$b_1$  = Altura interior de la aleta, m

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$D_1$  = Diámetro interior, m

$c_1$  = Velocidad en el diámetro interior, m/s

$$b_1 = \frac{0,63}{\pi \cdot 0,180 \cdot 42,379}$$

$$b_1 = 0,026 \text{ m}$$

$$b_1 = 26 \text{ mm}$$

**Longitud del Cono Virtual de la Aleta ( $b_1$ ).** Corresponde a la generatriz de un cono virtual que se forma entre  $D_o$  y  $D_1$  por cuya área lateral circula el caudal de aire, como se muestra en la Figura 136. Se determina a partir del caudal, el promedio entre los diámetros del cono y la velocidad en el diámetro medio mediante la Ecuación 3.100.

$$b_m = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\frac{D_o + D_1}{2}\right) \cdot c_m} \quad (3.100)$$

Donde:

$b_1$  = Altura interior de la aleta, m

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$D_o$  = Diámetro de ingreso, m

$D_1$  = Diámetro interior, m

$c_m$  = Velocidad en el diámetro medio, m/s

$$b_m = \frac{0,63}{\pi \cdot \left(\frac{0,248 + 0,180}{2}\right) \cdot 14,126}$$

$$b_m = 0,066 \text{ m}$$

$$b_m = 66 \text{ mm}$$

**Alto Exterior de la Aleta ( $b_1$ ).** Corresponde al alto de un cilindro virtual que pasa por  $D_2$  por cuya área lateral circula el caudal de aire, como se muestra en la Figura 136. Se determina a partir del caudal, el diámetro exterior y la velocidad en el diámetro exterior mediante la Ecuación 3.101.

$$b_2 = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot c_2} \quad (3.101)$$

Donde:

$b_2$  = Altura exterior de la aleta, m

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$D_2$  = Diámetro exterior, m

$c_2$  = Velocidad en el diámetro exterior, m/s

$$b_2 = \frac{0,63}{\pi \cdot 0,360 \cdot 9,077}$$

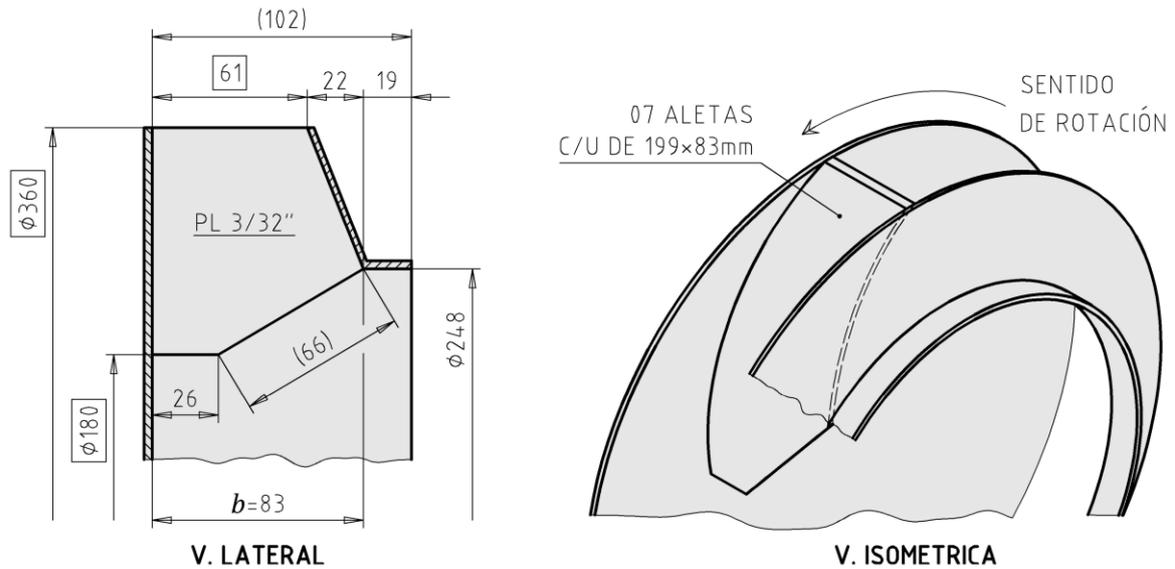
$$b_2 = 0,061 \text{ m}$$

$$b_2 = 61 \text{ mm}$$

Con los valores calculados se procede a trazar la forma de la aleta en su vista lateral, como se muestra en la Figura 137.

**Figura 137**

*Trazado lateral de la aleta del rotor centrífugo*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Alto de la Aleta ( $b$ ).** Se determina a partir del trazado geométrico de los diámetros y los altos de la aleta calculados, como se muestra en la Figura 137.

$$b = 83 \text{ mm}$$

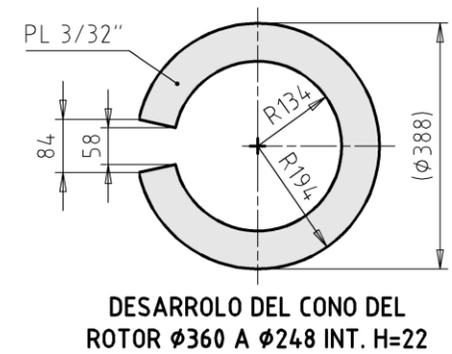
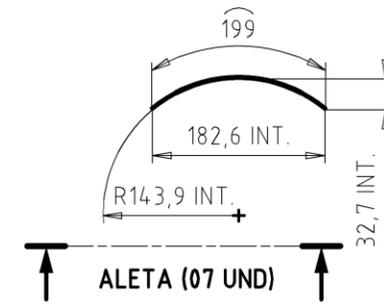
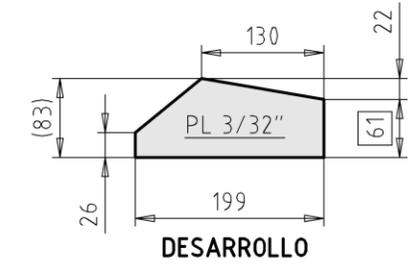
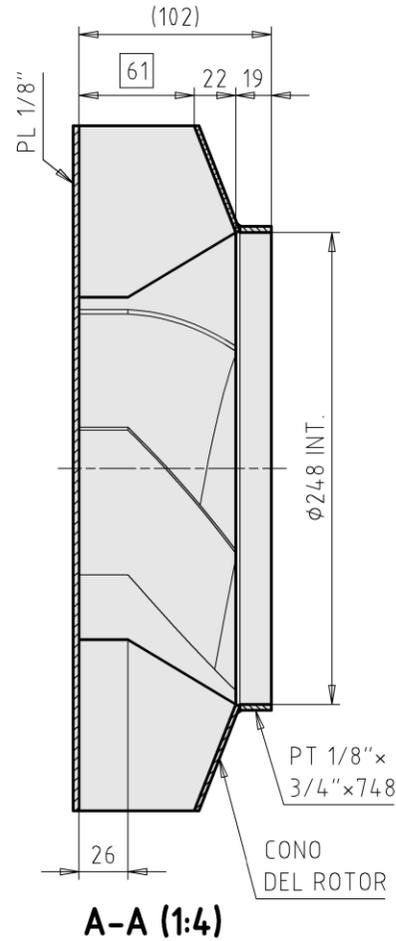
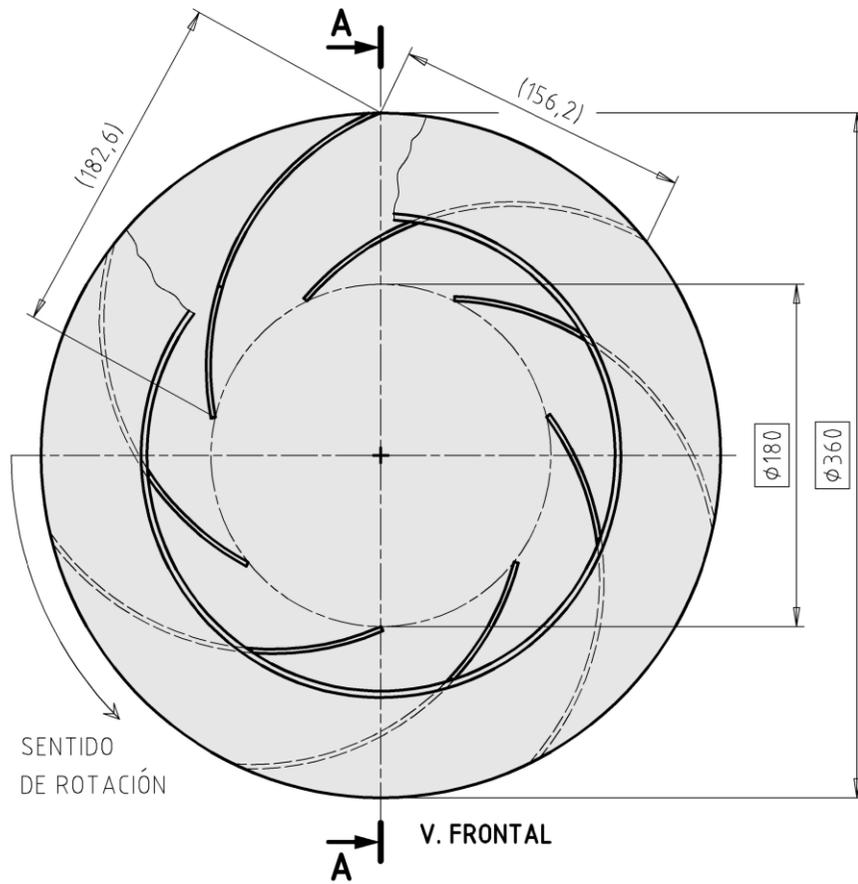
**Dimensionamiento del Rotor Centrífugo.** Para la fabricación del rotor centrífugo además de las dimensiones determinadas, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones constructivas:

- Cada una de las siete aletas que componen al rotor centrífugo estarán fabricadas en acero ASTM 36 a partir de una plancha de 3/32" (2,38 mm) de espesor cortada con la forma de la aleta en tramos de 199x83 mm que luego serán rolados.
- Se recomienda que el cono del rotor que va por encima de los aletas tenga el mismo espesor que los aletas, es decir 3/32" (2,38 mm)
- Se recomienda que el disco de la base de los aletas sea más rígido que las aletas, por lo que su espesor será de 1/8" (3,175 mm).
- El anillo de succión estará fabricado con una platina de 1/8"x3/4" (3,175 mm x 19,05 mm).

A continuación, se representa el dimensionamiento del rotor centrífugo en la Figura 138, es importante aclarar que aún no se ha dimensionado a la bocamaza (componente que conecta el eje del motor con el rotor centrífugo) ya que esto depende tanto del diseño de la carcasa como de la selección adecuada del motor.

**Figura 138**

*Dimensionamiento del rotor centrífugo*

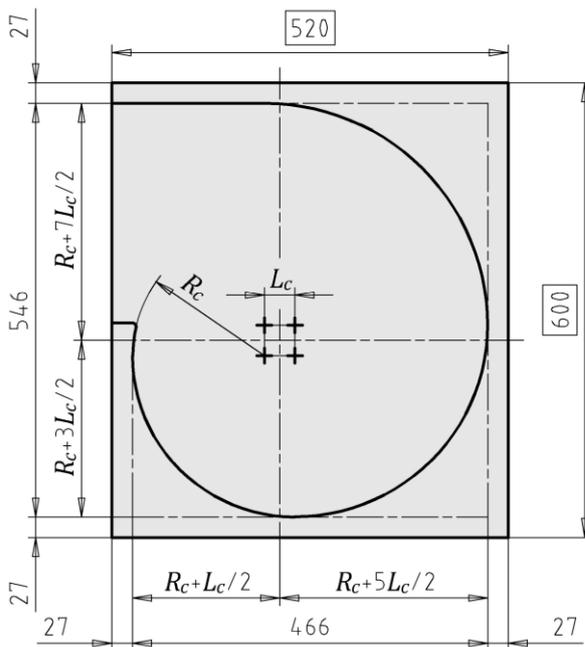


Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Carcasa.** El tamaño de la carcasa del ventilador no deberá exceder los 520 x 600 mm para poder ser instalada dentro de la máquina de extracción de humos. Siguiendo la premisa de mantener un diseño compacto de la máquina de extracción de humos, se procurará aprovechar al máximo todo el espacio disponible, evitando incrementar aún más la altura de la máquina. Por esta razón, se dejará un margen de 1" (25,4 mm), más un espesor asumido de 1/16" (1,59 mm), lo que da un margen total de aproximadamente 27 mm por lado. En esta región se trazará la carcasa que contendrá al rotor centrífugo de 360 mm de diámetro, utilizando el método del cuadrado central, como se muestra en la Figura 139, donde  $L_c$  es el lado del cuadrado central y  $R_c$  es el radio de trazo.

**Figura 139**

*Trazado de la carcasa*



*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

De la Figura 139 se obtienen un sistema de dos ecuaciones con dos variables, como se indica en la Ecuación 3.102.

$$\begin{cases} 2R_c + 3L_c = 466 \\ 2R_c + 5L_c = 546 \end{cases} \quad (3.102)$$

Donde:

$R_c =$  Radio de trazo, mm

$L_c =$  Lado del cuadrado central, mm

Al resolver la Ecuación 3.102 se obtienen:

$$L_c = 40 \text{ mm}$$

$$R_c = 173 \text{ mm}$$

**Largo de la Descarga ( $L_d$ ).** La descarga del ventilador centrífugo consiste en una sección rectangular, cuyo largo debe ser lo más grande posible, sin aumentar más la altura de la máquina de extracción de humos. Según lo mostrado en la Figura 140, se dispone de 313 mm de espacio, de los cuales se utilizarán 290 mm.

$$L_d = 290 \text{ mm}$$

**Ancho de la Descarga ( $l_d$ ).** El ancho de la descarga dependerá de la velocidad de descarga, la cual fue establecida en 11 m/s, como se indica en la Ecuación 3.103, que relaciona al caudal con la superficie rectangular de la descarga.

$$Q = v_d \cdot L_d \cdot l_d \quad (3.103)$$

Donde:

$Q =$  Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$v_c =$  Velocidad de descarga, m/s

$L_c =$  Largo de la descarga, m

$l_c =$  Ancho de la descarga, m

$$0,63 = 11 \cdot 0,29 \cdot l_d$$

$$l_d = 0,197 \text{ m}$$

Se redondea al valor más próximo en mm:

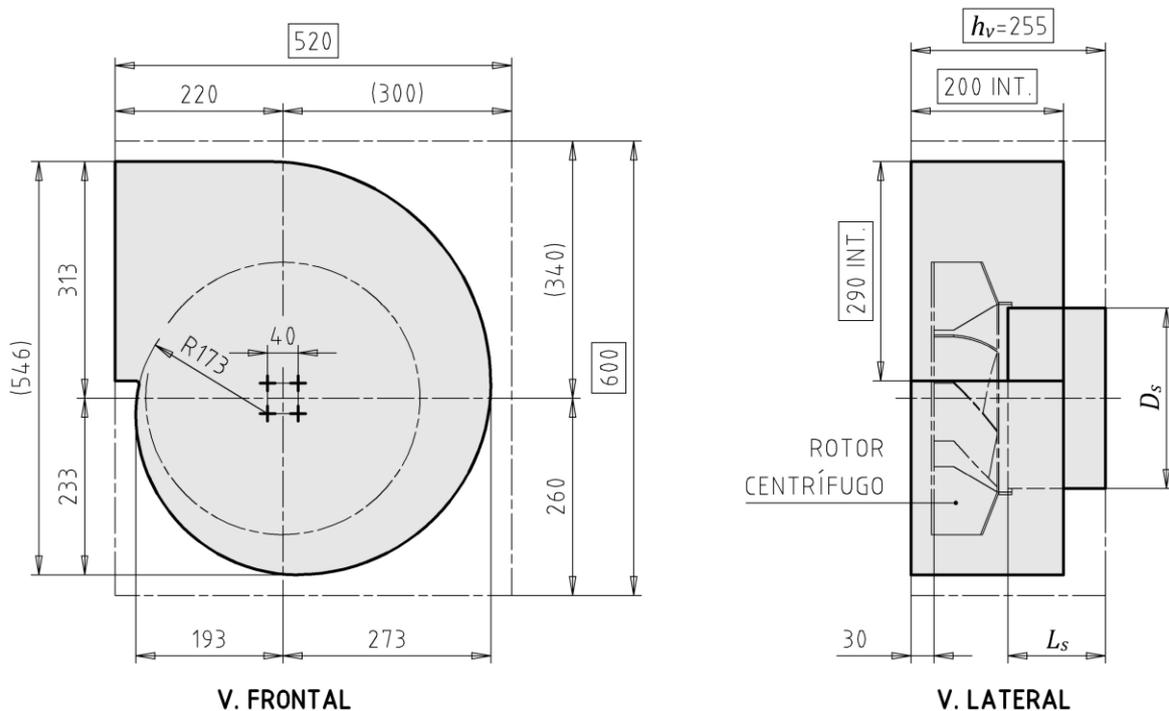
$$l_d = 200 \text{ mm}$$

**Altura total del ventilador centrífugo ( $h_v$ ).** Debido a que la carcasa requiere un ducto de succión, se recomienda que éste sobresalga al menos 50 mm de la carcasa. Por lo tanto, considerando el ancho de 200 mm y los espesores que aún deben definirse, se utilizará una altura total de 255 mm para el ventilador centrífugo, como se muestra en la Figura 140.

$$h_v = 255 \text{ mm}$$

**Figura 140**

*Dimensiones de la carcasa*

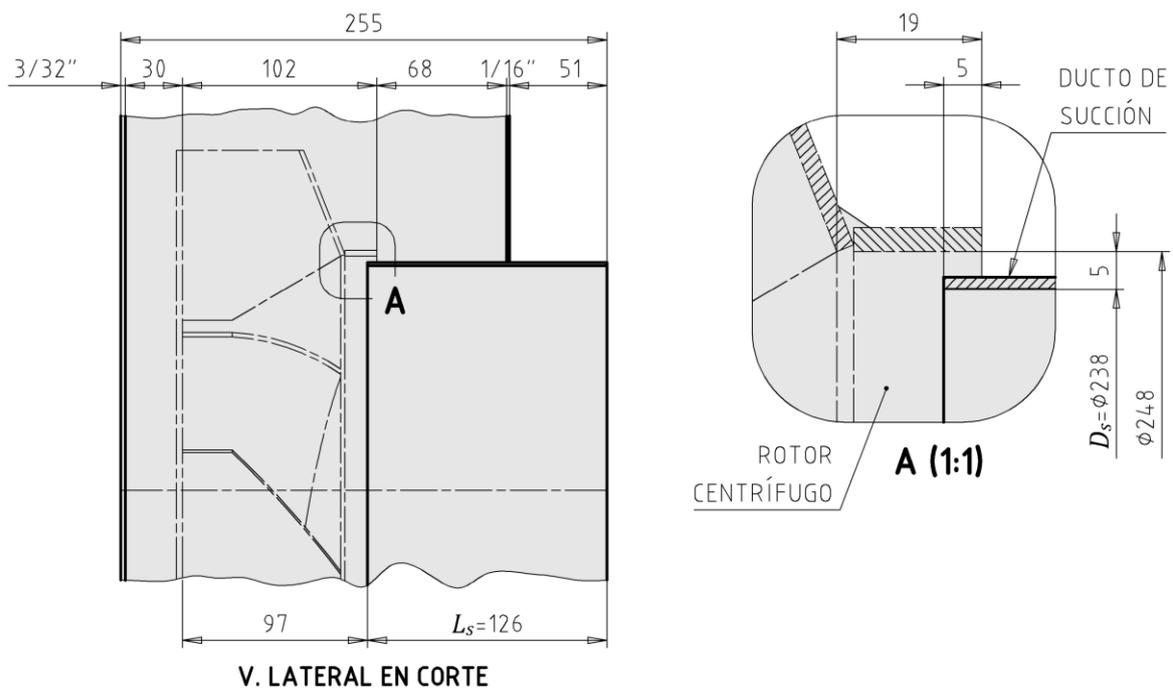


Nota. Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 140 se muestra el trazado de la carcasa, que incluye las dimensiones correspondientes al método del cuadrado central y a la descarga. El rotor centrífugo se coloca dentro de la carcasa, dejando un margen de 30 mm para permitir la instalación de la bocamaza, componente que conecta el eje del motor con el rotor centrífugo. Se ha establecido que la carcasa sea fabricada completamente en acero ASTM A36, con un espesor de 1/16" (1,59 mm), a excepción de la cara que se conectará con el motor, cuyo espesor se fijará en 3/32" (2,38 mm). Además, en la Figura 140 también se representa al ducto de succión, indicado por el diámetro de succión ( $D_s$ ) y su longitud ( $L_s$ ).

**Figura 141**

*Ducto de succión de la carcasa*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Diámetro de Succión ( $D_s$ ).** La succión del ventilador centrífugo consiste en una sección circular cuyo diámetro debe ser menor que el diámetro de ingreso del rotor centrífugo (248 mm) para asegurar un encaje adecuado. Se recomienda que este diámetro sea 10 mm menor que el del ingreso del rotor, es decir, de 238 mm, y que se sitúe a una

profundidad de 5 mm, tal como se muestra en la Figura 141, donde se presenta un corte lateral con el detalle del encaje.

$$D_s = 238 \text{ mm}$$

**Longitud del Ducto de Succión ( $L_s$ ).** Se obtiene de la Figura 141, tomando como referencia la altura total del ventilador de 255 mm y descontando el espesor de 3/32" (2,38 mm) y las longitudes de 30 mm y 97 mm. El resultado es una longitud de 126 mm.

$$L_s = 126 \text{ mm}$$

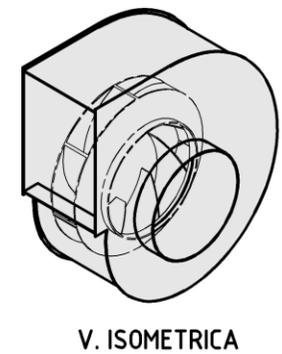
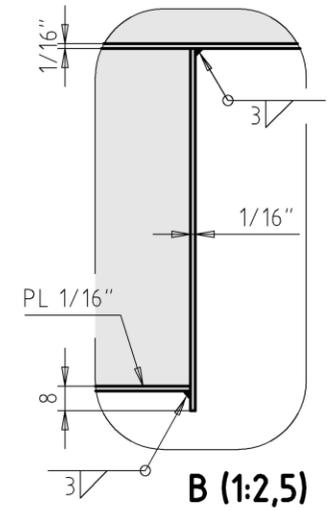
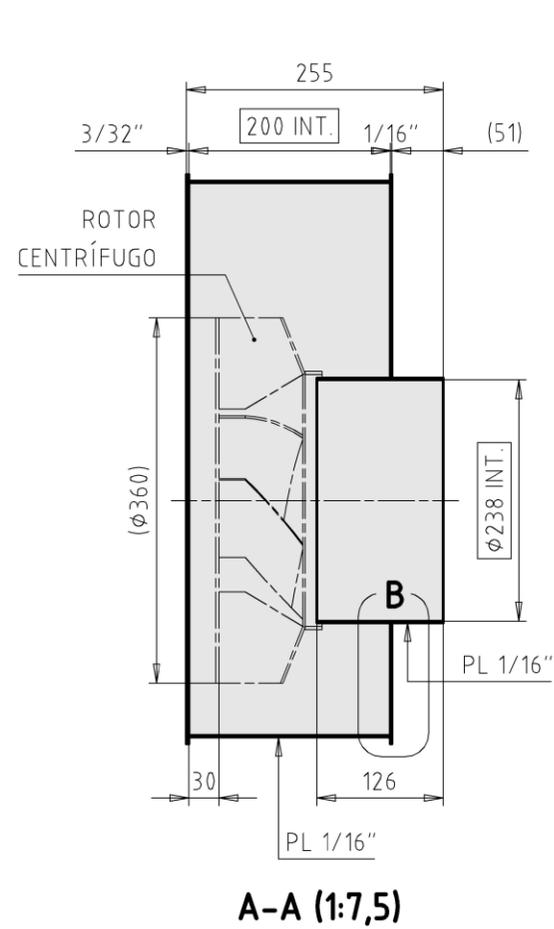
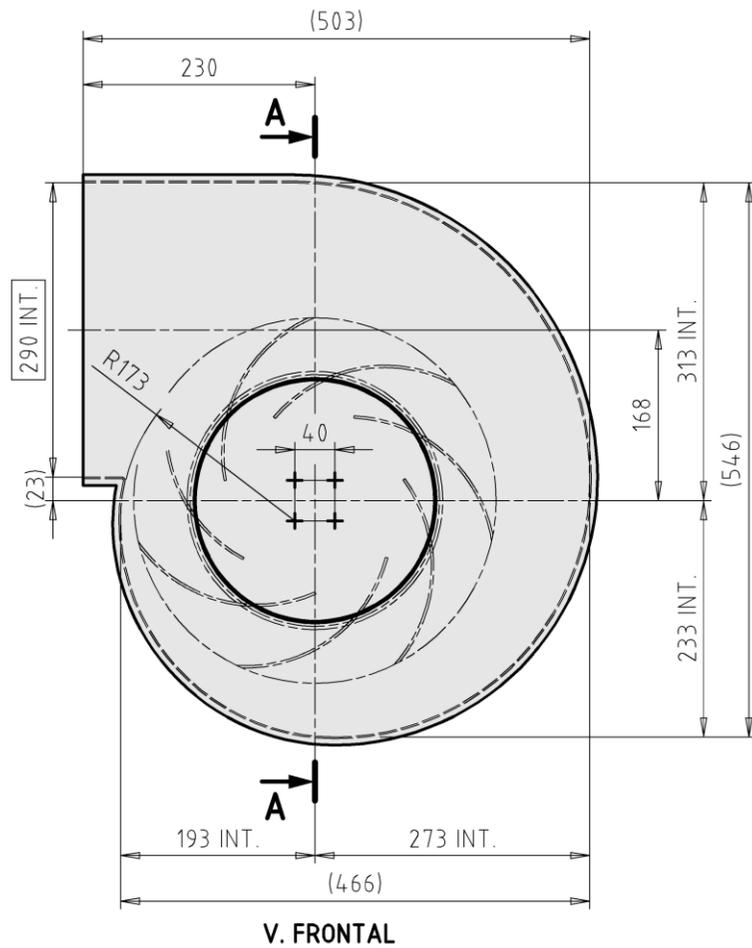
**Dimensionamiento de la Carcasa.** Para la fabricación de la carcasa, además de las dimensiones determinadas, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones constructivas:

- Se estableció que todo el espesor de la carcasa sea de 1/16" (1,59 mm), con la excepción de la cara donde se conectará con el motor, la cual tendrá un espesor de 3/32" (2,38 mm).
- La carcasa del ventilador consta de una cinta con un ancho constante de 200 mm y un espesor de 1/16" (1,59 mm), la cual adoptará la forma de la voluta mediante el proceso de rolado.
- Debido a las dimensiones, la carcasa solo puede soldarse por fuera. Por lo tanto, se recomienda dejar un margen entre ambas caras que sea dos veces el cateto de soldadura, el cual se establece en 3 mm por tratarse de piezas delgadas (menores a 1/4"). Al sumar el espesor de la voluta (1,59 mm) y los 6 mm de margen, se obtiene un margen total de 7,59 mm, el cual se redondea a 8 mm.
- Si, tras el análisis computacional, se determina que el nivel de ruido es superior a 80 dB(A), se deberá considerar el uso de un silenciador externo, que puede fabricarse con plancha perforada del mismo espesor que la carcasa, y lana de vidrio como material de relleno alrededor de la estructura.

