



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

**VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE  
COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO  
ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR:**

**ALEX EDUARDO MACAS RIVERA**

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA**

**VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE  
COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO  
ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: ALEX EDUARDO MACAS RIVERA**

**DIRECTOR: Ing. JUAN PABLO CHUQUIN VASCO**

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Alex Eduardo Macas Rivera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Alex Eduardo Macas Rivera, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de septiembre de 2021

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alex Eduardo Macas Rivera', written over a horizontal line.

**Alex Eduardo Macas Rivera**  
**060486392-8**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA INGENIERIA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Propuesta Tecnológica. **VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO**, realizado por el señor: **ALEX EDUARDO MACAS RIVERA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-16
Ing. Juan Pablo Chuquín Vasco <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	_____	2021-09-16
Ing. Edwin Rodolfo Pozo Safla <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-16

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mi padre Luis Gerardo Macas y a mi madre Mariana Rivera, por ser la guía en este mundo y por cada día darme la fuerza necesaria para seguir adelante y no desmayar pese a las dificultades. De forma especial, se la dedico a mi hija Cristel que durante los tiempos difíciles que el mundo está cursando, ella ha sido mi rayo de esperanza y fe que ha traído alegría a mi ser.

En memoria de Armando Ruperto Fajardo Landívar, gracias por haber sido un gran amigo y un ejemplo de hombre a seguir. Descanse en paz.

Alex.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios en primer lugar por haberme dado la salud y sabiduría para culminar esta gran etapa en mi vida profesional, también agradezco a mis padres, quienes fueron mi fuerza y apoyo en el camino del saber. A mis amigos, por todos los buenos e irrepetibles momentos que crearon lasos afectivos que perduraran toda la vida.

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, que a través de sus educadores compartieron su sabiduría para mi formación académica, en especial a mi tutor el Ing. Juan Pablo Chuquín Vasco por su gran paciencia y responsabilidad para la realización de este trabajo de titulación.

Alex.

## TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE DE GRÁFICOS.....	XV
RESUMEN.....	XVII
SUMMARY .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes históricos de la empresa.....	2
1.2. Elaboración de calzado.....	3
1.3. Procesos de fabricación de calzado, donde interviene el aire comprimido.....	4
1.4. Formulación del problema .....	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. <i>Objetivo general.</i> .....	6
1.5.2. <i>Objetivos específicos.</i> .....	6
1.6. Justificación.....	6
1.7. Alcance.....	7
<b>CAPITULO II</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
2.1. Generación de aire comprimido.....	8
2.2. Ecuación general para el estado gaseoso.....	8
2.3. Requerimientos de una red de aire comprimido.....	9
2.3.1. <i>Elementos Básicos.</i> .....	9
2.3.2. <i>Caudal.</i> .....	10
2.4. Distribución del aire comprimido.....	11
2.4.1. <i>Tubería vertical o primaria.</i> .....	11
2.4.2. <i>Líneas de distribución.</i> .....	11
2.4.3. <i>Tuberías de Servicio.</i> .....	11
2.5. Depósitos de aire.....	12
2.6. Disposición de redes neumáticas.....	13
2.6.1. <i>Disposición cerrada o de anillo.</i> .....	13