A continuación, se presenta el dimensionamiento de la carcasa en la Figura 142. Es importante aclarar que la carcasa debe contar con un agujero para insertar el rotor centrífugo en la cara donde se conectará con el motor, además de una tapa del mismo espesor que esta cara, es decir,  $3/32$ ". Esta tapa aún no se muestra, ya que, para diseñarla, es necesario primero seleccionar el motor y diseñar su bancada. Por lo tanto, se dejará pendiente esta parte de la carcasa hasta la sección correspondiente a la selección del motor. Sin embargo, con el diseño actual, ya es posible realizar una simulación computacional para evaluar su desempeño.

**Figura 142**

*Dimensionamiento de la carcasa del ventilador centrífugo*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Simulación Computacional del Ventilador Centrífugo.** Se llevara a cabo una simulación rotacional transitoria (incluye los efectos del tiempo) mediante simulaciones en CFD (Dinámica de fluidos computacional), utilizando el método de volúmenes finitos mediante el software *SolidWorks Flow Simulation 2024*, para evaluar el desempeño del ventilador centrífugo y generar las curvas de caudal vs. presión, caudal vs. consumo y caudal vs. eficiencia. Además, se comprobará la consistencia de las predicciones de caudal ( $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y presión estática ( $167,705 \text{ mmca}$ ) en el punto óptimo, definido como el punto de máxima eficiencia. Para esto se definen las etapas de la simulación.

- Preproceso
- Solver (Solucionador)
- Postproceso

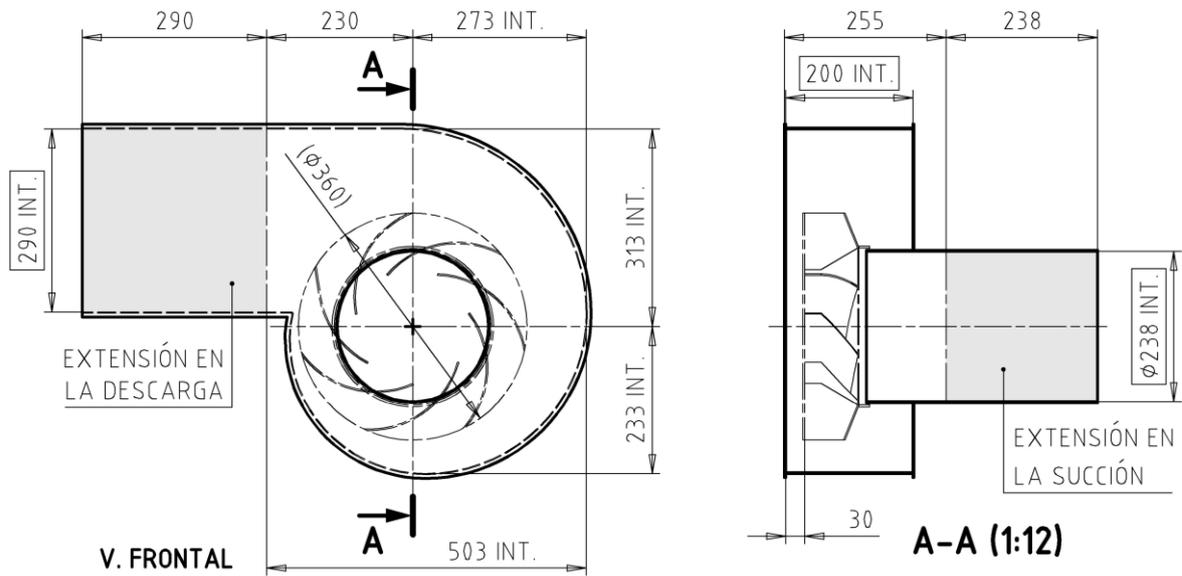
**Preproceso.** Se introducen los datos de entrada al programa en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Geometría
- Volumen de control
- Materiales
- Malla
- Variables iniciales

**Geometría.** La geometría se obtiene de la unión de los dimensionamientos del rotor centrífugo y la carcasa en un entorno tridimensional. Para mejorar la precisión de la simulación, se recomienda extender el ducto de succión  $238 \text{ mm}$  y la descarga  $290 \text{ mm}$  en una longitud equivalente a su dimensión original, como se muestra en la Figura 143. Esta extensión estabiliza el flujo, facilitando una lectura más precisa del caudal y la presión estática.

**Figura 143**

*Extensión de los ductos de succión y descarga del ventilador centrífugo*

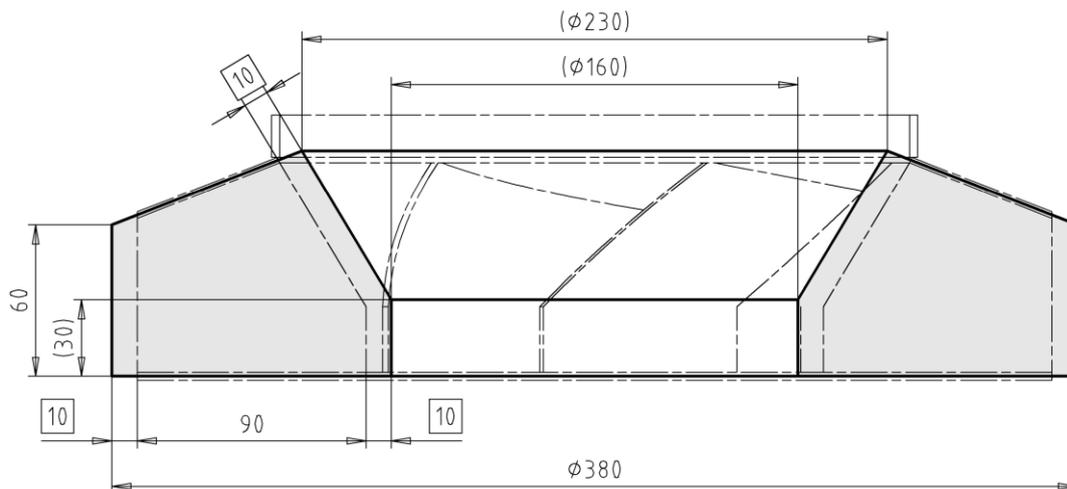


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Se añade a la geometría un elemento rotacional, que alberga las aletas del rotor centrífugo, es un sólido de revolución que se extiende al menos 10 mm más allá del rotor en dirección radial y a la mitad del espesor del disco de la base y del cono del rotor en dirección axial, como se muestra en la Figura 144.

**Figura 144**

*Elemento rotacional del ventilador centrífugo*



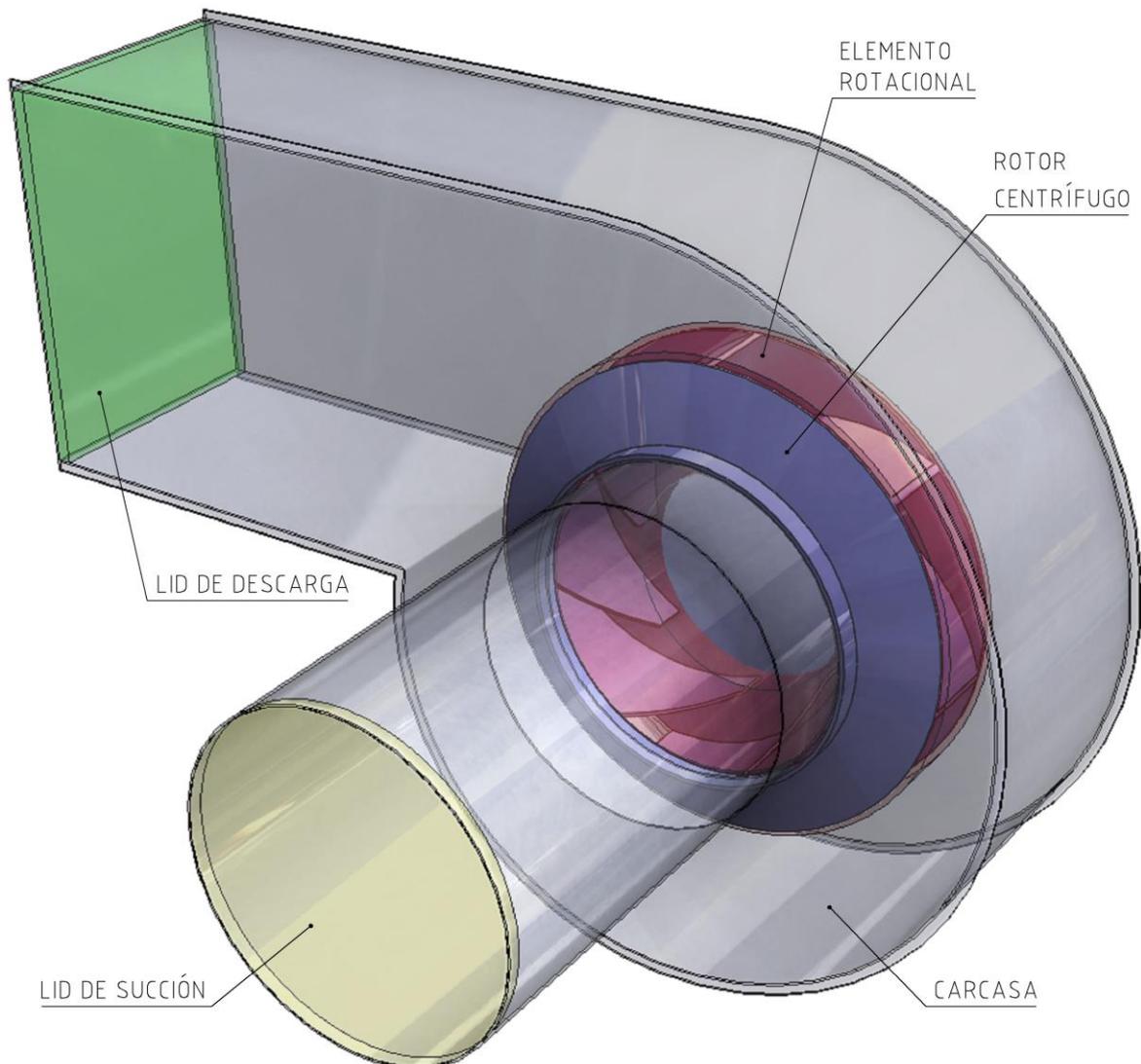
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Se añaden a la geometría dos tapas o "Lids", una a la succión y otra a la descarga.  
En total, la geometría se compone de cinco elementos, como se muestra en la Figura 145:

- Rotor centrífugo
- Carcasa
- Lid de succión
- Lid de descarga
- Elemento rotacional

**Figura 145**

*Geometría de la simulación del ventilador centrífugo*

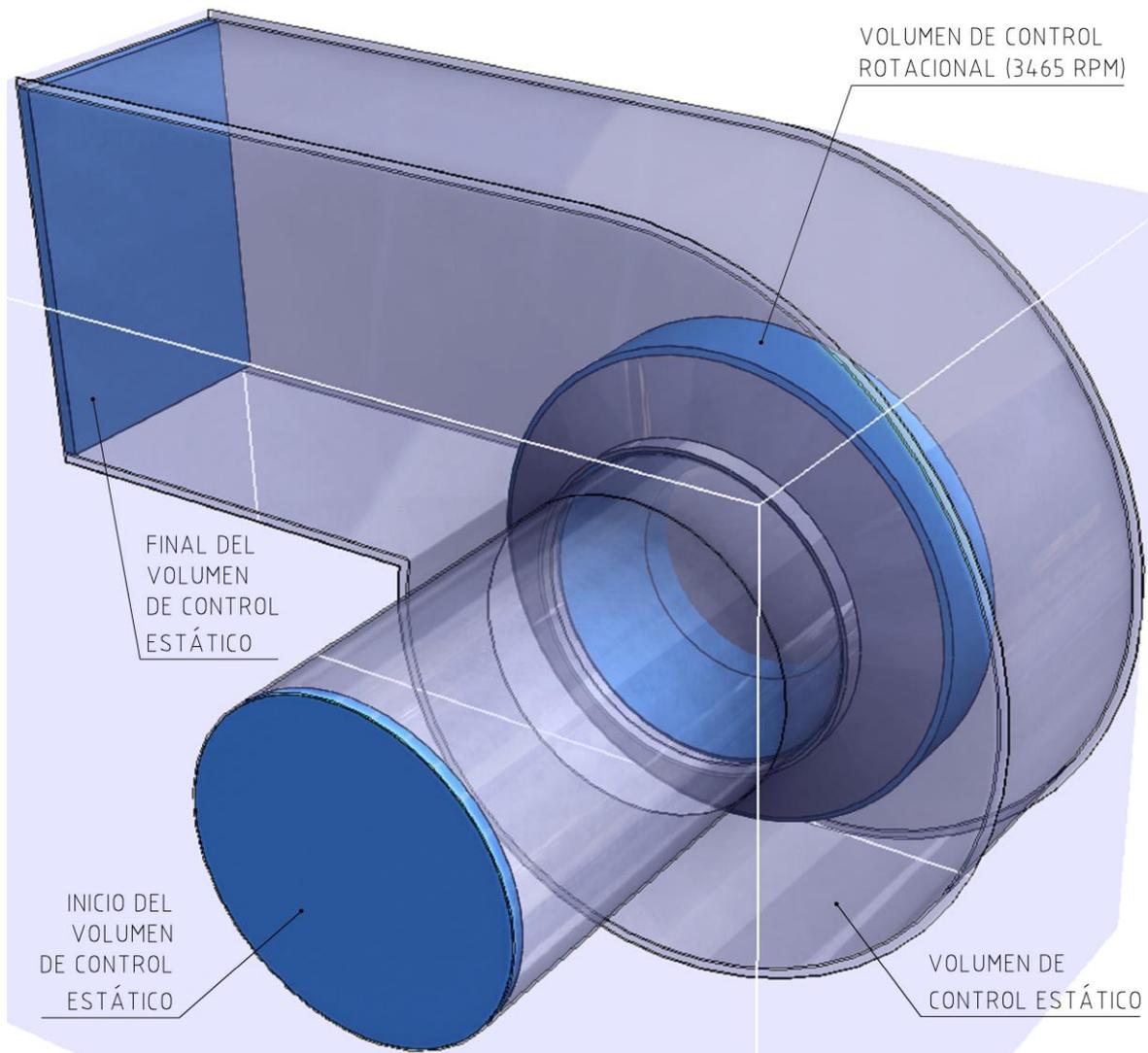


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Volúmenes de Control.** Dado que se trata de una simulación rotacional, se emplean dos volúmenes de control: uno estático, contenido dentro de la carcasa, y otro rotacional, que tiene la capacidad de girar con relación al primero. El volumen estático se genera automáticamente en el software mediante un inicio (Lid de succión) y un final (Lid de descarga), mientras que el volumen rotacional corresponde al elemento rotacional definido en la geometría como se muestra en la Figura 146.

**Figura 146**

*Volúmenes de control de la simulación del ventilador centrífugo*



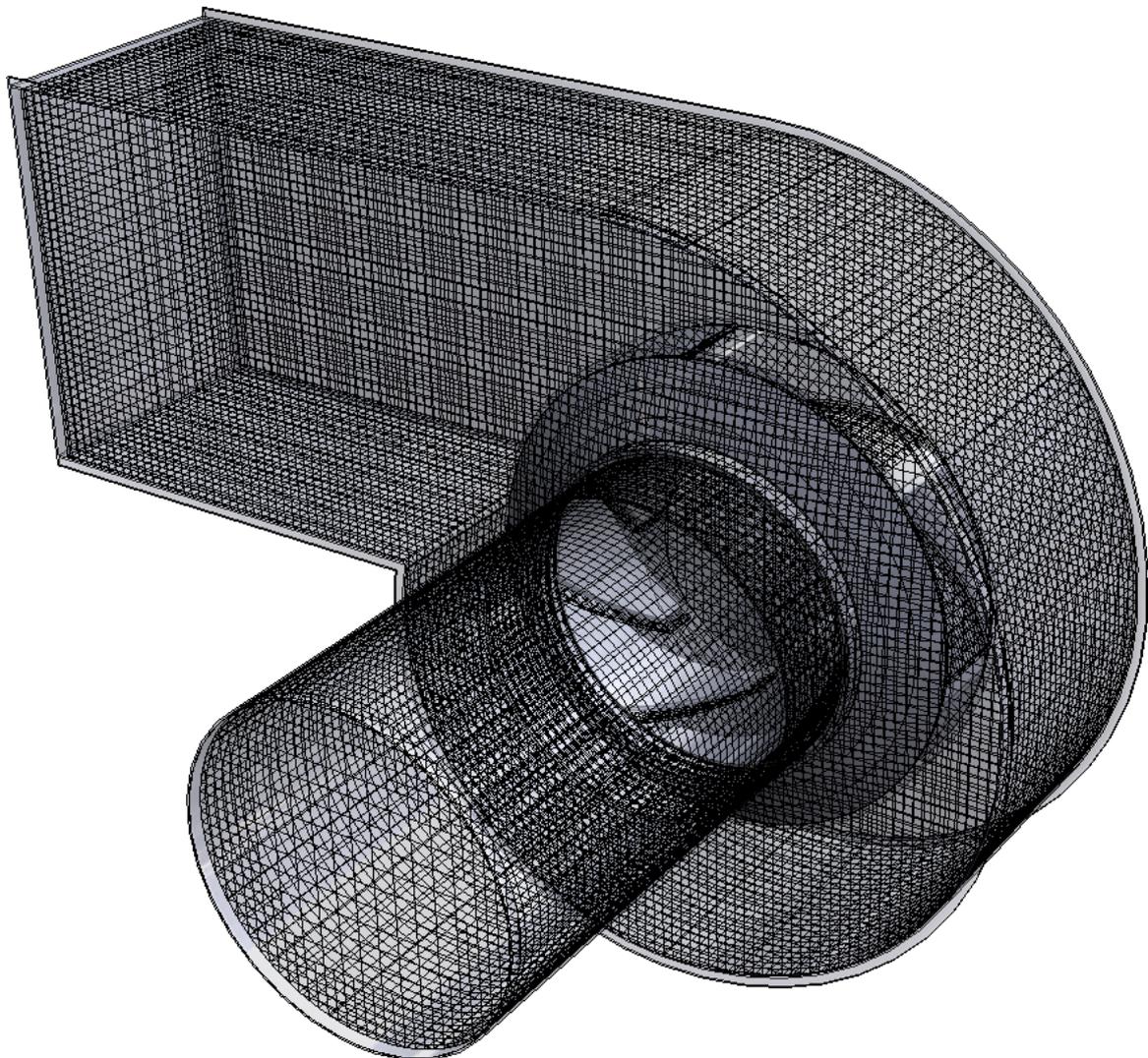
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Materiales.** El material de los sólidos será acero ASTM A36 y el material del fluido será aire con una densidad de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

**Malla.** Se divide la geometría de los volúmenes de control en volúmenes finitos como se muestra en la Figura 147. El mallado se refina en las zonas de contacto entre el sólido y el fluido para mejorar la precisión de la simulación.

**Figura 147**

*Malla de la simulación del ventilador centrífugo*

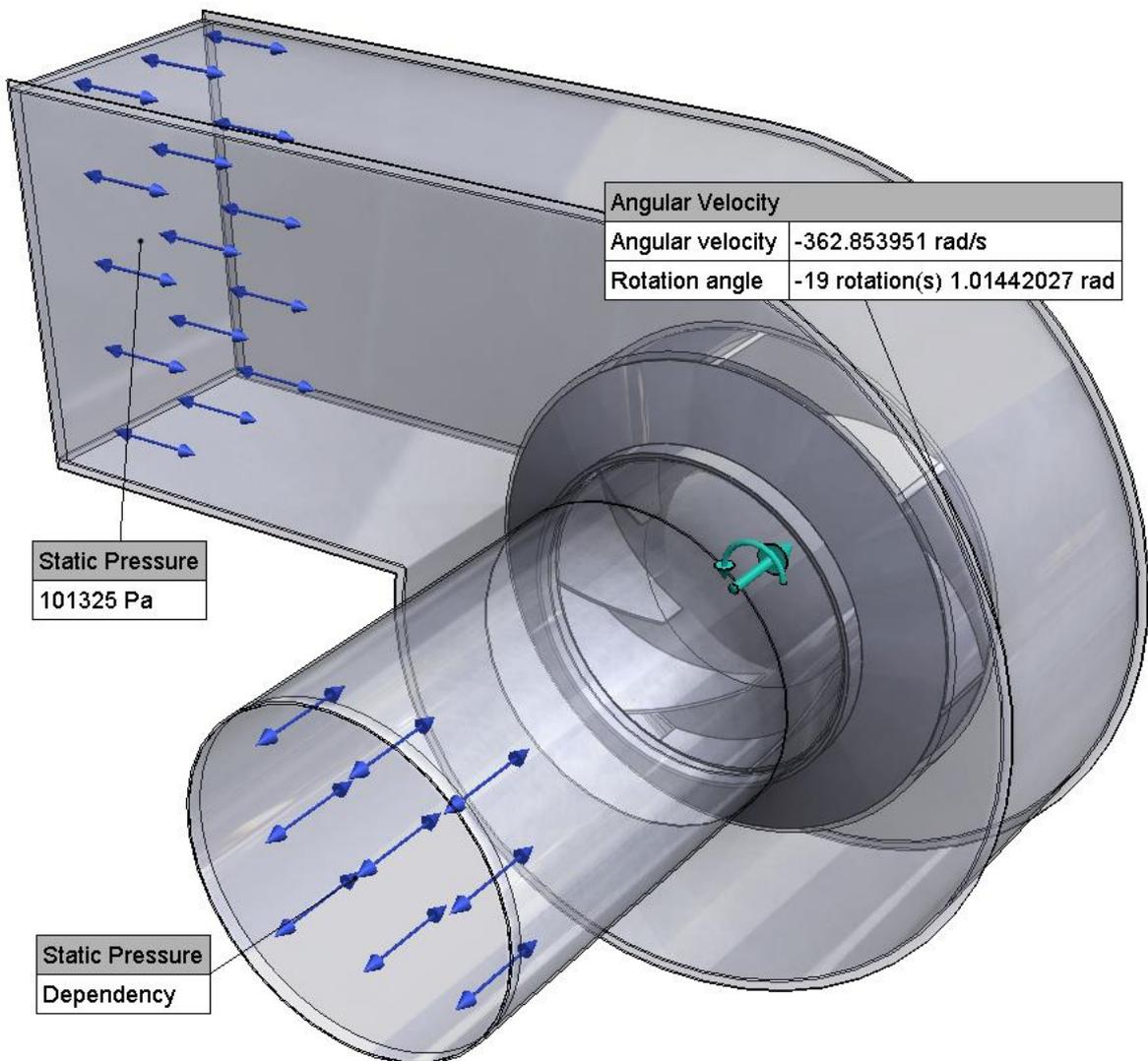


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Variables iniciales.** La simulación se realizará en una atmósfera de aire en reposo a 101325 Pa y 293,2 K (20°C), sin considerar los efectos gravitatorios debido a la baja densidad del fluido y las dimensiones de la simulación. Las variables de entrada son una rotación de 3465 RPM del elemento rotacional y una apertura libre en la descarga, como se muestra en la Figura 148. La diferencia de presión estática entre la succión y la descarga comienza en 0 mmca durante las primeras 500 iteraciones y aumenta 0,5 mmca por iteración. Este comportamiento se modela con la Ecuación 3.104.

**Figura 148**

*Variables iniciales de la simulación del ventilador centrífugo*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

Ecuación de dependencia de la presión estática:

$$\begin{cases} 0 < i \leq 500 \rightarrow SP = 0 \text{ mmca} \\ 500 < i \rightarrow SP = 0,5 \cdot (i - 500) \text{ mmca} \end{cases} \quad (3.104)$$

Donde:

$i =$  Número de iteraciones,  $i \in Z^+$

$SP =$  Presión estática, mmca

**Solver (Solucionador).** Se introducen los datos que se esperan obtener en el software en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Variable objetivo
- Tipo de ejecución

**Variable Objetivo.** Se espera evaluar el desempeño del ventilador centrífugo al medir su caudal, su consumo de potencia y su eficiencia para una diferencia de presión variable. El caudal se medirá directamente de la superficie circular de la succión, el consumo de potencia ( $P$ ) se determinará mediante la Ecuación 3.105 y la eficiencia ( $\eta$ ) mediante la Ecuación 3.106.

$$P = \frac{\left(\frac{2\pi \cdot n}{60}\right) \cdot T}{745,7} \quad (3.105)$$

Donde:

$P =$  Consumo de potencia, HP

$n =$  Velocidad de rotación, RPM

$T =$  Torque del rotor centrífugo en el eje de rotación, N-m

$$\eta = 100 \cdot \frac{Q \cdot (SP_D - SP_S)}{745,7 \cdot P} \quad (3.106)$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia, %

$Q$  = Caudal de aire, m<sup>3</sup>/s

$SP_D$  = Presión estática en la descarga, mmca

$SP_S$  = Presión estática en la succión, mmca

$P$  = Consumo de potencia, HP

**Tipo de Ejecución.** La simulación será de tipo fluidodinámica transitoria, considerando los efectos del tiempo. El intervalo entre iteraciones, denominado "paso" o *Step*, se calcula como una décima parte del tiempo que tarda una aleta del rotor en desplazarse hasta la aleta más cercana, según la Ecuación 3.107.

$$Step = \frac{6}{z \cdot n} \quad (3.107)$$

Donde:

*Step* = Paso entre iteraciones, s

$z$  = Número de aletas

$n$  = Velocidad de rotación, RPM

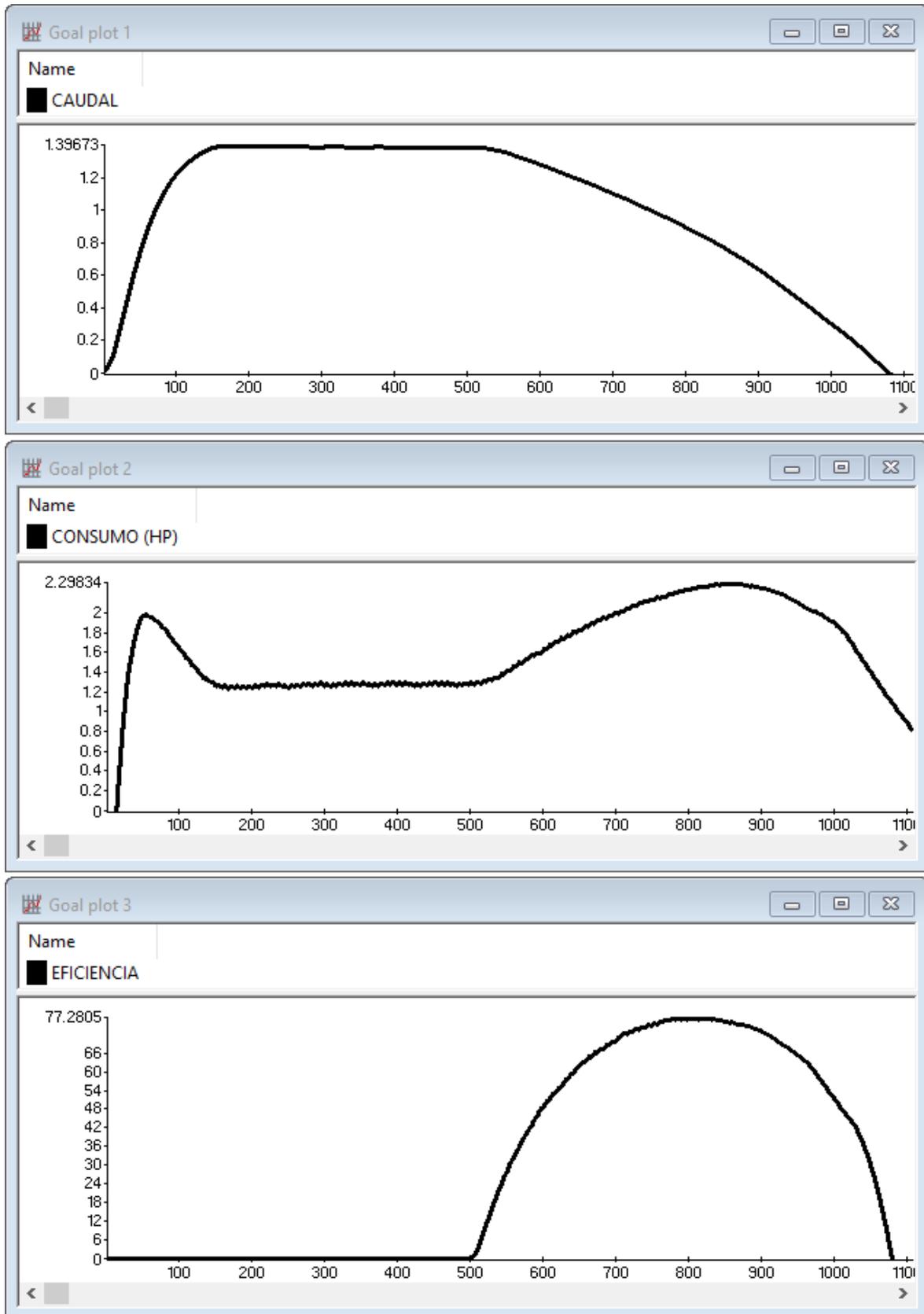
$$Step = \frac{6}{7 \cdot 3465}$$

$$Step = 0,00025$$

La simulación tendrá una duración de 0,275 segundos físicos, distribuidos en 1.100 iteraciones de 0,00025 segundos cada una. El "tiempo físico" se refiere al tiempo dentro de la simulación, mientras que el "tiempo computacional" corresponde al tiempo real, que depende de la velocidad de procesamiento del ordenador y que, en este caso, tardó aproximadamente 10 horas en ejecutar la simulación. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 149.

**Figura 149**

Resultados de la simulación del ventilador centrífugo



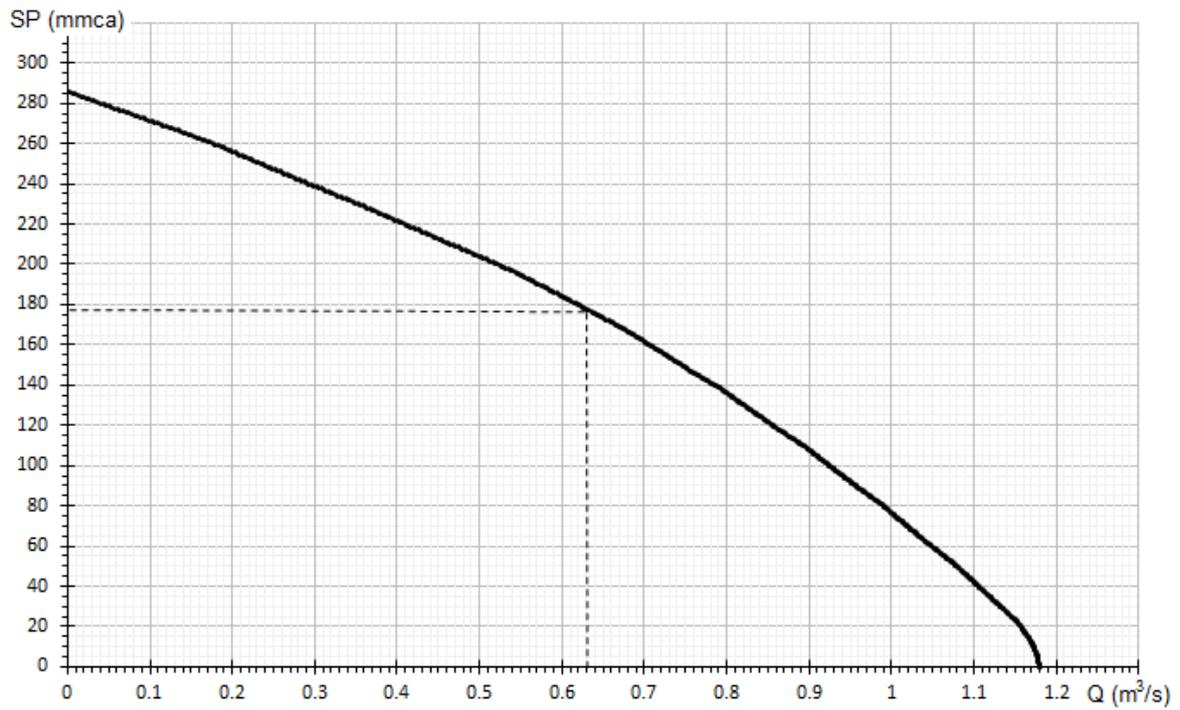
*Nota.* El eje de abscisas representa a las iteraciones. En 500 iteraciones la presión estática es equivalente a 0 mmca, en 600 a 50 mmca, en 700 a 100 mmca y así sucesivamente. *Fuente.* Elaboración propia.

**Postproceso.** Se definirán los formatos gráficos adecuados para gestionar la gran cantidad de información generada en la simulación, con el fin de presentar los resultados de manera clara y eficaz a través de curvas y gráficos. El procedimiento será el siguiente:

- Dado que la variable modificada para generar los resultados es la presión estática, en la Figura 149 se obtuvieron las curvas de presión vs. caudal, presión vs. consumo y presión vs. eficiencia, las cuales no son convencionales. Estos datos serán recolectados y procesados utilizando el software Microsoft Excel 365 para generar las curvas adecuadas de caudal vs. presión, caudal vs. consumo y caudal vs. eficiencia, aplicando un factor de corrección de 0,85, como se muestra en las Figuras 150, 151 y 152, respectivamente.
- Una vez determinado el punto de operación, se trazarán los perfiles de velocidad en m/s, utilizando un espectro de colores que va desde el azul para las velocidades más bajas hasta el rojo para las velocidades más altas alcanzadas por el ventilador centrífugo dentro de su carcasa, como se muestra en la Figura 153.
- Se trazarán los perfiles de la diferencia de presión estática en Pascales en el punto de operación, empleando un espectro de colores que va desde el azul para la presión manométrica atmosférica (0 Pa) hasta el rojo para la presión negativa más alta alcanzada por el ventilador centrífugo dentro de su carcasa, como se muestra en la Figura 154.
- Se trazarán los perfiles de ruido en dbA en el punto de operación, utilizando un espectro de colores que varía desde el tono más oscuro, que representa el ruido más bajo, hasta el tono más iluminado, que corresponde al nivel de ruido más alto. Esta coloración facilita una mejor visualización de los focos de ruido, como se muestra en la Figura 155.
- Se trazarán los perfiles de esfuerzo mecánico, utilizando un espectro de colores que va desde el azul hacia el rojo para evaluar la integridad estructural del rotor centrífugo, como se muestra en la Figura 156.

**Figura 150**

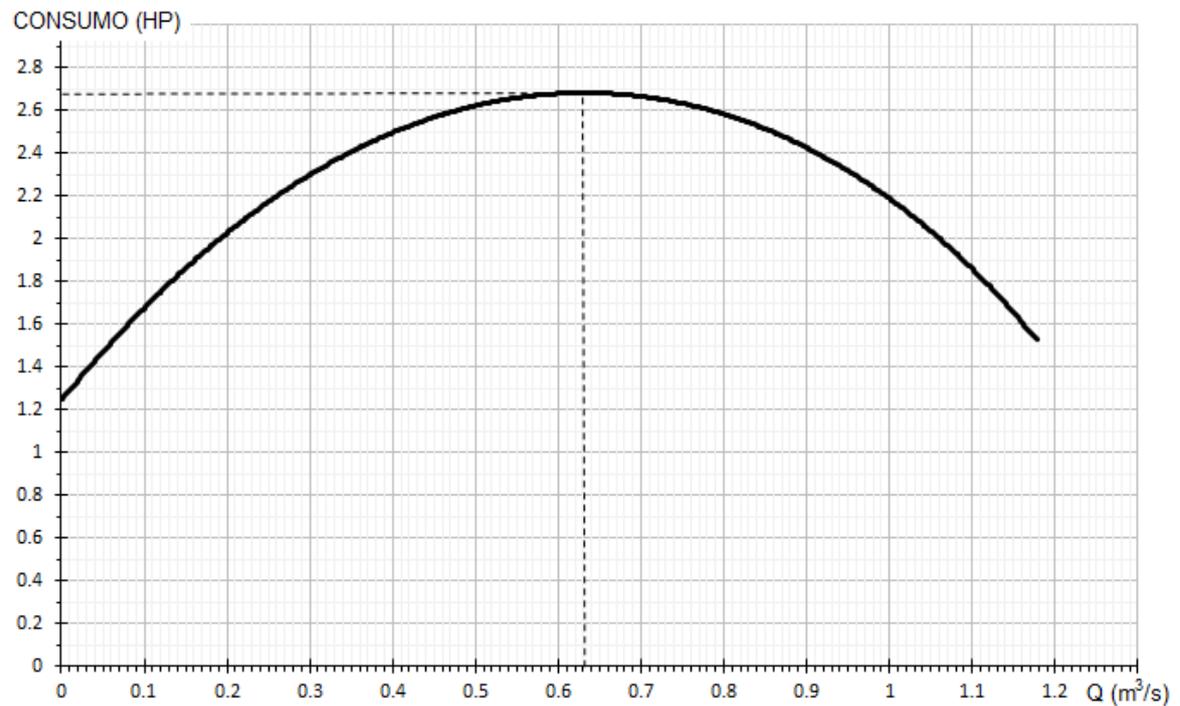
Curva de caudal vs. presión estática del ventilador centrífugo



Nota. Para 0,63 m³/s se obtiene una presión estática de 177,5 mmca. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 151**

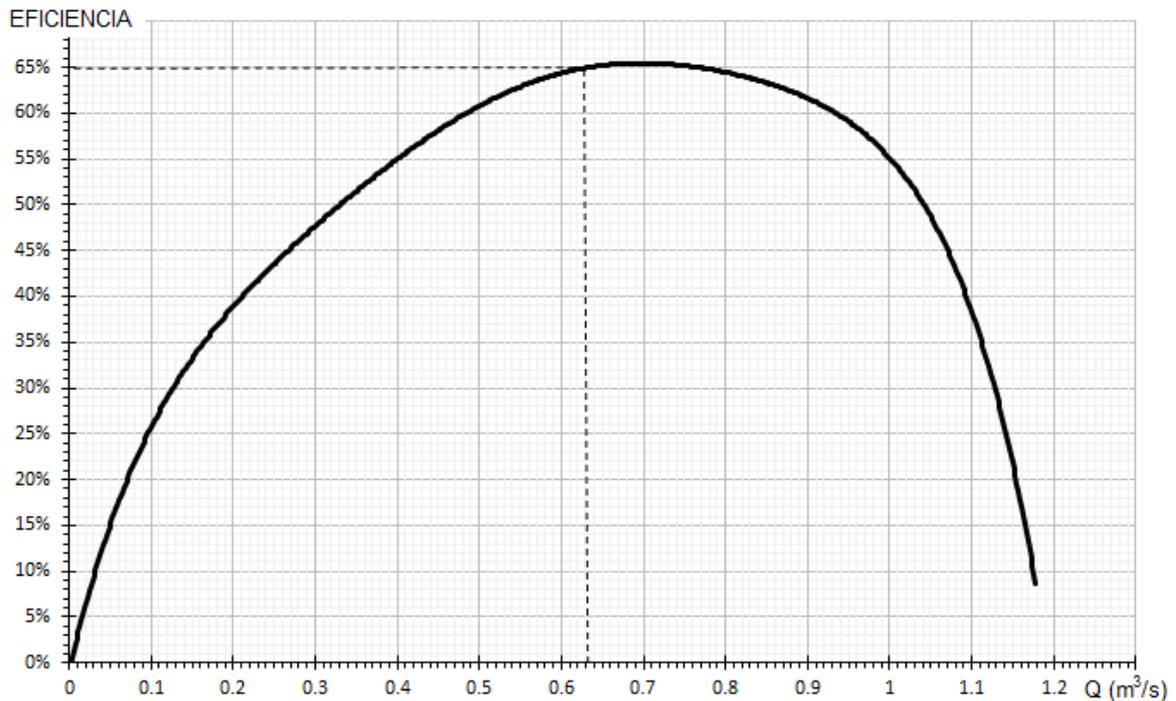
Curva de caudal vs. consumo de potencia del ventilador centrífugo



Nota. Para 0,63 m³/s se obtiene un consumo de 2,68 HP Fuente. Elaboración propia.

**Figura 152**

Curva de caudal vs. eficiencia del ventilador centrífugo



Nota. Para un caudal de 0,63 m³/s se obtiene una eficiencia de 64,65% Fuente. Elaboración propia.

En la curva de caudal vs. presión estática mostrada en la Figura 150, se traza una proyección vertical del caudal requerido por la máquina de aspiración de humos, es decir, 0,63 m³/s. A partir de esta proyección, se obtiene una presión estática de 177,5 mmca, un valor adecuado, ya que se determinó que se requieren 167,705 mmca.

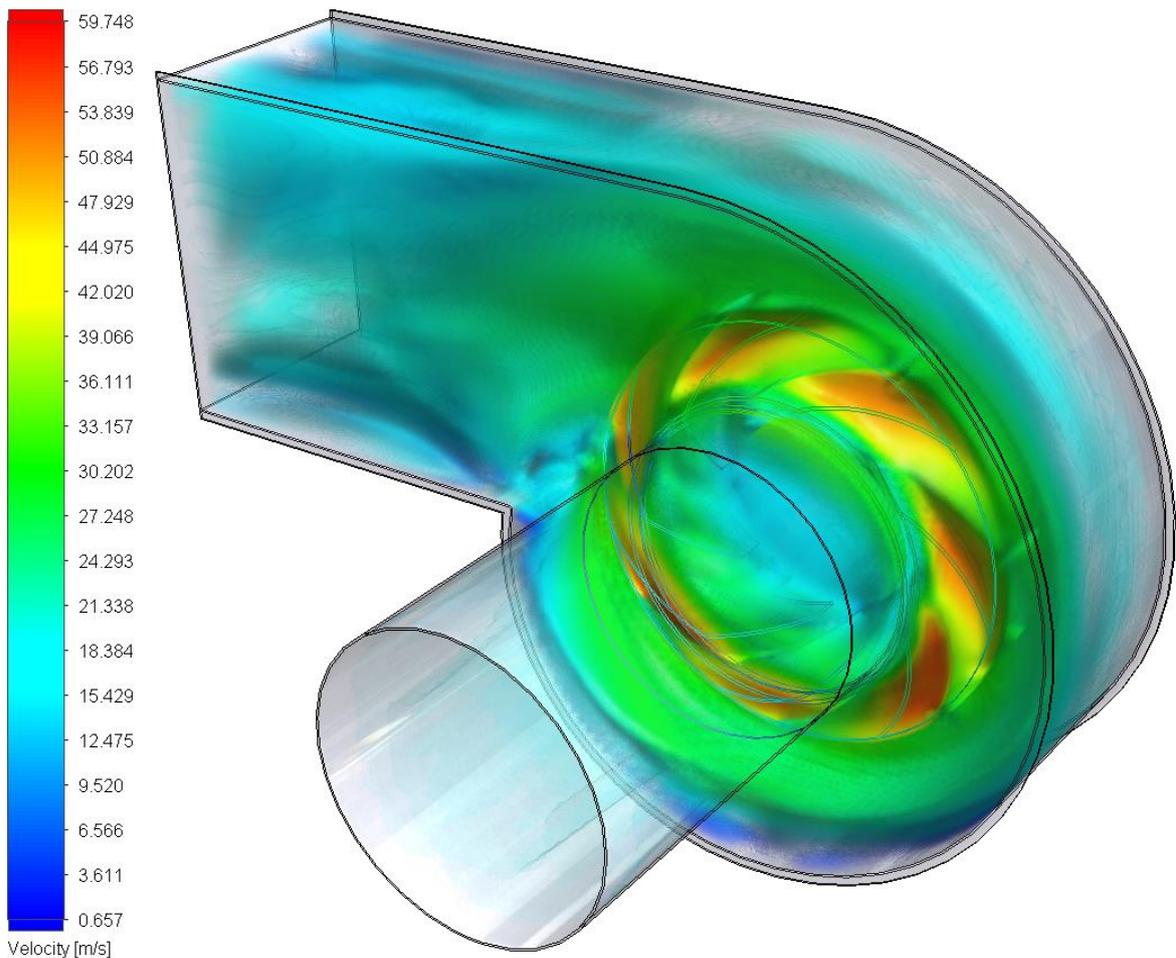
En la curva de caudal vs. consumo de potencia mostrada en la Figura 151, se traza una proyección vertical para el caudal de 0,63 m³/s. Para este caudal, se obtiene un consumo de 2,68 HP, lo que indica que el ventilador centrífugo requiere un motor de 3 HP como se había estimado inicialmente.

En la curva de caudal vs. eficiencia mostrada en la Figura 152, se traza una proyección vertical para un caudal de 0,63 m³/s. Para este caudal, se obtiene una eficiencia de 64,65%, un valor muy cercano al punto de máxima eficiencia. Este punto se tomará como el punto de operación.

En la Figura 153, se traza el perfil de velocidades en m/s correspondiente al punto de operación, donde se observa que las velocidades más altas se encuentran en las aletas del rotor centrífugo. Además, la velocidad de descarga, calculada en 11 m/s, es correcta. También se aprecia un flujo estable en la succión, garantizando una adecuada aspiración.