2.6.2.	<i>Disposición abierta</i> .....	14
2.6.3.	<i>Disposición mixta</i> .....	15
2.7.	<b>Elementos que contiene el aire</b> .....	15
2.8.	<b>Humedad del aire</b> .....	16
2.8.1.	<i>Humedad relativa del aire</i> .....	17
2.8.2.	<i>Humedad específica del aire</i> .....	17
2.8.3.	<i>Fracción Molar</i> .....	18
2.9.	<b>Cálculo del condensado</b> .....	18
2.10.	<b>Punto de rocío</b> .....	19
2.11.	<b>Técnicas de eliminación de humedad</b> .....	20
2.11.1.	<i>Refrigeración más Separación</i> .....	20
2.11.2.	<i>Enfriamiento por secador</i> .....	20
2.11.3.	<i>Sobrecompresión</i> .....	20
2.11.4.	<i>A través de secadores de Membranas</i> .....	21
2.11.5.	<i>Absorción y adsorción</i> .....	21
2.12.	<b>Microorganismos presentes en el aire comprimido</b> .....	21
2.13.	<b>El aceite en el aire comprimido</b> .....	22
2.14.	<b>Filtración de aire comprimido</b> .....	22
2.15.	<b>Factores de consideración en el caudal</b> .....	24
2.16.	<b>Cálculo termodinámico de la potencia real de un compresor</b> .....	25
2.17.	<b>Cálculo del calor de salida en el post enfriador</b> .....	26
2.18.	<b>Pérdidas de presión en el sistema de distribución de aire comprimido</b> .....	27
2.19.	<b>Cálculo del diámetro de tubería</b> .....	28
2.20.	<b>Diámetros, accesorios y válvulas recomendados</b> .....	29
2.21.	<b>Velocidades de flujo recomendadas</b> .....	30
2.22.	<b>Cálculo de la pérdida de presión en tuberías</b> .....	31
2.23.	<b>Estudio de Normas para diseño de aire comprimido</b> .....	32
2.23.1.	<i>ISO 8573</i> .....	33
2.23.2.	<i>ISO 3857-1:1977</i> .....	35
2.23.3.	<i>ISO 3857-2:1977</i> .....	35
2.23.4.	<i>Normas en general</i> .....	36
2.23.4.1.	<i>Con respecto a seguridad en máquinas</i> .....	36
2.23.4.2.	<i>Con respeto a seguridad en equipos a presión</i> .....	36
2.23.4.3.	<i>Con respecto al Medioambiente</i> .....	36
2.23.4.4.	<i>Con respecto a las pruebas y especificaciones</i> .....	37
2.23.4.5.	<i>Manual de aire comprimido Atlas Copco</i> .....	37
2.24.	<b>Simulador DWSIM</b> .....	37

<b>2.25.</b>	<b>Ley de Raoult, paquete de propiedades.</b>	<b>38</b>
<b>2.26.</b>	<b>Operaciones unitarias de interés en DWSIM.</b>	<b>39</b>
<b>2.26.1.</b>	<b>Compresor</b>	<b>39</b>
2.26.1.1.	Parámetros de entrada.....	39
2.26.1.2.	Método de cálculo.....	40
<b>2.26.2.</b>	<b>Enfriador (Cooler).</b>	<b>40</b>
2.26.2.1.	Parámetros de entrada.....	40
2.26.2.2.	Método de cálculo.....	41
2.26.2.3.	Parámetros de salida.....	41
<b>2.26.3.</b>	<b>Separador de componentes.</b>	<b>41</b>
2.26.3.1.	Parámetros de entrada.....	41
2.26.3.2.	Resultados.....	41
<b>2.26.4.</b>	<b>Segmento de tubería.</b>	<b>42</b>
2.26.4.1.	Parámetros de entrada.....	42
2.26.4.2.	Método de cálculo.....	42
2.26.4.3.	Parámetros de salida.....	43
<b>2.26.5.</b>	<b>Válvula.</b>	<b>43</b>
2.26.5.1.	Parámetros de entrada.....	43
2.26.5.2.	Método de cálculo.....	43
2.26.5.3.	Parámetros de salida.....	43
<b>2.26.6.</b>	<b>Divisor.</b>	<b>44</b>
2.26.6.1.	Parámetros de entrada.....	44
2.26.6.2.	Parámetros de salida.....	44

### **CAPITULO III**

<b>3.</b>	<b>DIAGNOSTICO SITUACIONAL DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN LA FÁBRICA Y DISEÑO DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO</b>	<b>45</b>
<b>3.1.</b>	<b>Estado actual de la red de aire comprimido</b>	<b>45</b>
3.1.1.	Área del compresor.....	46
3.1.2.	Presión de trabajo.....	46
3.1.3.	Caída de presión admisible.....	46
3.1.4.	Fugas en el sistema de aire comprimido actual.....	47
3.1.5.	Distribución de la planta.....	47
3.1.6.	Levantamiento isométrico de la red de aire comprimido actual.....	48
3.1.7.	Condensado.....	51
3.1.8.	Secador de aire.....	51
3.1.9.	Acumulador.....	52