**Figura 153**

*Trazado de velocidades en el punto de operación del ventilador centrífugo*



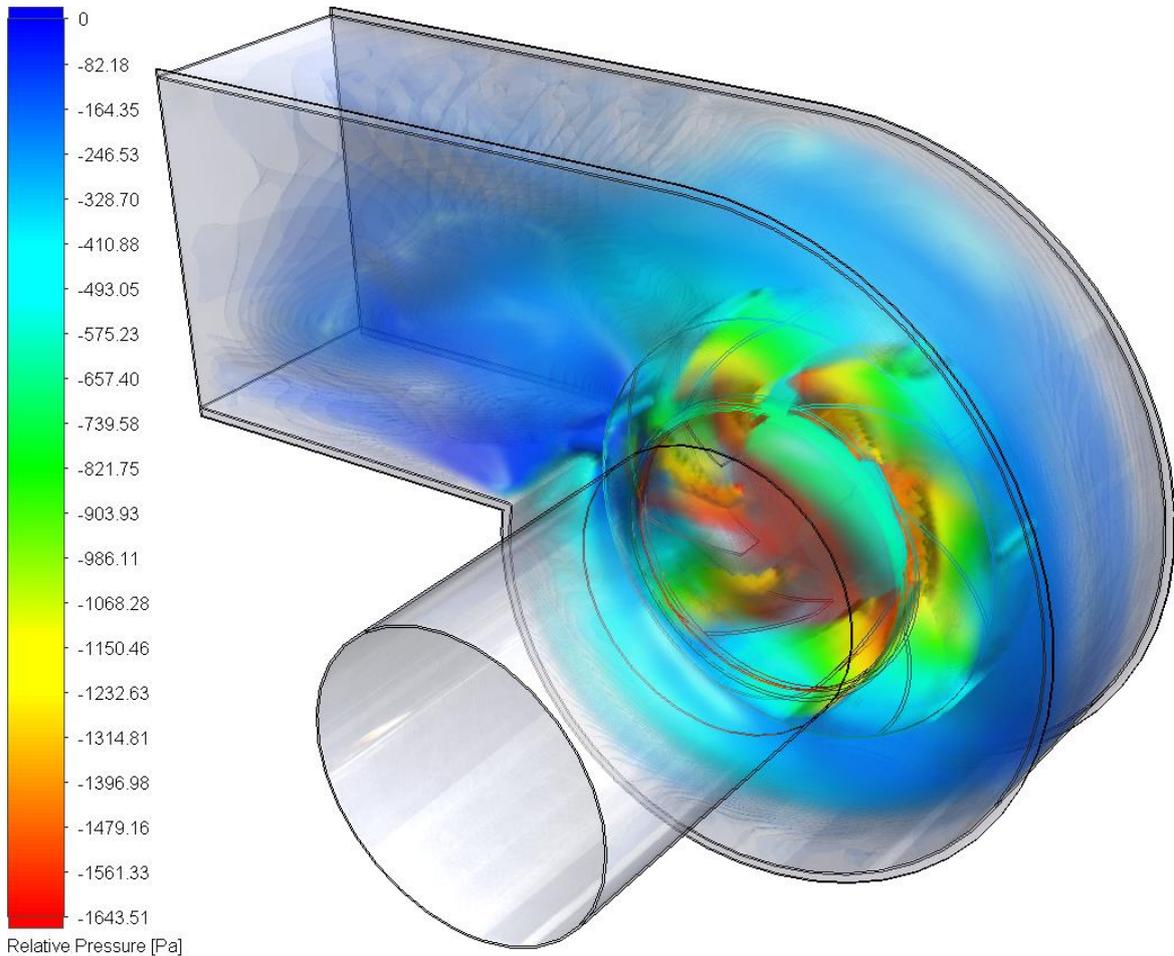
*Nota.* Velocidades en m/s. *Fuente.* Elaboración propia.

En la Figura 154, se traza el perfil de las presiones estáticas en Pascales correspondiente al punto de operación, donde se observa que la diferencia de presión estática en la descarga tiende a ser 0 Pascales, lo cual concuerda con la realidad, ya que en la descarga se encuentra la atmósfera. Además, la diferencia de presión más alta se presenta tanto en el rotor centrífugo como en la succión, alcanzando los 1643,51 Pascales

(167,705 mmca), lo que coincide correctamente con la presión estática requerida por el sistema.

**Figura 154**

*Trazado de presiones estáticas en el punto de operación del ventilador centrífugo*

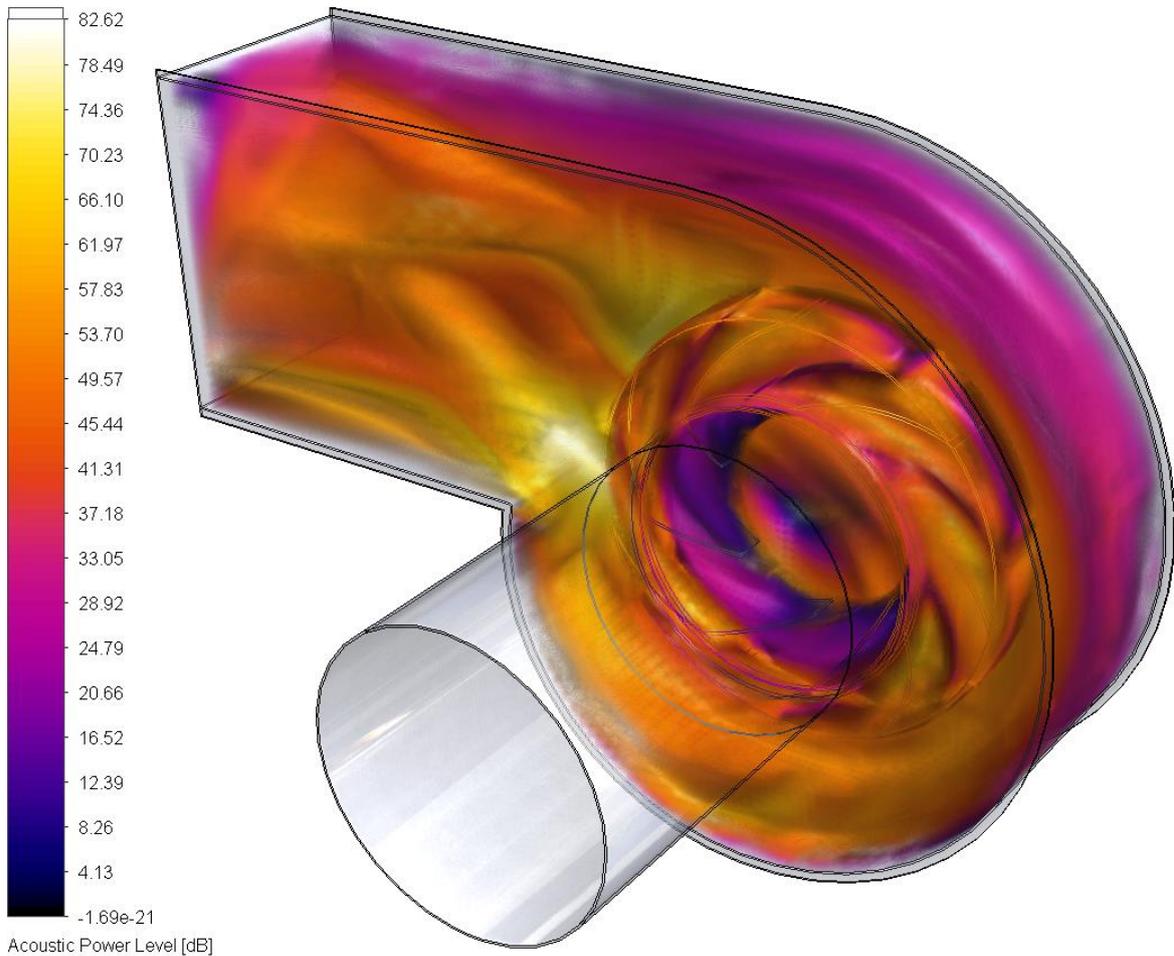


*Nota.* Presiones estáticas en Pascales. *Fuente.* Elaboración propia.

En la Figura 155, se traza el perfil de los niveles de ruido en dbA correspondiente al punto de operación, donde se observa que el valor más alto alcanzado es de 82,62 dbA en la zona de inicio de la voluta. Dado que este nivel de ruido supera los 80 dbA indicados en la Tabla 27, se concluye que es necesario integrar un silenciador.

**Figura 155**

*Trazado del niveles de ruido en el punto de operación del ventilador centrífugo*



Acoustic Power Level [dB]

*Nota.* Nivel de ruido en dbA. *Fuente.* Elaboración propia.

Este silenciador se incorporará en la misma carcasa, sustituyendo las planchas de acero ASTM A36 de 1/16" (1,59 mm) por planchas perforadas del mismo material y espesor, y relleno su perímetro externo con lana de vidrio. Con este arreglo, se logrará reducir el nivel de ruido en al menos un 10%, alcanzando un valor máximo de 74 dbA, que es aceptable según los estándares nacionales de calidad ambiental para ruido en zonas industriales indicados en la Tabla 27, conforme al Decreto Supremo N°085-2003-PCM. Además, es importante mencionar que, por motivos de seguridad se debe instalar una malla de protección en la descarga del ventilador para que ninguna persona pueda ingresar sus manos al rotor centrífugo en operación, En la Figura 156 se muestra un ejemplo de esta fabricación, donde también se muestra al silenciador integrado en la carcasa.

## Figura 156

*Ejemplo de la fabricación de la malla de protección y el silenciador integrado*

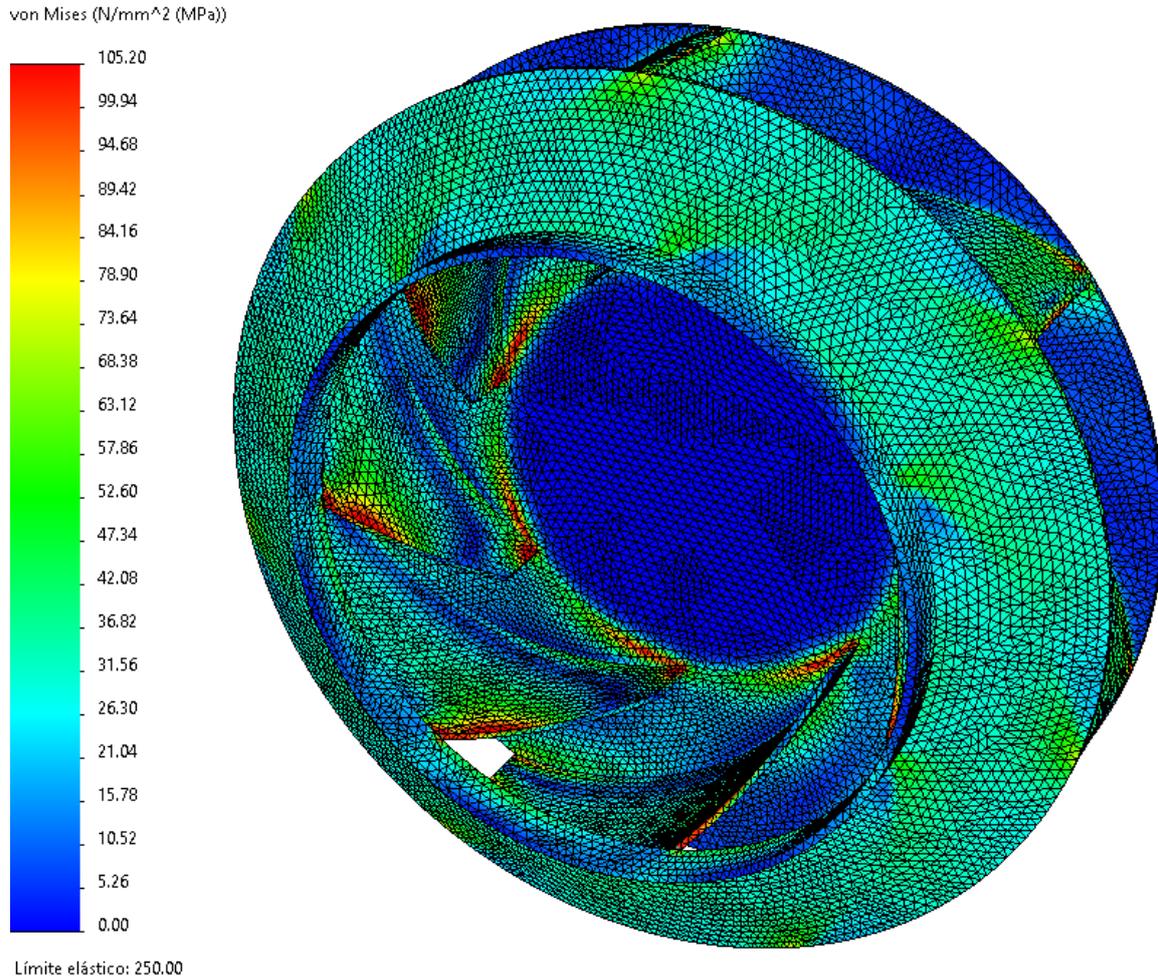


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

En la Figura 157 se presenta el perfil de esfuerzos mecánicos del rotor centrífugo, expresados en MPa, correspondiente al punto de operación. Se observa que el valor máximo alcanzado es de 105,20 MPa en la zona de succión de la aleta, lo cual es inferior a la resistencia a la fluencia del acero ASTM A36 (250 MPa). Con un factor de seguridad de 2,38, este resultado se considera aceptable para el tipo de cargas fluidodinámicas y centrífugas a las que está sometido el rotor.

**Figura 157**

*Trazado de esfuerzos mecánicos en el punto de operación del rotor centrífugo*



*Nota.* Esfuerzo mecánico en Mpa. *Fuente.* Elaboración propia.

**Motor.** La selección adecuada del motor depende del consumo de potencia del ventilador centrífugo y su velocidad de rotación, valores determinados previamente mediante simulación computacional, con un consumo de 2,68 HP. En base a estos datos, se ha seleccionado un motor eléctrico trifásico de 3 HP, 60 Hz, con una velocidad de 3465 RPM y una carcasa conforme a los estándares IEC (Comisión Electrotécnica Internacional). A continuación, se presentan los datos técnicos del motor seleccionado en la Tabla 29. Además, se presenta un esquema dimensional de su carcasa (IEC 90S) en la Figura 158.

**Tabla 29**

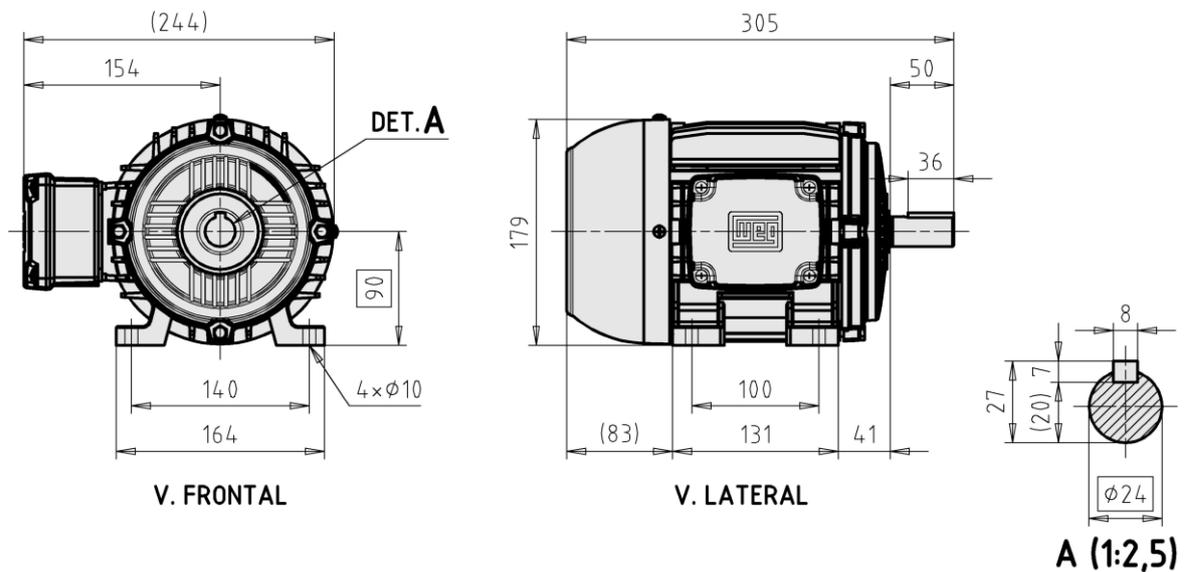
*Datos técnicos del motor eléctrico trifásico de 3 HP y 60 Hz en alta*

Potencia (HP)	Carcasa IEC	Número de polos	Velocidad de rotación (RPM)	Corriente nominal a 220V (A)	Factor de servicio	Peso (kg)
3	90S	2	3465	8,43	1,15	20

*Nota. Fuente. Motores trifásicos cerrados IEC-60Hz-W21, por Grupo WEG Unidad Motores, 2002*

**Figura 158**

*Dimensiones de la carcasa del motor IEC 90S*



*Nota. Fuente. Motores trifásicos cerrados IEC-60Hz-W21, por Grupo WEG Unidad Motores, 2002*

A continuación, se procederá a diseñar los componentes faltantes de la carcasa y del rotor centrífugo y de respectivamente, los cuales son:

- Bancada del motor.
- Bocamaza del rotor centrífugo.

**Bancada del Motor.** Es el componente que sirve de asiento al motor y de tapa a la carcasa. Está unido a la carcasa mediante una unión emperrada para sellar el agujero realizado para la inserción del rotor centrífugo,

**Diámetro del Agujero para el Rotor ( $D_a$ ).** Este agujero se realiza usualmente en la cara de la carcasa donde se conecta con el motor y debe poseer al menos 10 mm más que el diámetro externo del rotor centrífugo (360 mm) para permitir su inserción, es decir que el diámetro del agujero será de 370 mm

$$D_a = 370 \text{ mm}$$

**Diámetro del Eje de los Agujeros para los Pernos ( $d_a$ ).** Este diámetro es común a la bancada del motor y a la carcasa. Se define como el diámetro del agujero para el rotor más dos veces el espaciamiento para la unión empernada, como se indica en la Ecuación 3.108. Se asume un espaciamiento de 15 mm en un ala de 30 mm que es usual para la inserción de un rotor centrífugo de estas dimensiones.

$$d_a = D_a + 2(15) \quad (3.108)$$

Donde:

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$d_{eb}$  = Diámetro exterior de la brida, mm

$$d_a = 370 + 2(15)$$

$$d_a = 400 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_8$ ).** Los pernos deben fijar a la bancada del motor con la carcasa y deben distribuirse uniformemente alrededor del diámetro del eje de los agujeros para los pernos. Debido a que se consideró un tamaño de ala de 30 mm, le corresponden pernos de 5/16"NC (7,9375 mm)

$$d_{p8} = 5/16"NC$$

Como recomendación, el espaciamiento entre pernos de diámetro 5/16"NC debe ser de aproximadamente 6" (152,4 mm) como se indica en la Ecuación 3.109.

$$n_{p8} \approx \frac{\pi \cdot d_a}{152,4} \quad (3.109)$$

Donde:

$n_{p8}$  = Número de pernos de la unión empernada p8, debe ser par

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$$n_{p8} \approx \frac{\pi \cdot 400}{152,4}$$

$$n_{p8} \approx 8,245$$

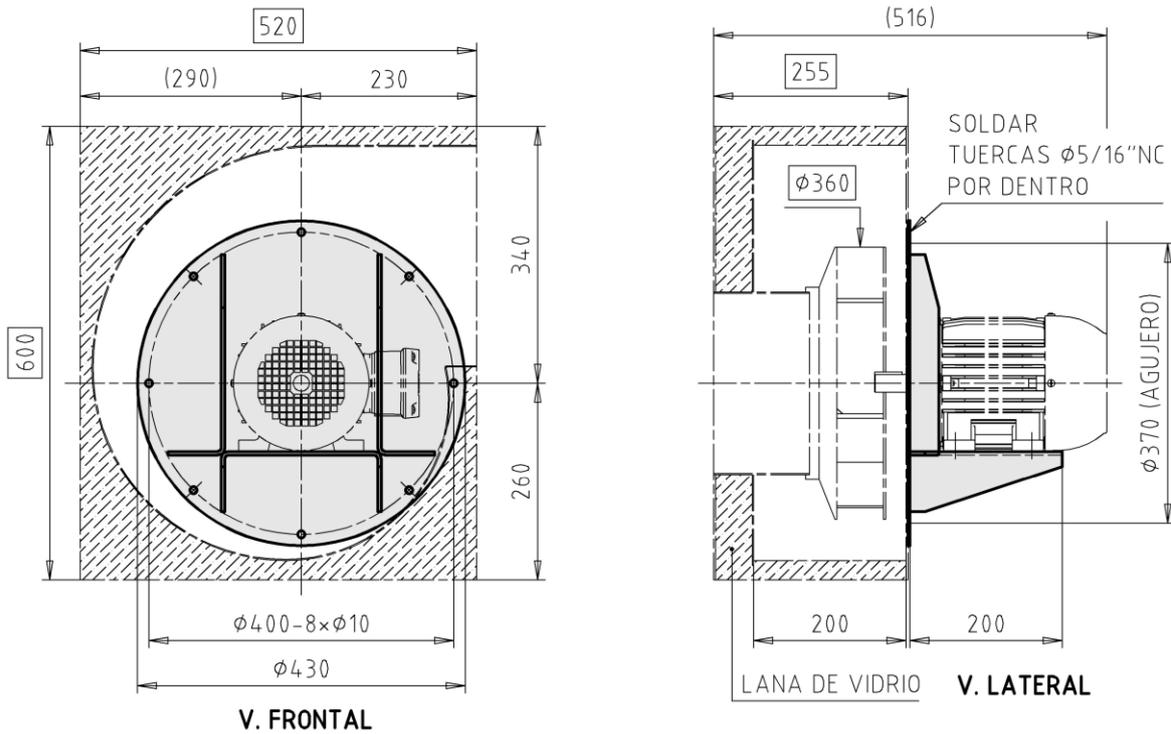
$$n_{p8} = 8$$

El resultado obtenido consiste en 8 pernos distribuidos uniformemente tanto en la carcasa como en la bancada del motor, tal como se muestra en la Figura 159. En esta figura también se presenta la bancada junto al ventilador centrífugo, cuya carcasa está fabricada con plancha perforada de 1/16" (1,59 mm) de espesor, además de contar con un recubrimiento externo de lana de vidrio que actúa como silenciador para reducir el nivel de ruido. La Figura 160 muestra un ejemplo de esta fabricación, la cual fue implementada y verificada por el autor para este tipo de aplicaciones.

Es necesario soldar tuercas de 5/16" NC (7,9375 mm) en el interior de la carcasa, en la cara donde se conecta con la bancada del motor, que tiene un espesor de 3/32" (2,38 mm). Esto facilita el montaje con la bancada del motor. Además, la bancada está equipada con rigidizadores, los cuales se detallan en el dimensionamiento.

**Figura 159**

*Ubicación de la bancada del motor*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 160**

*Ejemplo de la fabricación del silenciador integrado a la carcasa*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

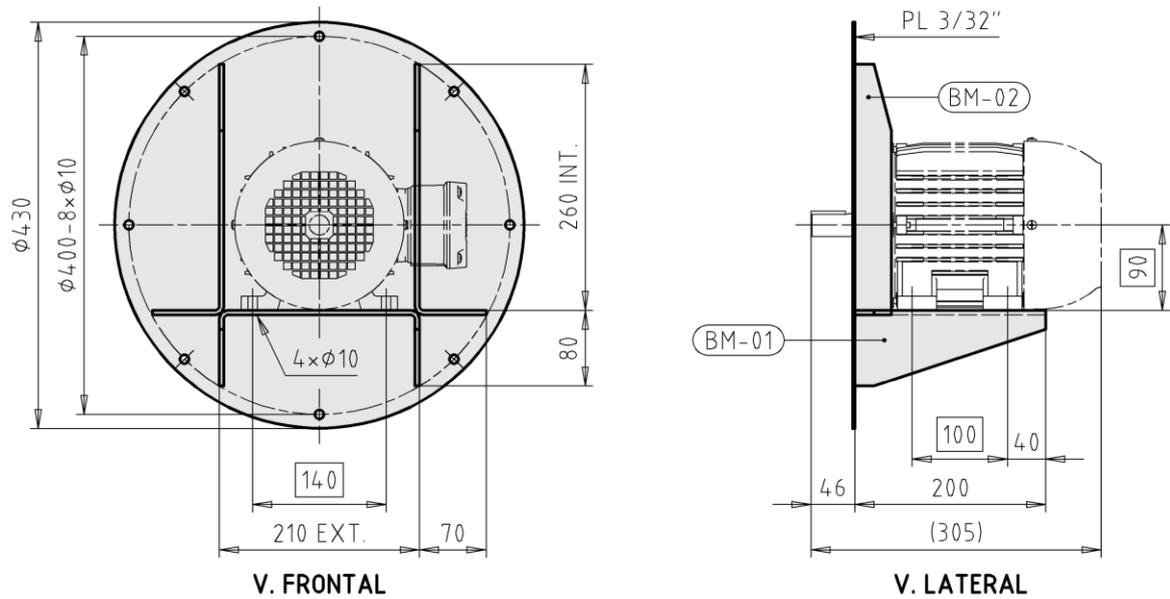
**Dimensionamiento de la Bancada del Motor.** Para la fabricación de la bancada del motor, además de las dimensiones determinadas, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones constructivas:

- La tapa con forma de disco circular deberá tener el mismo espesor que la cara donde se conectará a la carcasa por medio de la unión empernada, es decir 3/32" (2,38 mm).
- Para garantizar la rigidez de esta estructura, se incluirán dos rigidizadores tanto en el eje vertical como en el eje horizontal del asiento del motor, los cuales estarán fabricados a partir de una platina estándar de al menos el doble de espesor que la plancha donde se sostendrán, es decir 3/16" (4,76 mm). Se recomienda que las platinas estándar tengan un ala de 8 veces su espesor, es decir 1 1/2" (38,1 mm).
- El asiento del motor será del mismo espesor que los rigidizadores, es decir 3/16" (4,76 mm)
- Para facilitar la fabricación y aumentar la rigidez, se integrarán componentes por medio de dobleces, es decir que el asiento del motor se integrará a sus rigidizadores inferiores y como resultado tendrá la forma de una "C". Los cuatro rigidizadores tanto verticales como horizontales se integraran en dos elementos, ambos doblados en forma de "L".