<b>3.2.</b>	<b>Necesidades y requerimientos de consumidores de aire comprimido en la planta.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Identificación de usuarios.....</b>	<b>53</b>
3.2.1.1.	<i>Prensa IRONFOX AS 1800: .....</i>	53
3.2.1.2.	<i>Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025.....</i>	54
3.2.1.3.	<i>Rayadora de contorno de suelas.....</i>	54
3.2.1.4.	<i>Máquina para aplicar topes termoadheribles.....</i>	55
3.2.1.5.	<i>Moldeadora de talones marca NORBA N89CF.....</i>	56
3.2.1.6.	<i>Planchadora de cañas de bota.....</i>	57
3.2.1.7.	<i>Máquina de empiolar ADLER.....</i>	58
3.2.1.8.	<i>Repujadora.....</i>	59
3.2.1.9.	<i>Máquina de rayar costura y colocar cinta.....</i>	59
3.2.1.10.	<i>Horno reactivador.....</i>	60
3.2.1.11.	<i>Pulidor esmeril neumático.....</i>	61
3.2.1.12.	<i>Pistolas sopladoras de aire.....</i>	61
<b>3.2.2.</b>	<b>Ubicación de los consumidores de aire.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Necesidades particulares de máquinas y herramientas.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>Consumos de equipos y herramientas neumáticas.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.</b>	<b>Diseño de la red de aire comprimido.....</b>	<b>66</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Condiciones ambientales de la localidad.....</b>	<b>66</b>
3.3.1.1.	<i>Temperatura ambiente.....</i>	66
3.3.1.2.	<i>Presión ambiental.....</i>	66
3.3.1.3.	<i>Humedad Relativa.....</i>	66
3.3.1.4.	<i>Porcentajes de vapor de agua y aire seco.....</i>	66
3.3.1.5.	<i>Determinación del caudal necesario.....</i>	67
<b>3.3.2.</b>	<b>Calidad del aire comprimido.....</b>	<b>68</b>
3.3.2.1.	<i>Determinación de la calidad de aire bajo ISO 8573-1:2010.....</i>	68
<b>3.3.3.</b>	<b>Simulación en el Software DWSIM.....</b>	<b>68</b>
3.3.3.1.	<i>Definición del sistema.....</i>	68
3.3.3.2.	<i>Formulación del modelo.....</i>	69
<b>3.4.</b>	<b>Implementación del modelo.....</b>	<b>71</b>
<b>3.4.1.</b>	<b>Modelado en DWSIM simulator.....</b>	<b>71</b>
<b>3.4.2.</b>	<b>Configuración del estado inicial 01.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4.3.</b>	<b>Configuración del compresor en la simulación.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4.4.</b>	<b>Configuración del post enfriador en la simulación.....</b>	<b>75</b>
<b>3.4.5.</b>	<b>Configuración del separador de componentes en la simulación.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4.6.</b>	<b>Configuración de los segmentos de tubería en la simulación.....</b>	<b>77</b>

3.4.7.	<i>Configuración de los divisores de corriente en la simulación.....</i>	81
3.4.8.	<i>Configuración de las tuberías de servicio .....</i>	84
3.4.9.	<i>Configuración de las válvulas reguladoras de presión.....</i>	84
3.4.10.	<i>Puesta en marcha la simulación en DWSIM.....</i>	85
3.5.	<b>Elaboración de hojas de cálculos para el diseño de la red de aire comprimido.</b>	86
3.6.	<b>Selección de válvulas, accesorios y equipos.....</b>	88
3.6.1.	<i>Selección de accesorios y válvulas.....</i>	88
3.6.2.	<i>Selección del compresor.....</i>	89
3.6.3.	<i>Selección del secador .....</i>	90
3.6.4.	<i>Selección de filtro.....</i>	92
3.7.	<b>Costos de implementación. ....</b>	93
3.7.1.	<i>Costos directos.....</i>	93
3.7.2.	<i>Costos indirectos.....</i>	95
3.7.3.	<i>Costos totales .....</i>	95

#### **CAPITULO IV**

4.	<b>VALIDACIÓN.DEL CÁLCULO REALIZADO .....</b>	96
4.1.	<b>Presentación de resultados por el simulador DWSIM.....</b>	96
4.1.1.	<i>Variables significativas en redes de aire comprimido.....</i>	96
4.1.2.	<i>Potencia real del compresor y calor de salida en el post enfriador.....</i>	96
4.1.3.	<i>Velocidades reales en las tuberías. ....</i>	97
4.1.4.	<i>Pérdidas de carga .....</i>	99
4.1.5.	<i>Presiones de salida. ....</i>	100
4.1.6.	<i>Caudales reales y presiones de funcionamiento de los usuarios.....</i>	101
4.2.	<b>Comparación de resultados.....</b>	102
4.2.1.	<i>Variables significativas. ....</i>	102
4.2.2.	<i>Caudales de los usuarios.....</i>	103
4.2.3.	<i>Velocidades de flujo y análisis de presiones.....</i>	104
4.3.	<b>Diagrama de tuberías e instrumentos (P&amp;ID) del diseño planteado.....</b>	107
4.4.	<b>Interpretación de resultados .....</b>	107

<b>CONCLUSIONES.....</b>	109
--------------------------	-----

<b>REOMENDACIONES.....</b>	111
----------------------------	-----

**GLOSARIO.**

**BIBLIOGRAFIA.**

**ANEXOS.**

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Elementos presentes en el aire.....	16
<b>Tabla 2-2:</b>	Resumen de la calidad de aire según la norma ISO 8573-1:2010 .....	22
<b>Tabla 3-2:</b>	Filtros sugeridos para cada calidad de aire según la norma ISO 8573-1:2010.....	24
<b>Tabla 4-2:</b>	Factores de simultaneidad. ....	25
<b>Tabla 5-2:</b>	Pérdidas de presión admisibles en el sistema de distribución. ....	27
<b>Tabla 6-2:</b>	Diámetros y accesorios recomendados bajo la especificación “H” ANSI 150#...	29
<b>Tabla 7-2:</b>	Caudales recomendados para tuberías de bloqueo rápido. ....	30
<b>Tabla 8-2:</b>	Tipo de válvulas de bola recomendadas según la especificación “H” ANSI 150#. .....	30
<b>Tabla 1-3:</b>	Clasificación de Fluidos según la norma NTE INEN 440:1984.....	45
<b>Tabla 2-3:</b>	Consumos de Equipos y herramientas neumáticas en la fábrica. ....	65
<b>Tabla 3-3:</b>	Características principales de las tuberías a considerar en la simulación.....	77
<b>Tabla 4-3:</b>	Diámetros calculados y seleccionados para la simulación. ....	79
<b>Tabla 5-3:</b>	Relaciones de división de flujos a ingresar en los divisores de corriente.....	83
<b>Tabla 6-3:</b>	Datos obligatorios del diseño de la red, en la hoja de cálculo. ....	87
<b>Tabla 7-3:</b>	Criterios de selección para el secador.....	91
<b>Tabla 6-4:</b>	Costos de tuberías y accesorios. ....	94
<b>Tabla 7-4:</b>	Costos de mano de obra.....	95
<b>Tabla 8-3:</b>	Costos totales.....	95
<b>Tabla 1-4:</b>	Errores relativos en las variables significativas de las redes de aire comprimido. .....	103
<b>Tabla 2-4:</b>	Errores relativos en los caudales obtenidos del simulador DWSIM. ....	104
<b>Tabla 3-4:</b>	Errores relativos de las velocidades reales de flujo. ....	105
<b>Tabla 4-4:</b>	Errores relativos de las presiones a la salida de las tuberías de servicio en cada usuario.....	106