A continuación, se presenta el dimensionamiento de la bancada del motor en la Figura 161. Además, se presentan los desarrollos tanto del asiento del motor como de los rigidizadores en la Figura 162.

**Figura 161**

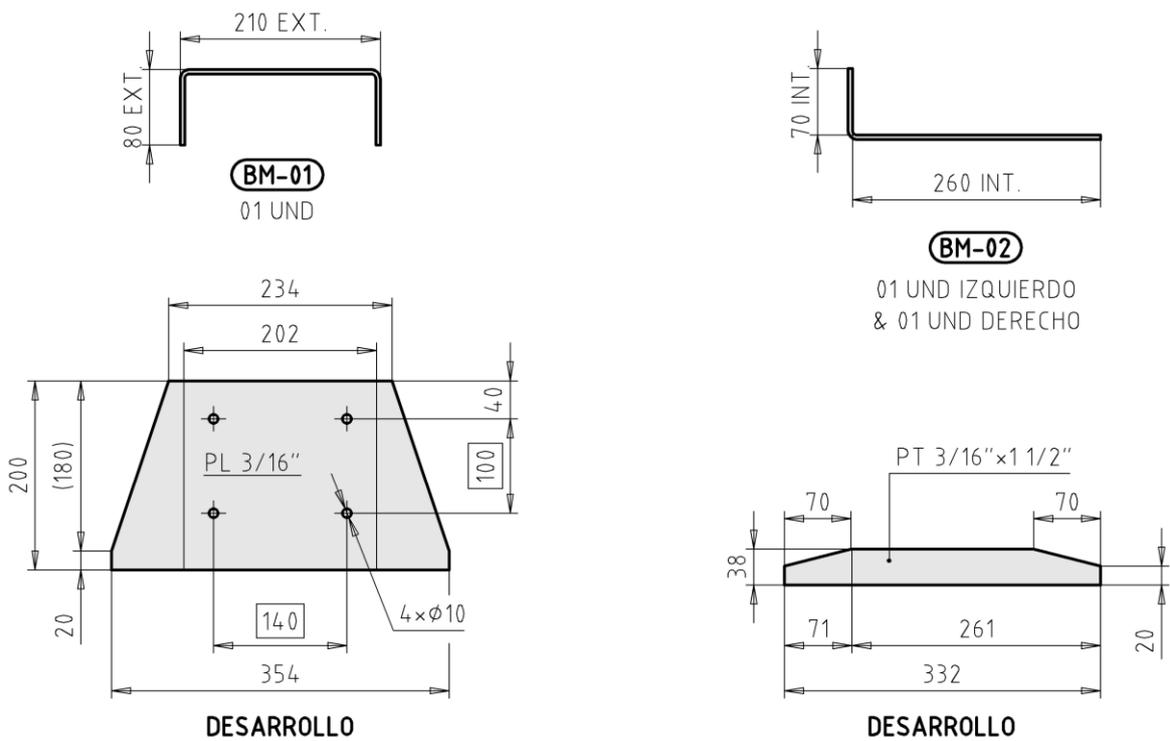
*Dimensionamiento de la bancada del motor*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 162**

*Desarrollos de la bancada del motor*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Bocamaza del Rotor Centrífugo.** Es el componente que conecta el eje del motor con el rotor centrífugo, su diseño consta de un cubo que se fijará al eje del motor axialmente mediante un perno y transversalmente mediante un prisionero. Este cubo estará soldado a un disco rígido el cual deberá fijarse a la base del rotor centrífugo mediante una unión empernada a su alrededor, como se muestra en la Figura 154.

**Diámetro del Disco de la Bocamaza ( $D_d$ ).** Este diámetro se estima como la mitad del diámetro externo del rotor centrífugo (360 mm), es decir que el diámetro del disco será de 180 mm.

$$D_d = 180 \text{ mm}$$

**Diámetro del Eje de los Agujeros para los Pernos ( $d_a$ ).** Este diámetro es común al disco de la bocamaza y a la base del rotor centrífugo. Se define como el diámetro del disco de la bocamaza menos dos veces el espaciamiento para la unión empernada, como se indica en la Ecuación 3.110. Se asume un espaciamiento de 13 mm que corresponde al uso de pernos de diámetro 5/16"NC (7,9375 mm)

$$d_a = D_d - 2(13) \tag{3.110}$$

Donde:

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$D_d$  = Diámetro del disco de la bocamaza, mm

$$d_a = 180 - 2(13)$$

$$d_a = 154 \text{ mm}$$

**Unión Empernada ( $p_9$ ).** Los pernos deben fijar al disco de la bocamaza con la base del rotor centrífugo y deben distribuirse uniformemente alrededor del diámetro del eje de los agujeros para los pernos de 5/16"NC (7,9375 mm)

$$d_{p8} = 5/16"NC$$

Como recomendación, el espaciamiento entre pernos de diámetro 5/16"NC debe ser de aproximadamente 6" (152,4 mm), sin embargo, por tratarse de una unión vital para el rotor centrífugo el cual estará sometido a cargas centrífugas y fluidodinámicas se considerará un espaciamiento de 3" (76,2 mm) como se indica en la Ecuación 3.111.

$$n_{p9} \approx \frac{\pi \cdot d_a}{76,2} \quad (3.111)$$

Donde:

$n_{p8}$  = Número de pernos de la unión emperrada  $p_8$ , debe ser par

$d_a$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$$n_{p9} \approx \frac{\pi \cdot 154}{76,2}$$

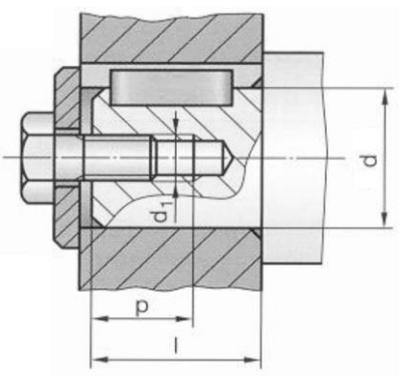
$$n_{p8} \approx 6,349$$

$$n_{p8} = 6$$

El resultado obtenido es de 6 pernos distribuidos uniformemente tanto en el disco de la bocamaza como en la base del rotor centrífugo, como se muestra en la Figura 163, donde también se presenta al rotor centrífugo y el motor eléctrico, el cual posee un eje de 24 mm de diámetro y un largo de 50 mm, el cual debe unirse a la bocamaza mediante una chaveta y un perno en el eje axial, de acuerdo con la Tabla 30, donde se indica el diámetro y la profundidad de roscado en el eje del motor que permita la inserción de este perno.

**Tabla 30**

Conexiones entre el eje de un motor y el cubo de una máquina

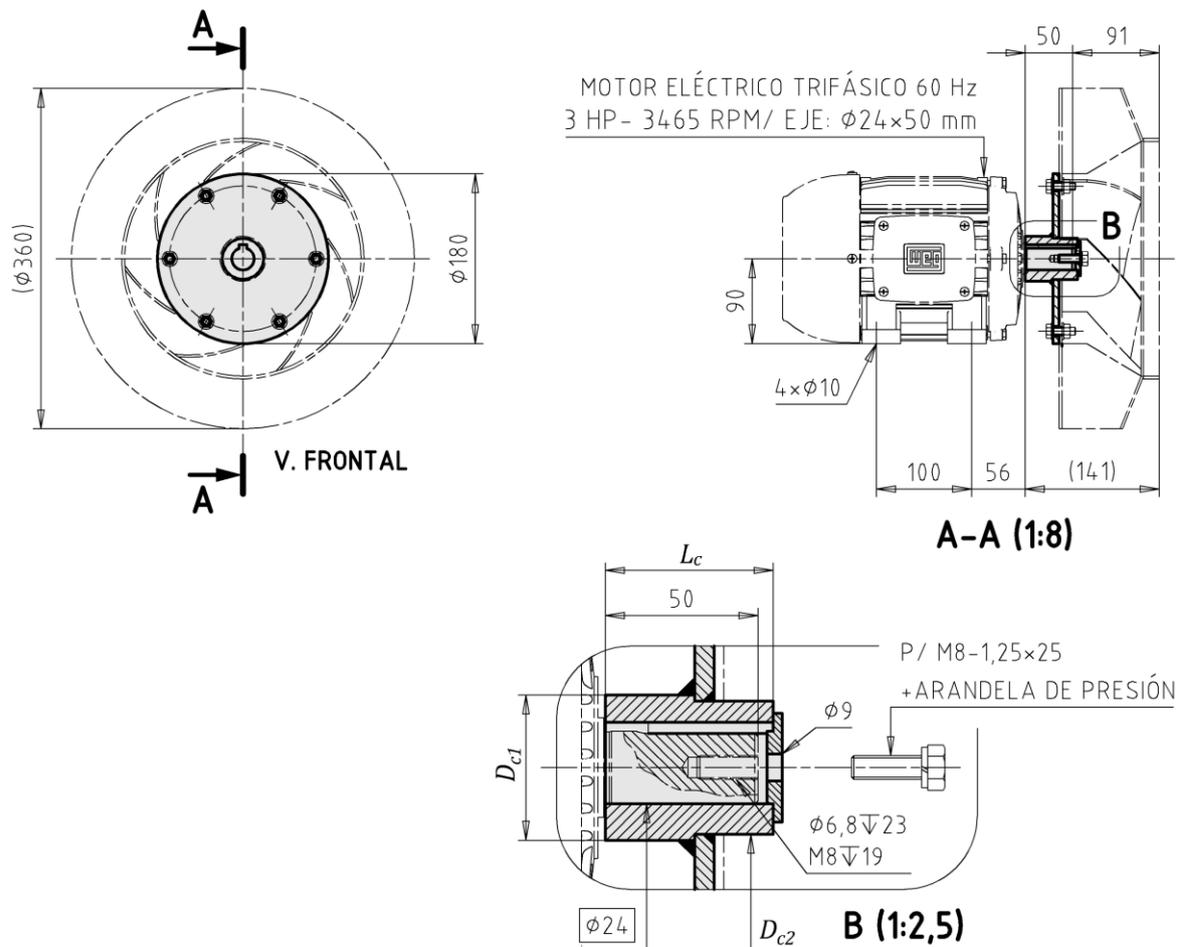


$d$ (mm)	$d_1$ (mm)	$p$ (mm)	$l$ (mm)
11	M4	10	23
14	M5	13	30
19	M6	16	40
24	M8	19	50
28	M10	22	60
38	M12	28	80
48	M16	36	110

Nota. Fuente. Guide du dessinateur industriel (p.229), por A. Chevalier, 2003, Hachette technique.

**Figura 163**

Ubicación de la bocamaza del rotor centrífugo



Nota. Fuente. Elaboración propia.

De la Tabla 30 se selecciona a la conexión para un diámetro de eje de 24 mm, lo que resulta en una perforación roscada de diámetro M8 (8 mm en rosca métrica) de 1,25 mm de paso. Dado que el roscado abarca 19 mm se usará un perno de 25 mm de longitud con una arandela de presión para evitar su desaflojamiento. Además, se añade una pequeña tapa de un diámetro menor al cubo, con un escalón de 24 mm de diámetro que se aloje dentro del cubo, la cual tiene la función de fijar a todo el conjunto.

**Largo del Cubo de la Bocamaza ( $L_c$ ).** Está definido como el largo del eje del motor (50 mm) más un margen adicional de 5 mm para poder insertar una pequeña tapa que ayude a fijar a todo el conjunto.

$$L_c = 55 \text{ mm}$$

**Diámetro principal del Cubo de la Bocamaza ( $D_{c1}$ ).** Está definido por el diámetro del eje del motor (24 mm) multiplicado por un factor que se indica en la Tabla 31, donde  $d$  es el diámetro del eje de transmisión que en este caso coincide con el eje del motor por ser una transmisión directa.

**Tabla 31**

*Diámetro del cubo de una máquina respecto al eje de transmisión*

Tipo de conexión	Diámetro del cubo (mm)	
	Hierro fundido	Acero
Chaveta	$(2 \dots 2,2) \cdot d$	$(1,8 \dots 2) \cdot d$
Eje estriado o eje dentado	$(1,8 \dots 2) \cdot d$	$(1,8 \dots 2) \cdot d$
Presión cilíndrica, cónica o ajuste poligonal	$(2,2 \dots 2,6) \cdot d$	$(2 \dots 2,5) \cdot d$
Sujeción con pernos, apriete, cuña o ajuste deslizante poligonal	$(2 \dots 2,2) \cdot d$	$(1,8 \dots 2) \cdot d$

*Nota. Fuente. Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, por Wittel et al., 2019, Springer Vieweg.*

De la Tabla 31 se selecciona el tipo de conexión con chaveta para el material de acero que corresponde al diseño del cubo de la bocamaza, el cual será fabricado en acero SAE 1020. Se presenta esta relación en la Ecuación 3.112.

$$1,8 \cdot d \leq D_{c1} \leq 2 \cdot d \quad (3.112)$$

Donde:

$D_{c1}$  = Diámetro principal del cubo de la bocamaza, mm

$d_m$  = Diámetro del eje de los agujeros para los pernos, mm

$$1,8 \cdot 24 \leq D_{c1} \leq 2 \cdot 24$$

$$43,2 \leq D_{c1} \leq 48$$

Debido a que el diámetro principal corresponde al escalón con mayor diámetro del cubo, se utiliza el diámetro de 48 mm.

$$D_{c1} = 48 \text{ mm}$$

**Diámetro Secundario del Cubo de la Bocamaza ( $D_{c2}$ ).** Está definido por el diámetro principal del cubo de la bocamaza menos un margen de al menos 2 mm a todo alrededor para permitir una unión soldada. Por este motivo el diámetro secundario tendrá 44 mm de diámetro, el cual aún está dentro del margen permisible indicado en la Ecuación 3.107.

$$D_{c2} = 44 \text{ mm}$$

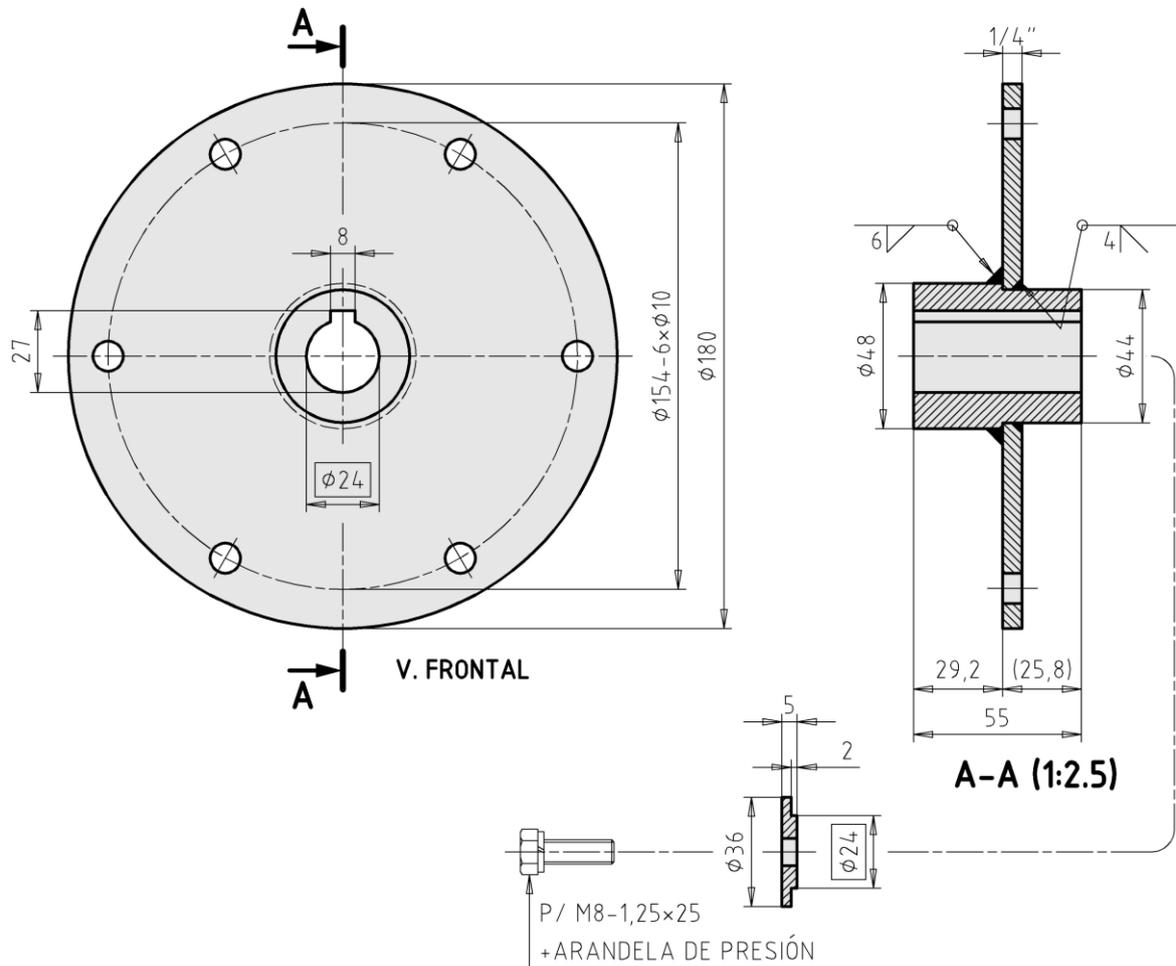
**Dimensionamiento de la Bocamaza del Rotor Centrífugo.** Para la fabricación de la bocamaza del rotor centrífugo, además de las dimensiones determinadas, se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones constructivas:

- El disco de la bocamaza estará fabricado en acero ASTM A36 y deberá tener el doble del espesor de la base del rotor centrífugo (1/8") es decir, 1/4" (6,35 mm).
- El cubo de la bocamaza estará fabricado en acero SAE 1020 que es compatible con el acero del disco y no presenta complicaciones en la soldadura, la cual deberá unirse al disco mediante una junta en "T" con un cateto máximo (igual al espesor del elemento más delgado), es decir de 6 mm y además al lado opuesto una junta de bisel con un margen de 2 mm lo que da como resultado un tamaño de soldadura 4 mm.
- La pequeña tapa que se muestra en la Figura 153, la cual tiene la función de fijar a todo el conjunto puede ser fabricada a partir de una plancha de 1/4" (6,35 mm) de espesor en acero ASTM A36 la cual será maquinada hasta 5 mm con un escalón de 2 mm con un diámetro de 24 mm y un agujero de 9 mm en el cual debe insertarse el perno M8-1,25x 25 mm en acero ASTM A325 y su arandela de presión para fijar todo el conjunto. Pero también puede ser fabricada a partir de una barra de acero SAE 1020 de 1 1/2" (38,1 mm) de diámetro la cual se maquina hasta 36 mm. La dimensión asignada a este elemento se hizo pensando en ambas formas de fabricación.
- Los seis agujeros en el disco son de 10 mm de diámetro cada uno para la inserción de pernos de diámetro 5/16"NC (7,9375 mm) en acero ASTM A325 con tuercas y arandelas de presión.

A continuación, se presenta el dimensionamiento de la bocamaza del rotor centrífugo en la Figura 164. Además, se presenta un modelo tridimensional del diseño del ventilador centrífugo en la Figura 165, el cual está fabricado completamente en acero ASTM A36 con una voluta de plancha perforada y un recubrimiento externo de lana de vidrio que cumple la función de silenciador.

**Figura 164**

*Dimensionamiento de la bocamaza del rotor centrífugo*

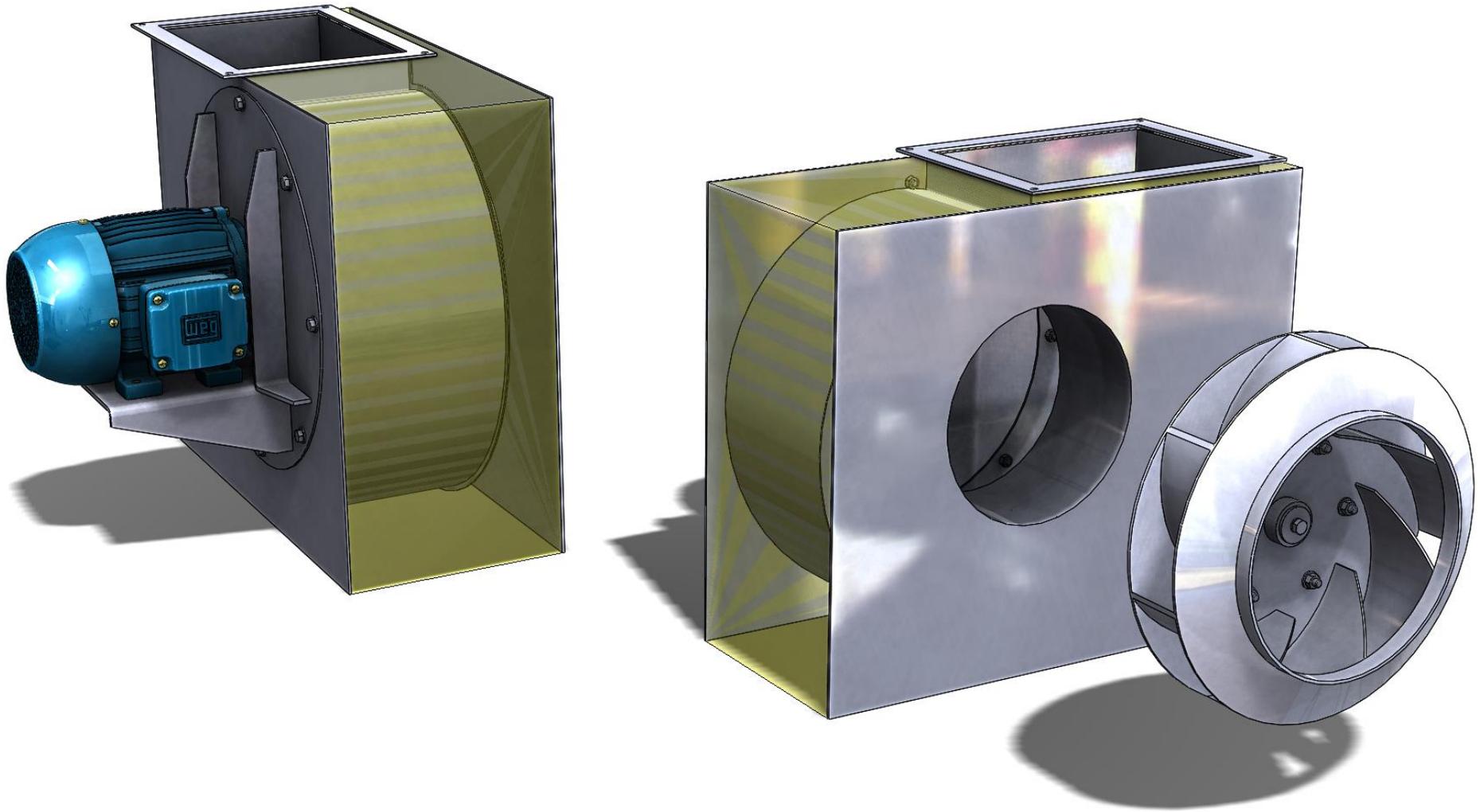


Nota. Fuente. Elaboración propia.

Hasta el momento, se han diseñado todos los componentes de la máquina de extracción de humos. Con esta información, se elabora un esquema representativo de la máquina en la Figura 166, el cual incluye un manómetro diferencial para supervisar el estado del filtro y una empuñadura para facilitar su traslado. Además, se incluye un modelo tridimensional de la máquina de extracción de humos en la Figura 167.

**Figura 165**

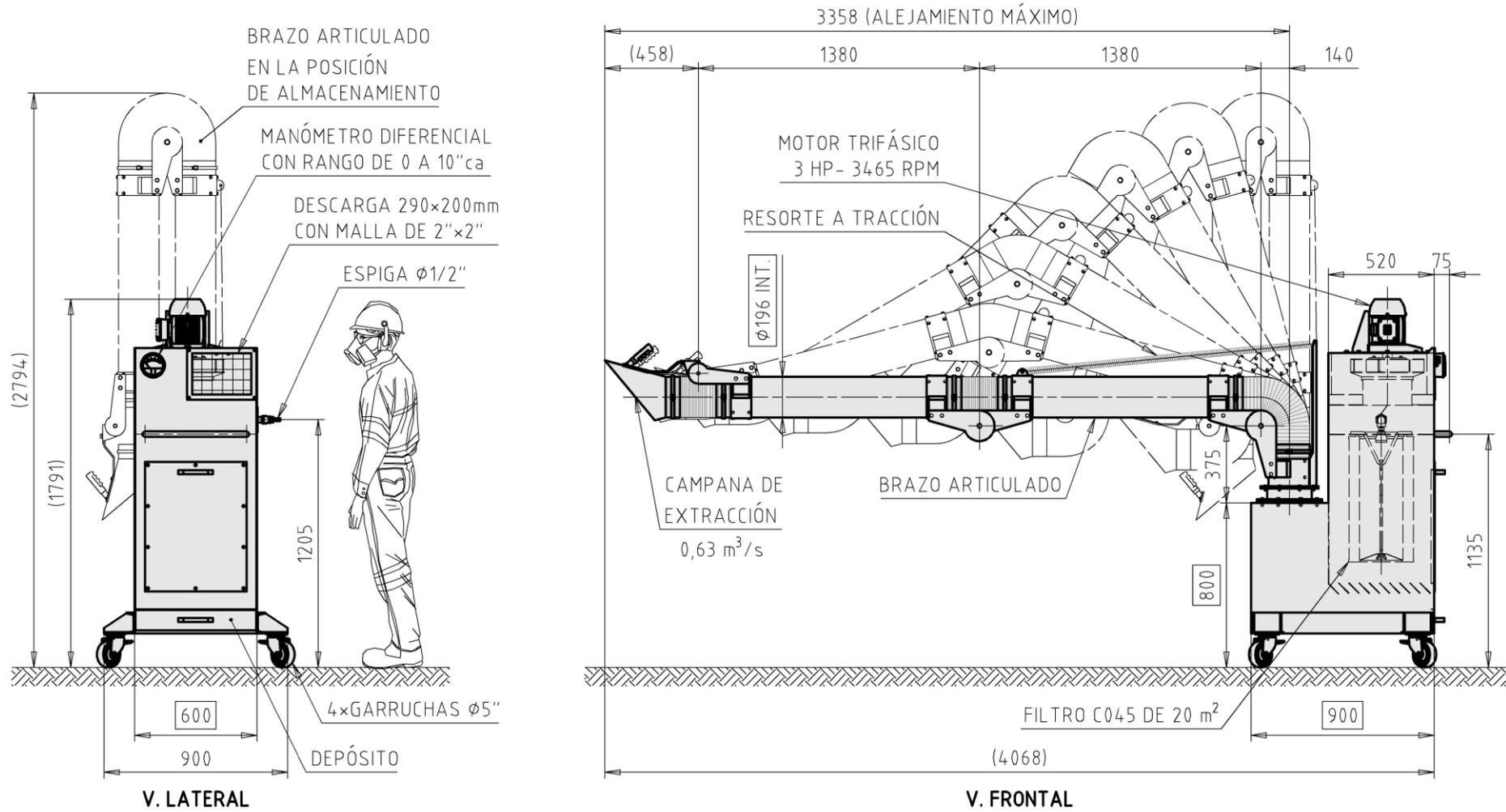
*Modelo tridimensional del ventilador centrífugo*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 166**

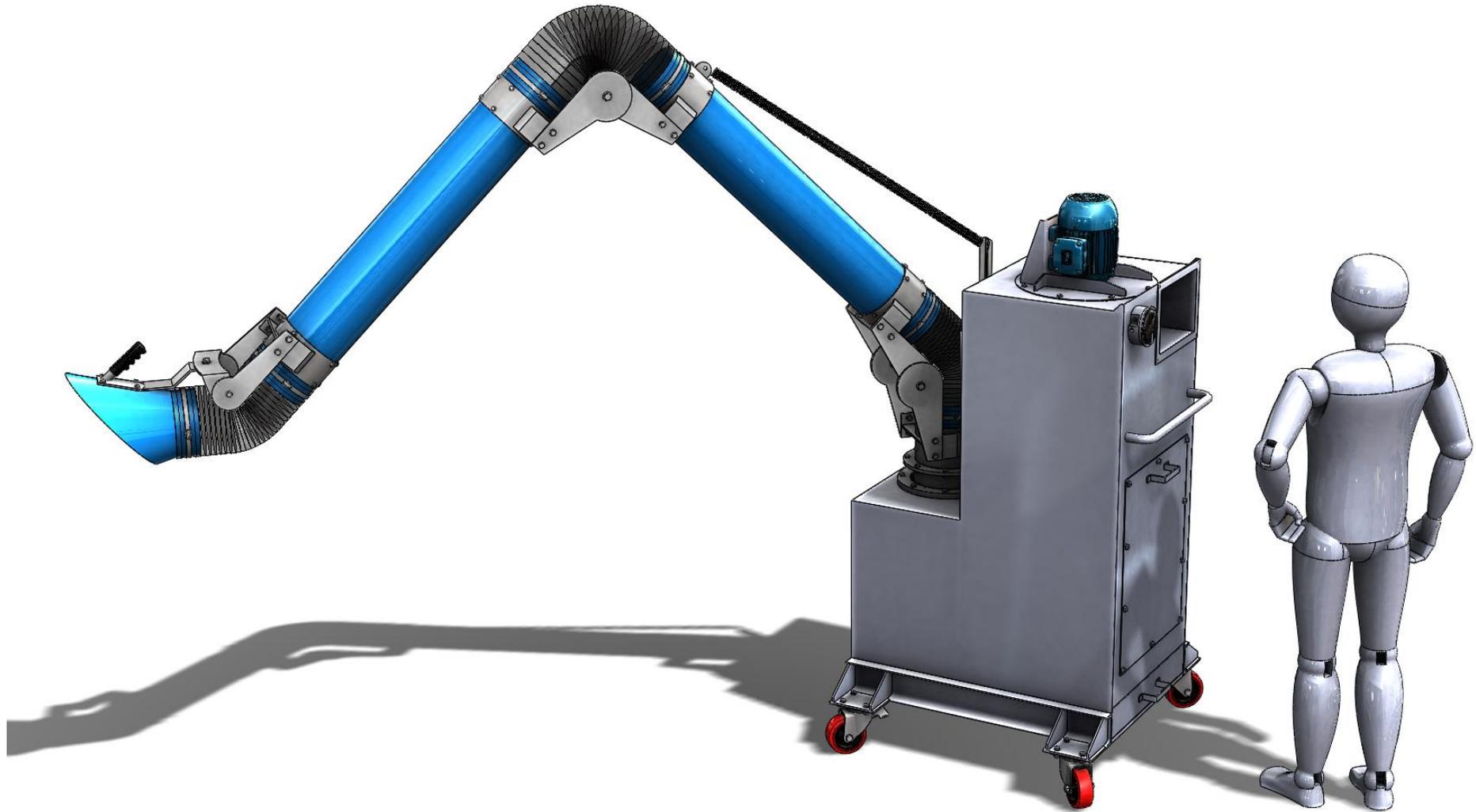
*Esquema de la máquina de extracción de humos*



Nota. Fuente. Elaboración propia.

**Figura 167**

*Modelo tridimensional de la máquina de extracción de humos*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

### 3.1. Análisis de la Máquina durante un Proceso de Soldadura

El análisis comprenderá la evaluación de la concentración de partículas en  $\text{mg}/\text{m}^3$  y en ppm (partes por millón) en el soldador y en el ambiente durante un proceso de soldadura mediante simulaciones computacionales.

#### 3.1.1. Simulación Computacional de la Máquina de Extracción de Humos.

Se llevará a cabo una simulación rotacional transitoria (incluye los efectos del tiempo) mediante simulaciones en CFD (Dinámica de fluidos computacional), utilizando el método de volúmenes finitos mediante el software *SolidWorks Flow Simulation 2024*, para evaluar el desempeño de la máquina de extracción de humos y cuantificar la concentración de contaminantes para poder evaluar la mejora en la calidad del aire durante un proceso de soldadura. Para esto se definen las etapas de la simulación.

- Preproceso
- Solver (Solucionador)
- Postproceso

**Preproceso.** Se introducen los datos de entrada al programa en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Geometría
- Volumen de control
- Materiales
- Malla
- Variables iniciales

**Geometría.** La geometría se desarrolla a partir del diseño tridimensional de la máquina de extracción de humos, incorporando el elemento rotacional del ventilador

centrífugo, junto con todos los componentes involucrados en el proceso de extracción de humos durante la simulación de una soldadura FCAW (Flux Cored Arc Welding). Este proceso se seleccionó debido a la considerable cantidad de humos que genera en comparación con otros procesos, como se indicó en la Tabla 3.

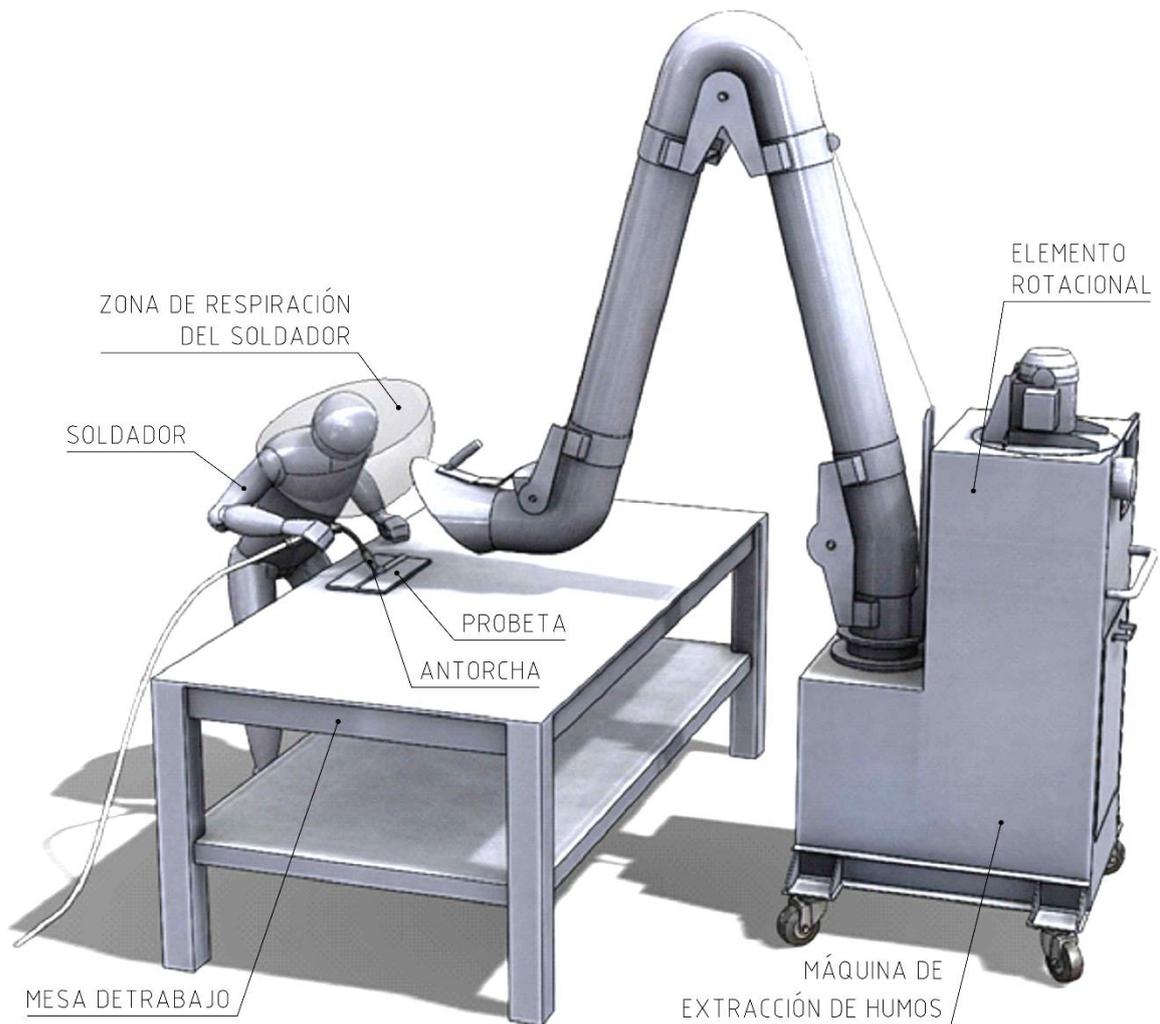
En la simulación, se incluirá una representación humana del soldador ejecutando el proceso de soldadura FCAW, abarcando su zona de respiración, la antorcha FCAW, la probeta de soldadura y la mesa de trabajo. De esta manera, se evaluará la calidad del aire tanto en la zona de respiración del soldador como en el ambiente donde se encuentra, permitiendo realizar un análisis integral de la contaminación del aire.

En total, la geometría está compuesta por siete elementos, los cuales fueron simplificados a partir de su geometría original como se muestra en la Figura 168:

- Máquina de extracción de humos
- Elemento rotacional
- Soldador
- Zona de respiración del soldador
- Antorcha de soldadura
- Probeta de soldadura
- Mesa de trabajo

**Figura 168**

*Geometría de la simulación de la máquina de extracción de humos*

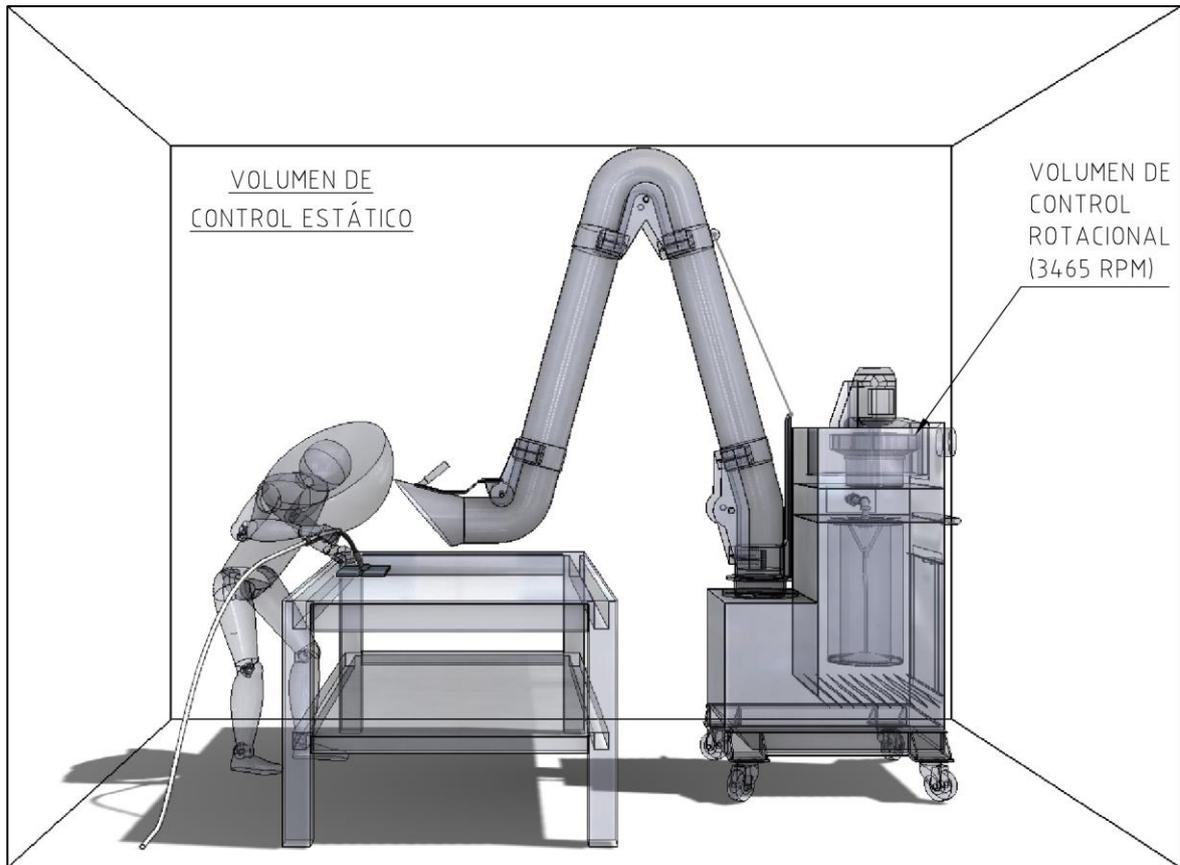


*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Volúmenes de Control.** En el contexto de una simulación rotacional, se emplean dos volúmenes de control distintos: uno estático y otro rotacional. El volumen estático abarca todo el espacio ocupado por el fluido en reposo dentro del entorno donde se lleva a cabo el proceso. Este ambiente tiene dimensiones de 4,5 m de largo, 3 m de ancho y 3 m de altura, como se ilustra en la Figura 169. Por otro lado, el volumen rotacional corresponde a un elemento que tiene la capacidad de girar en relación con el volumen estático. Este volumen rotacional es el mismo que se utilizó en la simulación del ventilador centrífugo.

**Figura 169**

*Volúmenes de control de la simulación de la máquina de extracción de humos*



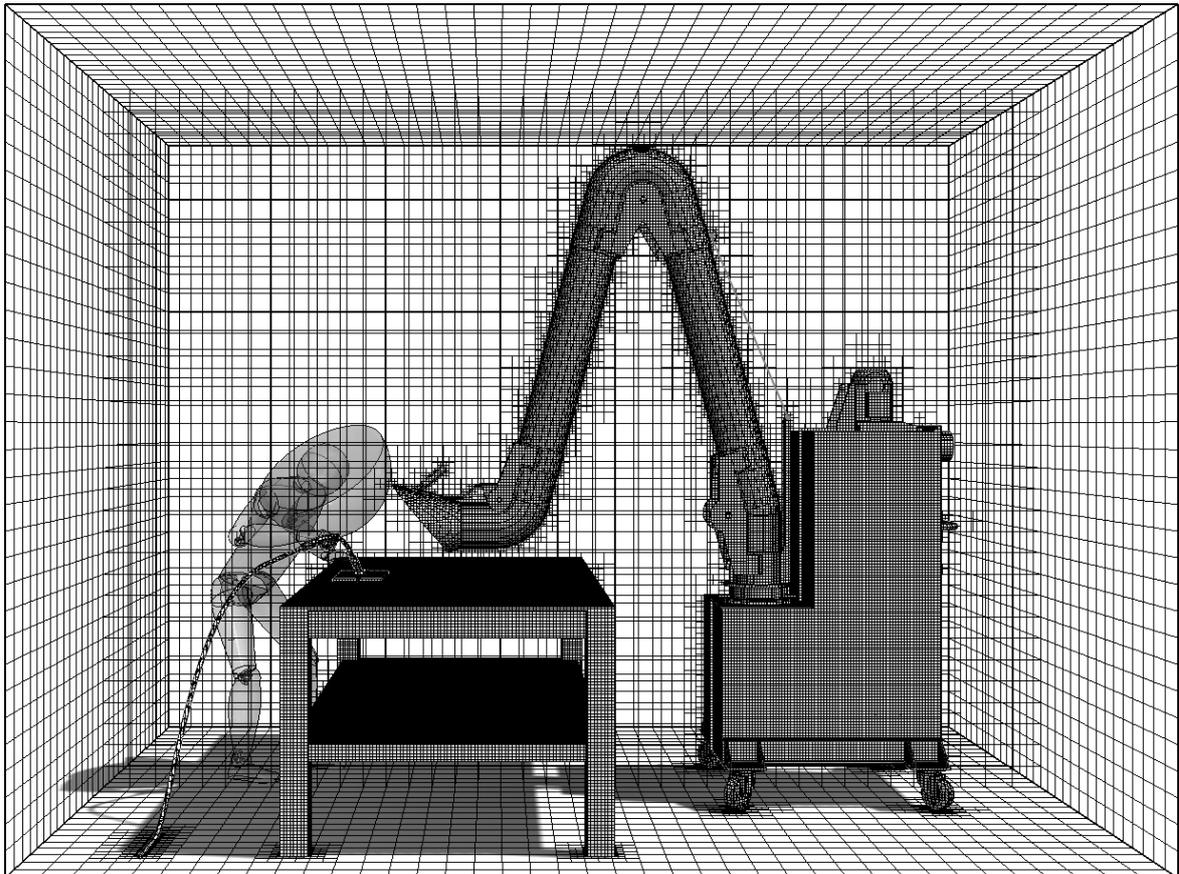
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Materiales.** El material de los sólidos será acero ASTM A36, con excepción del brazo articulado, que estará compuesto de aluminio 1050. El fluido utilizado será aire, con una densidad de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Por su parte, las partículas estarán constituidas por óxido de hierro en forma de humo.

**Malla.** Se divide la geometría de los volúmenes de control en volúmenes finitos como se muestra en la Figura 170. El mallado se refina en las zonas de contacto entre el sólido y el fluido para mejorar la precisión de la simulación.

**Figura 170**

*Malla de la simulación de la máquina de extracción de humos*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Variables iniciales.** La simulación se realizará en una atmósfera de aire en reposo, con una presión de 101325 Pa y una temperatura de 293,2 K (20 °C). Se consideraron los efectos gravitatorios debido al análisis de partículas.

Las variables de entrada incluyeron una rotación de 3465 RPM del elemento rotacional y el ingreso de partículas en la proporción especificada en la Tabla 32. Dicha tabla fue adaptada de una investigación de Jenkins et al. (2005), que estudió la distribución del tamaño de partículas de humos de soldadura en los procesos GMAW y FCAW. Con base en los datos originales, se realizó un cálculo para un tiempo de operación continuo estimado de 6 minutos, considerando que este es el tiempo máximo en que un soldador

puede trabajar de manera continua dentro del ciclo de trabajo de 10 minutos de una máquina de soldar.

**Tabla 32**

*Distribución másica de diversos humos de soldadura en 6 minutos*

Diámetro de las partículas ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro promedio ( $\mu\text{m}$ )	Proceso de soldadura			
		FCAW	GMAW globular	GMAW spray	GMAW pulsado
5,8 - 10	7,9	56,88	1,872	0,4	1,095
1,1 – 5,8	3,45	25,2	1,2	0,24	0,195
0,7 – 1,1	0,9	210,48	20,208	3,38	2,13
0,4 – 0,7	0,55	202,8	33,6	5,92	3,885
0,1 – 0,4	0,25	399,36	150,192	62,48	46,755

*Nota. Fuente. Particle Size Distribution of Gas Metal and Flux Cored Arc Welding Fumes, por N. Jenkins et al., 2005, Welding Journal.*

Los datos correspondientes al proceso FCAW, detallados en la Tabla 32, se transformaron en flujos másicos de partículas que ingresarán a la simulación, expresados en kg/s. Estos flujos se clasifican según los diámetros de las partículas, medidos en metros, como se muestra en la Tabla 33.

Es importante mencionar que, durante el proceso de soldadura, también se generan vapores con tamaños en el rango de 0,01 a 1  $\mu\text{m}$ . No obstante, estos no fueron incluidos en la simulación debido a limitaciones tecnológicas relacionadas con la capacidad de refinamiento de la malla en CFD. Sin embargo, dichos vapores, al ser capturados junto con el aire circundante por la campana de extracción, se condensan rápidamente en partículas de mayor tamaño debido al enfriamiento que ocurre durante su trayecto a través del brazo articulado y el colector. Este enfriamiento transforma los vapores metálicos en partículas finas condensadas de aproximadamente 0,3  $\mu\text{m}$ , tamaño que puede ser fácilmente capturado por el filtro diseñado específicamente para humos de soldadura.

**Tabla 33***Flujos máxicos de las partículas ingresadas a la simulación*

Diámetro de las partículas ingresadas		Flujo máxico	
$\mu\text{m}$	m	mg/min	kg/s
7,9	$7,9 \times 10^{-6}$	9,48	$1,58 \times 10^{-7}$
3,45	$3,45 \times 10^{-6}$	4,2	$7 \times 10^{-8}$
0,9	$9 \times 10^{-7}$	35,08	$5,847 \times 10^{-7}$
0,55	$5,5 \times 10^{-7}$	33,8	$5,633 \times 10^{-7}$
0,25	$2,5 \times 10^{-7}$	66,56	$1,109 \times 10^{-6}$

*Nota. Fuente. Particle Size Distribution of Gas Metal and Flux Cored Arc Welding Fumes, por N. Jenkins et al., 2005, Welding Journal.*

Se introducirán en el software un total de mil partículas de cada uno de los cinco tipos de diámetros.

**Solver (Solucionador).** Se introducen los datos que se esperan obtener en el software en un formato compatible. Estos datos se clasifican en:

- Variable objetivo
- Tipo de ejecución

**Variable Objetivo.** Se espera evaluar el desempeño de la máquina de extracción de humos mediante la medición de la concentración de partículas presentes tanto en la zona de respiración del soldador como en el ambiente donde se encuentra.

**Tipo de Ejecución.** La simulación será de tipo fluidodinámica transitoria, considerando los efectos del tiempo. El intervalo entre iteraciones, denominado "paso" o *Step*, será el mismo que se utilizó en la simulación del ventilador centrífugo

$$Step = 0,00025$$

La ejecución incluye dos escenarios: uno con la máquina de extracción de humos apagada y otro con la máquina encendida. Cada simulación tiene una duración total de

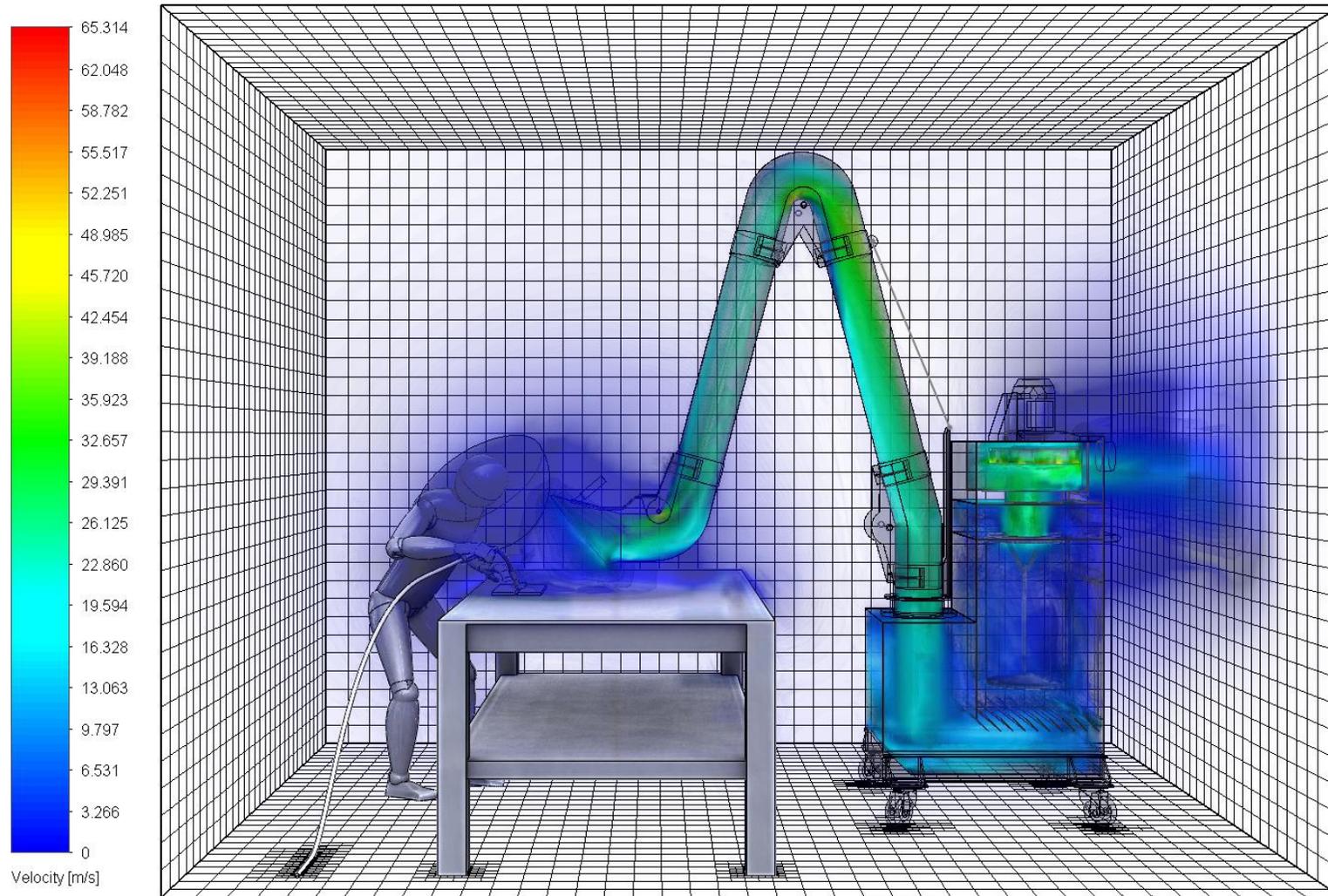
2000 iteraciones, con un intervalo de 0,00025 segundos físicos por iteración. El término "tiempo físico" se refiere al tiempo transcurrido dentro de la simulación, mientras que el "tiempo computacional" corresponde al tiempo real necesario para procesarla, el cual depende de la capacidad de procesamiento del ordenador utilizado. En este caso, cada simulación requirió aproximadamente 20 horas de tiempo computacional.

**Postproceso.** Se definirán los formatos gráficos adecuados para gestionar la gran cantidad de información generada en la simulación, con el fin de presentar los resultados de manera clara y eficaz a través de curvas y gráficos. El procedimiento será el siguiente:

- Se trazarán los perfiles de velocidad en m/s, utilizando un espectro de colores que va desde el azul para las velocidades más bajas hasta el rojo para las velocidades más altas alcanzadas por la máquina de extracción de humos, como se muestra en la Figura 171.
- Se trazarán los perfiles de la diferencia de presión estática en Pascales empleando un espectro de colores que va desde el azul para la presión manométrica atmosférica (0 Pa) hasta el rojo para la presión negativa más alta alcanzada por la máquina de extracción de humos, como se muestra en la Figura 172.
- Se trazarán los perfiles de dispersión de partículas que representan la producción de humos de soldadura de acuerdo con las características de flujo másico y tamaño de partículas establecidas, tanto para el escenario con la máquina de extracción apagada como con la máquina de extracción encendida, como se muestra en las Figuras 173 y 174, respectivamente.

**Figura 171**

*Trazado de velocidades en la máquina de extracción de humos*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 172**

*Trazado de presiones estáticas en la máquina de extracción de humos*



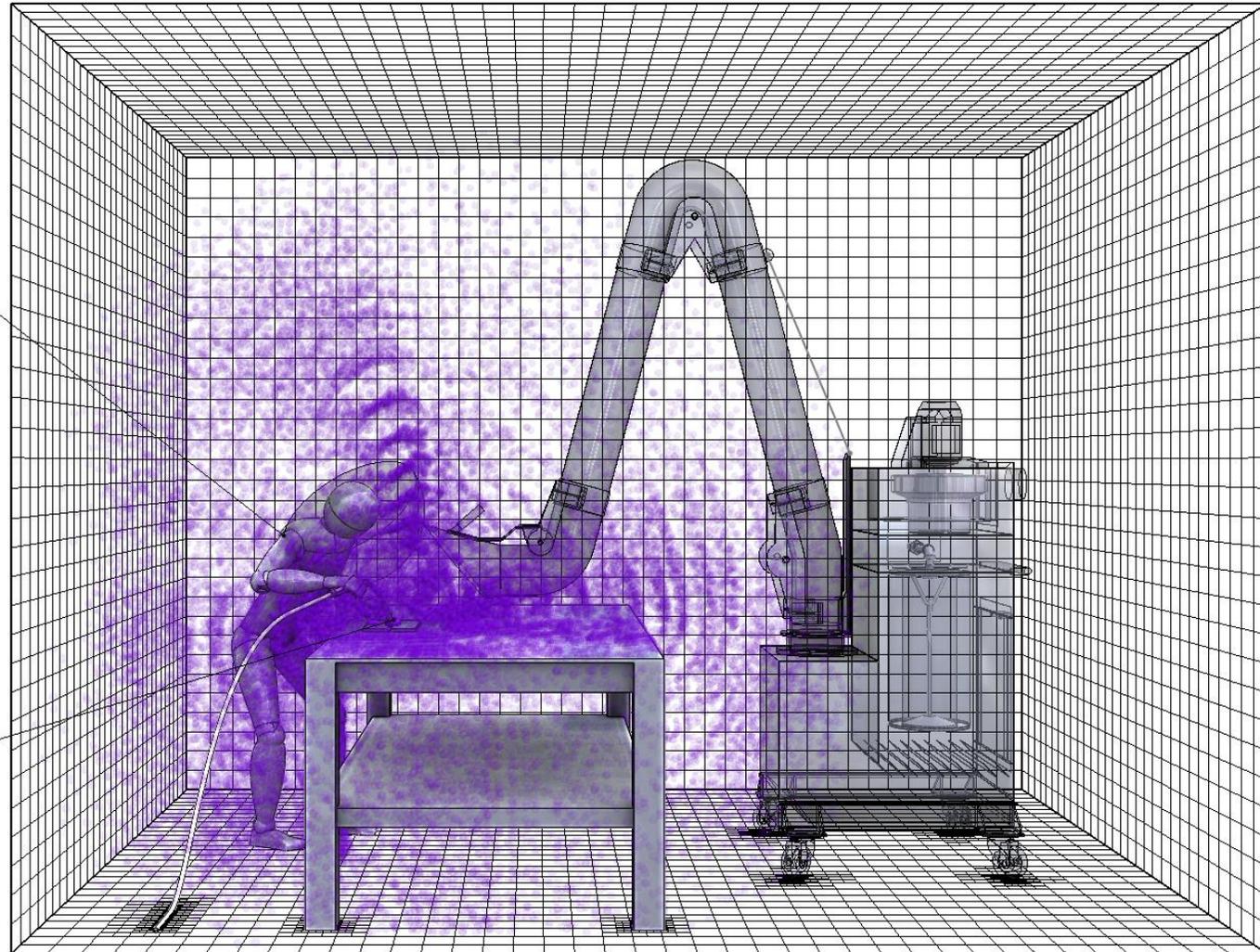
*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 173**

*Trazado de partículas con la máquina de extracción de humos apagada*

SOLDADOR	
Number of Particles	171.000
Number of Particles (0,9um)	43.000
Number of Particles (3,45um)	33.000
Number of Particles (0,55um)	42.000
Number of Particles (7,9um)	11.000
Number of Particles (0,25um)	42.000

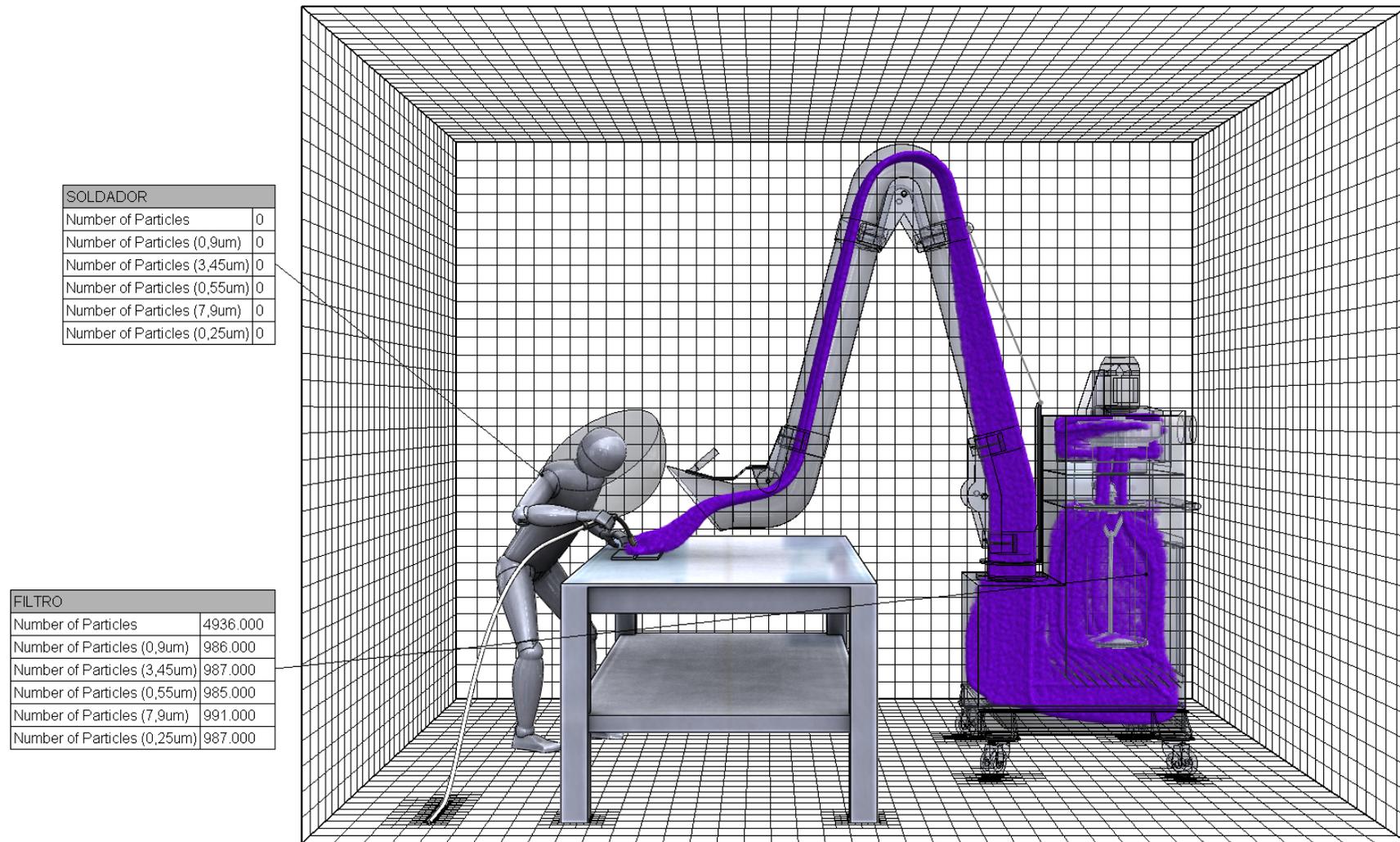
AMBIENTE	
Number of Particles	5000.000
Number of Particles (0,9um)	1000.000
Number of Particles (3,45um)	1000.000
Number of Particles (0,55um)	1000.000
Number of Particles (7,9um)	1000.000
Number of Particles (0,25um)	1000.000



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

**Figura 174**

*Trazado de partículas con la máquina de extracción de humos encendida*



*Nota. Fuente. Elaboración propia.*

### 3.1.2. Procesamiento de Datos

Se calculará la concentración de partículas en  $\text{mg}/\text{m}^3$  y en ppm mediante el TWA tanto en la zona de respiración del soldador como en el ambiente donde se encuentra para dos escenarios, uno con la máquina apagada y otro con la máquina encendida.

**TWA (Time Weighted Average).** Evalúa el promedio ponderado de todas las exposiciones a contaminantes durante una jornada laboral de 8 horas. En el caso de un soldador, se estima que opera de manera continua en períodos máximos de 6 minutos dentro de un ciclo de trabajo de 10 minutos de su máquina de soldar, lo que depende tanto de las capacidades de la máquina como de las habilidades humanas del soldador. Las pausas regulares son fundamentales para garantizar tanto la seguridad del trabajador como la calidad de la soldadura. Para convertir una concentración de contaminantes de  $\text{mg}/\text{m}^3$  a ppm (partículas por millón) se utiliza la Ecuación 3.113, la cual se encuentra en el anexo 15 del D.S. N°023-2017-EM. El peso molecular del contaminante se establece en 159,7 g/mol el cual corresponde a humos de óxido férrico los cuales se encuentran con mayor abundancia en los humos de soldadura.

$$TWA_{(ppm)} = \frac{24,45 \cdot TWA_{(mg/m^3)}}{PM} \quad (3.113)$$

Donde:

$TWA_{(ppm)}$  = Concentración de partículas, ppm

$TWA_{(mg/m^3)}$  = Concentración de partículas,  $\text{mg}/\text{m}^3$

$PM$  = Peso molecular del contaminante, g/mol

Se establecerán dos tipos de TWA: uno para el soldador, evaluando su exposición directa, y otro para el ambiente donde se encuentra, considerando la dispersión de los contaminantes en el aire circundante.

**TWA del Soldador ( $TWA_S$ ).** Evalúa la exposición a las concentraciones que afectan al soldador durante su operación. Se determina mediante la Ecuación 3.114.

$$TWA_S = \frac{m_S}{V_S} \quad (3.114)$$

Donde:

$TWA_S$  = Concentración de partículas en la zona de respiración del soldador, mg/m<sup>3</sup>

$m_S$  = Masa de partículas dentro de la zona de respiración del soldador, mg

$V_S$  = Volumen de la zona de respiración del soldador, m<sup>3</sup>

**Masa de Partículas Dentro de la Zona de Respiración del Soldador ( $m_S$ ).** Es la suma de todos los flujos máxicos emitidos para cada diámetro de partículas durante 6 minutos de operación, multiplicada por un factor que representa la relación entre la cantidad de partículas que llegan a la zona de respiración del soldador y la cantidad de partículas emitidas durante el proceso de soldadura. Este valor se determina mediante la Ecuación 3.115.

$$m_S = m_{S\phi 7,9} \cdot \frac{N_{S\phi 7,9}}{N_{\phi 7,9}} + m_{\phi 3,45} \cdot \frac{N_{S\phi 3,45}}{N_{\phi 3,45}} + m_{\phi 0,9} \cdot \frac{N_{S\phi 0,9}}{N_{\phi 0,9}} + m_{\phi 0,55} \cdot \frac{N_{S\phi 0,55}}{N_{\phi 0,55}} + m_{\phi 0,25} \cdot \frac{N_{S\phi 0,25}}{N_{\phi 0,25}} \quad (3.115)$$

Donde:

$m_S$  = Masa de partículas dentro de la zona de respiración del soldador, mg

$m_{S\phi d}$  = Masa de partículas de diámetro  $d$  μm emitidas en la soldadura, mg

$N_{S\phi d}$  = Cantidad de partículas de diámetro  $d$  μm dentro de la zona de respiración del soldador

$N_{\phi d}$  = Cantidad de partículas de diámetro  $d$  μm emitidas en la soldadura

**Volumen de la Zona de Respiración del Soldador ( $V_S$ ).** Es el volumen que ocupa una semiesfera de 300 mm de radio, como se mostró en la Figura 8. Se determina mediante la Ecuación 3.116.

$$V_S = \frac{2\pi}{3} \cdot R_S^3 \quad (3.116)$$

Donde:

$V_S$  = Volumen de la zona de respiración del soldador,  $m^3$

$R_S$  = Radio de la zona de respiración del soldador, m

$$V_S = \frac{2\pi}{3} \cdot 0,3^3$$

$$V_S = 0,056549 \text{ m}^3$$

**TWA del Ambiente ( $TWA_A$ ).** Evalúa la exposición a las concentraciones que afectan al ambiente donde se encuentra el soldador. Se determina mediante la Ecuación 3.117.

$$TWA_A = \frac{m_A}{V_A} \quad (3.117)$$

Donde:

$TWA_A$  = Concentración de partículas en el ambiente,  $mg/m^3$

$m_A$  = Masa de partículas dentro del ambiente, mg

$V_A$  = Volumen del ambiente,  $m^3$

**Masa de Partículas en el Ambiente con la Máquina Apagada ( $m_L^{OFF}$ ).** Es la suma de todos los flujos máxicos emitidos para cada diámetro de partículas durante 6 minutos de operación. Dado que no existe un método de control de estos contaminantes, el

ambiente se llena con el 100% de las partículas emitidas en el proceso de soldadura, tal como se indica en la Ecuación 3.118.

$$m_A^{OFF} = m_{\phi 7,9} + m_{\phi 3,45} + m_{\phi 0,9} + m_{\phi 0,55} + m_{\phi 0,25} \quad (3.118)$$

Donde:

$m_A^{OFF}$  = Masa de partículas en el ambiente con la máquina apagada, mg

$m_{\phi d}$  = Masa de partículas de diámetro  $d$   $\mu\text{m}$  emitidas en la soldadura, mg

**Masa de Partículas en el Ambiente con la Máquina Encendida ( $m_A^{ON}$ ).** Es la suma de todos los flujos máxicos emitidos para cada diámetro de partículas durante 6 minutos de operación. Este valor se multiplica por un factor que representa la relación entre la cantidad de partículas que llegan al filtro de la máquina de extracción de humos y la cantidad de partículas emitidas durante la soldadura, además de otro factor que refleja la eficiencia de filtración de la máquina. La eficiencia de filtración es del 95% para partículas de diámetro 0,25  $\mu\text{m}$  y del 99% para todas las partículas de mayor tamaño, tal como se indica en la Ecuación 3.119.

$$\begin{aligned} m_A^{ON} = & m_{\phi 7,9} \cdot \frac{N_{L\phi 7,9}}{N_{\phi 7,9}} \cdot (1 - 0,99) + m_{\phi 3,45} \cdot \frac{N_{L\phi 3,45}}{N_{\phi 3,45}} \cdot (1 - 0,99) \\ & + m_{\phi 0,9} \cdot \frac{N_{L\phi 0,9}}{N_{\phi 0,9}} \cdot (1 - 0,99) + m_{\phi 0,55} \cdot \frac{N_{L\phi 0,55}}{N_{\phi 0,55}} \cdot (1 - 0,99) \\ & + m_{\phi 0,25} \cdot \frac{N_{L\phi 0,25}}{N_{\phi 0,25}} \cdot (1 - 0,95) \end{aligned} \quad (3.119)$$

Donde:

$m_A^{ON}$  = Masa de partículas en el ambiente con la máquina encendida, mg

$m_{\phi d}$  = Masa de partículas de diámetro  $d$   $\mu\text{m}$  emitidas en la soldadura, mg

$N_{L\phi d}$  = Cantidad de partículas de diámetro  $d$   $\mu\text{m}$  que llegan al filtro

$N_{\phi d}$  = Cantidad de partículas de diámetro  $d$   $\mu\text{m}$  emitidas en la soldadura

**Volumen del Ambiente ( $V_A$ ).** Es el volumen que ocupa el ambiente donde se está ejecutando la soldadura. Se determina mediante la Ecuación 3.120.

$$V_L = L_L \cdot A_L \cdot H_L \quad (3.120)$$

Donde:

$V_L$  = Volumen del ambiente,  $m^3$

$L_L$  = Largo del ambiente, m

$A_L$  = Ancho del ambiente, m

$H$  = Altura del ambiente, m

$$V_S = 4 \cdot 3 \cdot 3$$

$$V_S = 36 \text{ m}^3$$

## **CAPÍTULO IV**

### **Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados**

Se presentan los resultados obtenidos en el procesamiento de datos de la simulación computacional de la máquina de extracción de humos, donde se compararán la concentración de contaminantes obtenida con los valores estipulados en las normas y estándares ambientales vigentes, con el objetivo de determinar la eficacia de la máquina en la mejora de la calidad del aire durante un proceso de soldadura.

#### **4.1. Resultados**

Se presentan los resultados del procesamiento de datos de cada escenario de simulación, los cuales corresponden al proceso de soldadura con la máquina de extracción apagada y encendida.

##### ***4.1.1. Proceso de Soldadura con la Máquina de Extracción Apagada***

**Concentración de Partículas en la Zona de Respiración del Soldador ( $TWA_5^{OFF}$ ).** Se determina mediante las Ecuaciones 3.114, 3.115 y 3.116. Para convertir los resultados a ppm se usa la Ecuación 3.113.

$$TWA_S^{OFF} = \frac{56,88 \cdot \frac{11}{1000} + 25,2 \cdot \frac{33}{1000} + 210,48 \cdot \frac{43}{1000} + 202,8 \cdot \frac{42}{1000} + 399,36 \cdot \frac{42}{1000}}{0,056549}$$

$$TWA_S^{OFF} = 643,704 \text{ mg/m}^3$$

$$TWA_S^{OFF} = 98,551 \text{ ppm}$$

**Concentración de Partículas en el Ambiente ( $TWA_A^{OFF}$ ).** Se determina mediante las Ecuaciones 3.117, 3.118 y 3.120. Para convertir los resultados a ppm se usa la Ecuación 3.113.

$$TWA_A^{OFF} = \frac{56,88 + 25,2 + 210,48 + 202,8 + 399,36}{36}$$

$$TWA_A^{OFF} = 24,853 \text{ mg/m}^3$$

$$TWA_A^{OFF} = 3,805 \text{ ppm}$$

#### 4.1.2. *Proceso de Soldadura con la Máquina de Extracción Encendida*

**Concentración de Partículas en la Zona de Respiración del Soldador ( $TWA_S^{ON}$ ).** se determina mediante las Ecuaciones 3.114, 3.115 y 3.116. Para convertir los resultados a ppm se usa la Ecuación 3.113.

$$TWA_S^{ON} = \frac{56,88 \cdot \frac{0}{1000} + 25,2 \cdot \frac{0}{1000} + 210,48 \cdot \frac{0}{1000} + 202,8 \cdot \frac{0}{1000} + 399,36 \cdot \frac{0}{1000}}{0,056549}$$

$$TWA_S^{ON} = 0 \text{ mg/m}^3$$

$$TWA_S^{ON} = 0 \text{ ppm}$$

**Concentración de Partículas en el Ambiente ( $TWA_A^{ON}$ ).** Se determina mediante las Ecuaciones 3.117, 3.119 y 3.120. Para convertir los resultados a ppm se usa la Ecuación 3.113.

$$TWA_A^{ON} = \frac{1}{36} \cdot (56,88 \cdot \frac{991}{1000} (1 - 0,99) + 25,2 \cdot \frac{987}{1000} (1 - 0,99) + 210,48 \cdot \frac{986}{1000} (1 - 0,99) + 202,8 \cdot \frac{985}{1000} (1 - 0,99) + 399,36 \cdot \frac{987}{1000} (1 - 0,95))$$

$$TWA_A^{ON} = 0,683 \text{ mg/m}^3$$

$$TWA_A^{ON} = 0,105 \text{ ppm}$$

A continuación, en la Tabla 34 se presentan los resultados obtenidos en los dos escenarios simulados del proceso de soldadura: con la máquina de extracción apagada y encendida.

**Tabla 34**

*Concentración de humos con la máquina de extracción apagada y encendida.*

Escenario de la simulación	Concentración de contaminantes (mg/m <sup>3</sup> )		
	Zona de respiración del soldador	Ambiente	Límite permitido
Máquina de extracción apagada	643,704	24,853	5
Máquina de extracción encendida	0	0,683	5

*Nota. Fuente.* Elaboración propia.

## 4.2. Contrastación de Hipótesis

Con base en los resultados obtenidos mediante las simulaciones computacionales, se procede a la verificación de la hipótesis general y las hipótesis específicas planteadas en la presente investigación.

#### **4.2.1. Verificación de la Hipótesis General**

La hipótesis general establece que: *"El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire durante un proceso de soldadura."* Las simulaciones computacionales realizadas confirmaron esta hipótesis, ya que los resultados mostraron una concentración de 0 mg/m<sup>3</sup> en la zona de respiración del soldador y de 0,683 mg/m<sup>3</sup> en el ambiente. Ambos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible de 5 mg/m<sup>3</sup> estipulado en el D.S. N.º 023-2017-EM. Por lo tanto, se valida que el diseño propuesto mejora la calidad del aire durante el proceso de soldadura.

#### **4.2.2. Verificación de la Primera Hipótesis Específica**

La primera hipótesis específica plantea que: *"El diseño de una máquina de extracción de humos disminuirá la contaminación del aire para el soldador durante un proceso de soldadura."* En las simulaciones computacionales se determinó que la concentración de partículas en la zona de respiración del soldador fue de 0 mg/m<sup>3</sup>. Este resultado demuestra que la máquina de extracción de humos reduce de manera efectiva la contaminación del aire en dicha zona, cumpliendo con el límite normativo de 5 mg/m<sup>3</sup> establecido en el D.S. N.º 023-2017-EM. Por lo tanto, se valida la primera hipótesis específica.

#### **4.2.3. Verificación de la Segunda Hipótesis Específica**

La segunda hipótesis específica establece que: *"El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire ambiental."* Los resultados de las simulaciones computacionales mostraron que la concentración de partículas en el ambiente fue de 0,683 mg/m<sup>3</sup>, un valor inferior al límite máximo permitido de 5 mg/m<sup>3</sup> estipulado en el D.S. N.º 023-2017-EM. Esto confirma que el diseño de la máquina de

extracción de humos mejora efectivamente la calidad del aire ambiental, validando la segunda hipótesis específica.

### **4.3. Discusión de Resultados**

Como se indica en la Tabla 34, durante la simulación del proceso de soldadura con la máquina de extracción apagada, es decir, sin un control de contaminantes, las concentraciones fueron de 643.704 mg/m<sup>3</sup> en la zona de respiración del soldador y 24.853 mg/m<sup>3</sup> en el ambiente. Ambos valores superan ampliamente el límite de 5 mg/m<sup>3</sup> establecido en el Decreto Supremo N.º 023-2017-EM. Este exceso de contaminantes también se observa de manera visual en la Figura 173. Al encender la máquina de extracción, los valores se redujeron drásticamente a 0 mg/m<sup>3</sup> en la zona de respiración del soldador y a 0.683 mg/m<sup>3</sup> en el ambiente, lo que demuestra que la máquina recolectó y filtró eficientemente los contaminantes, como se muestra en la Figura 174.

Los resultados de las simulaciones computacionales confirman la eficacia del diseño de la máquina de extracción de humos para reducir las concentraciones de contaminantes. Tanto en la zona de respiración del soldador como en el ambiente, los valores obtenidos con la máquina encendida se mantuvieron significativamente por debajo del límite de 5 mg/m<sup>3</sup> establecido en el Decreto Supremo N.º 023-2017-EM. Además, la eficiencia energética del ventilador centrífugo alcanzó el 64.65% durante la simulación de su operación, como se indica en la Figura 152.

Estos resultados no solo protegen la salud del soldador al minimizar su exposición a partículas contaminantes, sino que también promueven un ambiente laboral más seguro y garantizan el cumplimiento de las normativas ambientales y laborales vigentes, como el Decreto Supremo N.º 015-2005-SA, el Decreto Supremo N.º 023-2017-EM y la Resolución Ministerial N.º 232-2020-VIVIENDA.

## CONCLUSIONES

- En la curva de caudal vs. presión estática del ventilador centrífugo se obtuvo una presión estática de 177,5 mmca en el punto de operación. Dado que el valor obtenido está 10 mmca por encima de lo necesario, se concluye que la predicción fue correcta y que el ventilador centrífugo está correctamente diseñado.
- En la curva de caudal vs. consumo del ventilador centrífugo, se obtuvo un consumo de 2,68 HP en el punto de operación, lo cual coincide con la predicción de potencia realizada, confirmando que la selección del motor eléctrico de 3 HP es apropiada.
- En la curva de caudal vs. eficiencia del ventilador centrífugo, se obtuvo una eficiencia de 64,65% en el punto de operación, un valor cercano al punto de máxima eficiencia, lo que confirma que el ventilador está correctamente diseñado para el caudal y la presión estática requeridos.
- La máquina de extracción de humos cuenta con un silenciador integrado que reduce el nivel de ruido hasta un máximo de 74 dBA, lo cual es aceptable según los estándares nacionales de calidad ambiental para ruido en zonas industriales, conforme al Decreto Supremo N°085-2003-PCM.
- La máquina de extracción de humos cumple con las normativas de seguridad industrial vigentes, tanto en lo relativo a la calidad del aire como en la reducción de riesgos asociados a la ventilación del área de trabajo, lo que contribuye a un entorno laboral más seguro.
- El diseño de esta máquina de extracción de humos ofrece una adecuada capacidad de extracción, eficiencia energética y un nivel bajo de ruido, posicionándola como una opción competitiva en el mercado industrial actual.
- La máquina de extracción de humos contribuye al desarrollo tecnológico en el sector metalmecánico al mejorar la seguridad y optimizar los procesos de soldadura.

## RECOMENDACIONES

- Se seleccionó el aluminio 1050 como material para la fabricación de la campana de extracción; sin embargo, en caso de requerir una alta producción de unidades, se recomienda considerar el uso de fibra de vidrio, ya que su costo de fabricación será menor, lo que lo convierte en el material más adecuado para condiciones de producción a gran escala.
- En aquellos casos en los que el proceso de soldadura no implique una alta demanda de extracción, se puede ajustar la velocidad de captura alejando la campana de extracción del proceso de soldadura, lo que permitirá una adecuada regulación del sistema de extracción sin comprometer su efectividad.
- Se puede evaluar la implementación de motores de bajo consumo energético o sistemas de control inteligente de velocidad que ajusten automáticamente la potencia de extracción según la intensidad del proceso de soldadura, reduciendo el consumo de energía cuando no se requiere alta capacidad de succión.
- Aunque la máquina de extracción de humos está diseñada para filtrar adecuadamente los humos de soldadura y devolver un aire más limpio, se sugiere instalar un ducto en la descarga del ventilador, el cual debe ser dirigido hacia el exterior de los ambientes de trabajo, para evitar una recirculación de contaminantes.
- En ambientes de soldadura con iluminación insuficiente, se recomienda incorporar una fuente de luz en la campana de extracción, ya que el brazo articulado de la máquina siempre está presente durante el proceso. Esto convierte a la campana de extracción en un lugar ideal para instalar un punto luminoso que mejore las condiciones de visibilidad.
- Se puede automatizar el proceso de limpieza de la máquina de extracción utilizando una válvula de diafragma en el sistema de limpieza, la cual debe activarse cuando

la diferencia de presión entre la cámara sucia y la cámara limpia alcance los 4,5” ca, garantizando así un rendimiento óptimo de la máquina.

- Para facilitar el uso de la máquina de extracción de humos, se recomienda implementar indicadores visuales que muestren los diferentes estados del filtro. Estos indicadores pueden ser gestionados a través de sensores de presión conectados a un tablero de control, configurado según los valores especificados en la Tabla 23.
- Aunque la máquina de extracción de humos está diseñada para funcionar correctamente con un brazo articulado de 8” de diámetro, es posible instalar dos brazos de 6” para procesos de soldadura menos demandantes. Esto implicaría solo un cambio en los brazos, los cuales pueden ser rediseñados a escala.
- La máquina de extracción de humos de soldadura no solo es apta para su propósito original, sino que también puede ser utilizada para la extracción de otros contaminantes secos, como los generados por cortes o pulidos en madera, concreto, o polvos provenientes de procesos de chancado. Para la extracción de contaminantes húmedos, como los vapores, se recomienda reemplazar el filtro actual por uno adecuado y sustituir el depósito tipo gabinete por un sistema de drenaje en la parte inferior, para facilitar la eliminación de los residuos.
- Para procesos que generen contaminantes altamente tóxicos o que no puedan ser eliminados de manera efectiva por el filtro estándar, se recomienda la incorporación de un sistema adicional de purificación, como un filtro de carbón activado o un filtro absoluto HEPA (High Efficiency Particulate Air).
- Se recomienda implementar un programa de capacitación para los operarios sobre el uso correcto y mantenimiento de la máquina de extracción de humos. Esto garantizará una mayor eficiencia de la máquina y ayudará a prolongar su vida útil, además de cumplir con los estándares de seguridad.

## REFERENCIAS

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH]. (2023). *Industrial ventilation: A manual of recommended practice for design* (31st ed). American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- American Institute of Steel Construction. (2023). *Steel Construction Manual* (16th ed).
- American Society of Mechanical Engineers [ASME]. (2022a). *ASME B31.3-2022: Process Piping*. American Society of Mechanical Engineers.
- American Society of Mechanical Engineers [ASME]. (2022b). *ASME B36.10M-2022: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*. American Society of Mechanical Engineers.
- American Welding Society [AWS]. (2018). *AWS F3. 2:2018: Ventilation Guide for Weld Fume*. American Welding Society.
- American Welding Society [AWS]. (2020). *AWS A3.0M/A3.0:2020: Standard welding terms and definitions*. American Welding Society.
- American Welding Society [AWS]. (2021). *Safety in welding, cutting, and allied processes: ANSI Z49.1:2021: An American national standard*. American Welding Society.
- Aracil Cadenas, M. (2016a). *Soldeo con alambre tubular*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].
- Aracil Cadenas, M. (2016b). *Soldeo MIG/MAG*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].
- Aracil Cadenas, M., & Romero Camacho, R. (2016). *Soldeo manual por arco con electrodo revestido*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].

- Autodesk. (2024). *AutoCAD®* (Versión 2024) [Software].
- Behls, H. (with ASHRAE (Firm)). (2021). *Duct systems design guide*. ASHRAE.
- Calcina Yucra, P. R., & Cjuno Yucra, R. C. (2024). *Eficacia de un extractor móvil para la reducción de la concentración de humos metálicos en el área operativa de soldadura por arco eléctrico (SMAW), en una empresa metalmeccánica, Arequipa 2024*. Universidad Tecnológica del Perú.
- Calvopiña Terán, C. D., & Tituaña Cárdenas, D. X. (2021). *Diseño e implementación de su sistema articulado de extracción localizada de humos de soldadura en la celda robotizada con brazo KUKA KR5-ARC del laboratorio de robótica industrial de la ESPE-L*. Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Cardona Perez, D. (2020). *Diseño de dos sistemas de extracción para humos y polvos en la empresa CRISTAR S.A.* Universidad Tecnológica de Pererira.
- Carolus, T. (2022). *Fans: Aerodynamic design - noise reduction - optimization*. Springer Vieweg.
- Chevalier, A. (2003). *Guide du dessinateur industriel* (Éd. 2003-2004). Hachette technique.
- Donaldson Company. (2024a). *Bolsas de tela* [Fotografía]. <https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/filters-parts/baghouse-filters/fabric/>
- Donaldson Company. (2024b). *Colector Porta-Trunk* [Fotografía]. <https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/equipment/fume-collectors/easy-trunk-porta-trunk/>
- Donaldson Company. (2024c). *Colectores Cyclone* [Fotografía]. <https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/equipment/dust-collectors/cyclone/>

- Donaldson Company. (2024d). *Colectores de humos: Extracción de humos de soldadura de alto rendimiento*. <https://www.donaldson.com/es-mx/industrial-dust-fume-mist/equipment/fume-collectors/>
- Donaldson Company. (2024e). *Filtros de cartuchos* [Fotografía]. <https://www.donaldson.com/es-es/industrial-dust-fume-mist/filters-parts/cartridge-filters/>
- D.S. N°003-2017-MINAM: Estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen disposiciones complementarias (2017). Normas Legales. Diario Oficial El Peruano.
- D.S. N°015-2005-SA: Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo (2005). Normas Legales. Diario Oficial El Peruano.
- D.S. N°023-2017-EM: Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería (2017). Normas Legales. Diario Oficial El Peruano.
- D.S. N°085-2003-PCM: Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental para ruido (2003). Normas Legales. Diario Oficial El Peruano.
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Editorial Reverté.
- Fiber Dowels. (2024). *Fibra de vidrio vs acero*. <https://fiberdowels.com/es/fibra-de-vidrio-vs-acero/>
- Galeana, N. (2015). Extracción de humos de soldadura—Una necesidad actual. *Columbia. e-Journal of Nondestructive Testing*, 20(10).

Gomafiltros. (2024). *Manguera de poliuretano para aspiración de abrasivos*.  
[https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex\\_purm\\_abrasiva](https://www.gomafiltros.com/productos/mangueras/rehau/rauspiraflex_purm_abrasiva)

Grupo WEG Unidad Motores. (2002). *Motores trifásicos cerrados IEC-60Hz-W21*.

HE Filtration Engineering S.L. (2024). *Cartuchos y mangas filtrantes*.  
<https://hefiltration.com/productos/cartuchos-y-mangas-filtrantes-repuestos/>

Hernández Riesco, G., Rosell Gonzáles, J. V., & Isidro Torres, S. (2016). *Introducción general a la tecnología del soldeo. Aspectos generales*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].

*HVAC duct construction standards: Metal and flexible* (4th ed). (2020). The Association.

Ibars Almonacil, J. R., & Compte Valls, R. (2016). *Aluminio y aleaciones de aluminio*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].

Iniciativas comerciales e industriales S.L. (2024). *Aleación de aluminio 1050*.  
<https://icei.es/wp-content/uploads/2015/06/ALEACION-1050.pdf>

Instituto Alemán de Normalización [DIN]. (1984). *DIN 17223-84: Round Steel Wire for Springs*. Instituto Alemán de Normalización (DIN).

Jenkins, N. T., Pierce, W. M., & Eagar, T. W. (2005). Particle Size Distribution of Gas Metal and Flux Cored Arc Welding Fumes. *Welding Journal*.

Lázaro Martín, Á. (2016). *Soldado por arco sumergido*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].

Ley N°28611: Ley general del ambiente (2005). Normas Legales. Diario Oficial El Peruano.

Ley N°28806: Ley General de Inspección del Trabajo, Art. 34 (2011). Normas Legales.  
Diario Oficial El Peruano.

Lincoln Electric. (2024). *Control de humos de soldadura: Un enfoque de sistemas totales para controlar los humos de soldadura*. <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/controlling-welding-fumes>

McMaster-Carr. (2024). *Empuñadura con ranura para dedos de alta temperatura*. <https://www.mcmaster.com/products/grips/hand-grips~/high-temperature-finger-groove-round-grips/>

Melo, J. L. (2010). *Ergonomía aplicada a las herramientas*. CPL Ediciones.

Norton, R. L. (with Ríos Sánchez, M. Á., Osornio Correa, C., & Acevedo Alvarado, M.). (2020). *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (6ª ed. adapt). McGraw-Hill Interamericana.

Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2017). *ISO 16890:2017: Filtros de aire para ventilación general*.

Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2020). *ISO 21904:2020: Health and safety in welding and allied processes – Equipment for capture and separation of welding fume*.

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Panchi Teran, D. P., & Tamami Caspi, F. R. (2024). *Diseño y simulación de un sistema de extracción de gases provenientes de las estaciones de trabajo del taller de*

*soldadura de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.*

Plasticbages Industrial S.L. (2024). *Características técnicas del PVC.*  
<http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>

Portolés García, A., López Palomo, I., & Rosell Gonzáles, J. V. (2016). *Soldeo oxigás y procesos relacionados.* Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].

Posada, C. (2019). *Metalmecánica es clave para el desarrollo. Cámara de Comercio de Lima.*

Proedissa. (2024). *Cabinas para soldadura CA-85* [Fotografía].  
<https://proedissa.com/accesorios-para-soldadura/cabina-para-soldadura-ca-85/>

Qquenta Condori, Z. J. (2022). *Evaluación del sistema de colector de polvos en la etapa de chancado para minerales cupríferos.* Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Quintero Hernández, J. D., & Fares Lozano, A. L. (2023). *Propuesta de diseño de un sistema de extracción de humos metálicos y gases para un taller de soldadura de una empresa camaronera en Guayaquil.* Universidad Politécnica Salesiana.

Ridwan, Mahendra Motilal, D., & Kiran Kumar, R. (2020). *Design, modelling and analysis of welding fume extractor.* Department of Mechanical Engineering Bearys. Institute of Technology Mangalore.

R.M. N°232-2020-VIVIENDA: EM.030: *Instalaciones de ventilación del reglamento nacional de edificaciones (2020).* Normas Legales. Diario oficial El Peruano.

- Rojas Alejandro, F. J. (2023). *Detección de emanación de gases CO y CO<sub>2</sub> en procesos SMAW, GMAW y GTAW mediante una campana de soldeo*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Romero Barboza, L. T. (2023). *Implementación de un sistema de aspiración de humos metálicos en la mesa de un pantógrafo CNC de corte por plasma para reducir la concentración de estos humos en la empresa Pitwork S.A.C en Arequipa 2023*. Universidad Tecnológica del Perú.
- Sánchez Calcina, D. W. (2024). *Influencia de un sistema de extracción para la reducción de la concentración de humos metálicos en las actividades de soldadura en el área de mantenimiento de una empresa en Moquegua 2023*. Universidad Tecnológica del Perú.
- Sanz Cubero, J., & Romero Camacho, R. (2016). *Soldado TIG*. Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión [CESOL].
- SKF. (2024). *6004 Rodamiento rígido de bolas*. <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6004>
- Soler & Palau. (2024a). *Diseño de los conductos de ventilación*. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/disenos-los-conductos-ventilacion/>
- Soler & Palau. (2024b). *Velocidad del aire*. <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>
- Sultanian, B. K., & Logan, E. (2019). *Logan's turbomachinery: Flowpath design and performance fundamentals* (Third edition). CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J., Spura, C., Roloff, H., & Matek, W. (2019). *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung* (24., überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26280-8>

## ANEXOS

ANEXO A. Matriz de Consistencia.....	1
ANEXO B. Límites de Exposición a Contaminantes.....	2

## ANEXO A. Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología
<p><b>Problema General:</b></p> <p>La falta de calidad del aire durante un proceso de soldadura requiere de una máquina de extracción de humos.</p> <p><b>Problemas Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo diseñar una máquina de extracción de humos que mejore la calidad del aire?</li> <li>• ¿Cómo mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura?</li> </ul>	<p><b>Objetivo General:</b></p> <p>Diseñar una máquina de extracción de humos para mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura.</p> <p><b>Objetivos Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseñar una máquina de extracción de humos.</li> <li>• Mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire durante un proceso de soldadura.</p> <p><b>Hipótesis Específicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El diseño de una máquina de extracción de humos disminuirá la contaminación del aire para el soldador durante un proceso de soldadura.</li> <li>• El diseño de una máquina de extracción de humos mejorará la calidad del aire ambiental.</li> </ul>	<p><b>Variable Independiente:</b></p> <p>Máquina de extracción de humos</p> <hr/> <p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Calidad del aire durante un proceso de soldadura</p>	<p>Velocidad de captura m/s</p> <hr/> <p>Caudal m<sup>3</sup>/s</p> <hr/> <p>Presión estática mmca</p> <hr/> <p>Rango de movimiento m</p> <hr/> <p>Superficie filtrante m<sup>2</sup></p> <hr/> <p>Consumo kW</p> <hr/> <p>Nivel de ruido dBA</p> <hr/> <p>Eficiencia energética %</p> <hr/> <p>Concentración de partículas en la zona de respiración del soldador mg/m<sup>3</sup></p> <hr/> <p>Concentración de partículas en el ambiente mg/m<sup>3</sup></p>	<p><b>Tipo:</b></p> <p>Investigación aplicada</p> <p><b>Nivel:</b></p> <p>Correlacional y Explicativo</p> <p><b>Diseño de la investigación:</b></p> <p>Experimental</p>

*Nota.* Título de la investigación: Diseño de una máquina de extracción de humos para mejorar la calidad del aire durante un proceso de soldadura. *Fuente.* Elaboración propia.

## ANEXO B. Límites de Exposición a Contaminantes

Agentes químicos en el aire	Límites de Exposición		
	TWA	STEL	Techo (C)
Acetona	500 ppm	750 ppm	
Ácido Acético	10 ppm	15 ppm	
Ácido Clorhídrico			2 ppm
Ácido Nítrico	2 ppm	4 ppm	
Acido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	10 ppm	15 ppm	
Amoníaco Anhidro	25 ppm	35 ppm	
Anhídrido Sulfuroso (SO <sub>2</sub> )	2 ppm	5 ppm	
Antimonio	0.5 mg/m <sup>3</sup>		
Arseniato de Plomo	0.15 mg/m <sup>3</sup>		
Arseniato de Calcio	1 mg/m <sup>3</sup>		
Arsénico (can)	0.01 mg/m <sup>3</sup> A1		
Benceno (can)	0.5 ppm (p)		
Cianuro (Como CN)			5 mg/m <sup>3</sup> (p)
Cianuro de Hidrogeno (HCN)			4.7 ppm(p)
Cloro	0.5 ppm	1 ppm	
Clorobenceno	10 ppm	20 ppm	
Cloroformo	10 ppm		
Cobre (humo)	0.2 mg/m <sup>3</sup>		
Cobre (polvo/neblina)	1 mg/m <sup>3</sup>		
Dióxido de Carbono	5000 ppm	30000 ppm	
Dióxido de Nitrógeno	3 ppm	5 ppm	
Éter Etílico	400 ppm	500 ppm	
Fluoruro de Hidrogeno (HF)			2.5 mg/m <sup>3</sup>
Formaldehído			0.3 ppm
Fosgeno	0.1 ppm		
Gasolina	500 ppm		
Hidrógeno (H)			5000 ppm
Humo de Cadmio (can)	0.01 mg/m <sup>3</sup>		
Humo de Óxido Férrico	5 mg/m <sup>3</sup>		
Manganeso	0.2 mg/m <sup>3</sup>		
Mercurio	0.025 mg/m <sup>3</sup> (p)		

Metano (CH4)			5000 ppm
Monóxido de Carbono (CO)	25 ppm		
Mónóxido de Nitrogeno	25 ppm		
Nebolina de ácido sulfúrico	1 mg/m3	3 mg/m3	
Oxígeno (O2)	19.5 %		22.5 %
Ozono Trabajo Pesado	0.05 ppm		
Ozono Trabajo Moderado	0.08 ppm		
Ozono Trabajo Ligero	0.1 ppm		
Ozono Trabajo Cualquiera (≤ 2 horas)	0.2 ppm		
Plomo	0.05 mg/m3		
Polvo de Carbón - Antracita	0.4 mg/m3		
Polvo de Carbón - Bituminoso	0.9 mg/m3		
Polvo inhalable (1)	10 mg/m3		
Polvo respirable (1)	3 mg/m3		
Selenio	0.2 mg/m3		
Sílice Cristalino Respirable (Cristobalita)	0.05 mg/m3		
Sílice Cristalino Respirable (Cuarzo)	0.05 mg/m3		
Sílice Cristalino Respirable (Tridimita)	0.05 mg/m3		
Sílice Cristalino Respirable (Tripoli)	0.1 mg/m3		
Talio, Compuestos solubles de	0.1 mg/m3(p)		
Telurio	0.1 mg/m3		
Tetracloruro de Carbono	5 ppm(p)	10 ppm(p)	
Tolueno	50 ppm(p)		
Uranio, Compuesto solubles e insolubles	0.2 mg/m3	0.6 mg/m3	
Vanadio, Polvos de V2O5	0.5 mg/m3		
Vanadio, Humos metálicos de V2O5	0.1 mg/m3		
Zinc (humo)	2 mg/m3	10 mg/m3	

*Nota.* (p): Absorción dérmica. (can): Compuesto cancerígeno. (1): material particulado inhalable que no contiene amianto y con menos del 1% de sílice cristalina. *Fuente.* D.S. N°023-2017-EM: Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.