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b>	Localización de OFAHER Factory.....	2
<b>Figura 2-1:</b>	Proceso industrial de la fábrica OFAHER para producir calzado.....	4
<b>Figura 1-2:</b>	Elementos básicos para generación de aire comprimido. ....	10
<b>Figura 2-2:</b>	Disposición cerrada de una red de aire comprimido.....	14
<b>Figura 3-2:</b>	Disposición abierta de una red de aire comprimido.....	15
<b>Figura 4-2:</b>	Disposición mixta de una red de aire comprimido.....	15
<b>Figura 5-2:</b>	Longitudes equivalentes de accesorios de tuberías.....	28
<b>Figura 6-2:</b>	Objetivos de las normas ISO sobre calidad de aire.....	33
<b>Figura 7-2:</b>	Objetivos del grupo de normas ISO8573.....	34
<b>Figura 1-3:</b>	Datos principales del compresor BALMA NS59S/500 T 7.5.....	46
<b>Figura 2-3:</b>	Distribución de la fábrica OFAHER.....	47
<b>Figura 3-3:</b>	Tubería vertical de diámetro 1 ¼” .....	48
<b>Figura 4-3:</b>	Tuberías de distribución en 1 ¼” de diámetro. ....	49
<b>Figura 5-3:</b>	Tubería de distribución con diámetro de ½”, con dirección a la siguiente zona	49
<b>Figura 6-3:</b>	Tubería de servicio de diámetro de ½”. ....	50
<b>Figura 7-3:</b>	Esquema Isométrico de la actual red de aire comprimido en la fábrica OFAHER. .....	51
<b>Figura 8-3:</b>	Secador de aire comprimido de la fábrica, sin instalación.....	52
<b>Figura 9-3:</b>	Placa informativa del secador. ....	52
<b>Figura 10-3:</b>	Prensa IRONFOX AS 1800.....	53
<b>Figura 11-3:</b>	Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025.....	54
<b>Figura 12-3:</b>	Rayadora de contorno de suelas.....	55
<b>Figura 13-3:</b>	Máquina para aplicar topes termoadheribles, modelo V.....	56
<b>Figura 14-3:</b>	Moldeadora de talones marca NORBA N89CF.....	57
<b>Figura 15-3:</b>	Planchadora de cañas de bota marca DISA .....	58
<b>Figura 16-3:</b>	Máquina de empiolar ADLER y su válvula de control marca “az 321 MT 1/8” .....	58
<b>Figura 17-3:</b>	Máquina repujadora. ....	59
<b>Figura 18-3:</b>	Máquina de rayar costura y colocar cinta marca FRA-COR .....	60
<b>Figura 19-3:</b>	Horno Reactivador.....	60
<b>Figura 20-3:</b>	Pulidor esmeril neumático. ....	61
<b>Figura 21-3:</b>	Pistolas sopladoras de aire para pintura. ....	61
<b>Figura 22-3:</b>	Ubicación de los consumidores de aire en la fábrica OFAHER. ....	62

<b>Figura 23-3:</b>	Distribución entrelazada de aire comprimido en la fábrica. ....	69
<b>Figura 24-3:</b>	Longitudes en mm para la distribución entrelazada de aire comprimido. ....	70
<b>Figura 25-3:</b>	Procesos de la central generadora de aire comprimido. ....	71
<b>Figura 26-3:</b>	Información de la versión del simulador DWSIM empleado. ....	72
<b>Figura 27-3:</b>	Corrientes de materia, energía y operaciones unitarias usadas en la simulación (1era Parte). ....	72
<b>Figura 28-4:</b>	Corrientes de materia, energía y operaciones unitarias usadas en la simulación (2da Parte). ....	73
<b>Figura 29-3:</b>	Ingreso de temperatura y presión con fracciones molares en la corriente de materia 01. ....	74
<b>Figura 30-3:</b>	Ingreso de presión absoluta a la salida del compresor, con su rendimiento. ....	75
<b>Figura 31-3:</b>	Ingreso de temperatura de salida del POST ENFRIADOR con su rendimiento. ....	76
<b>Figura 32-3:</b>	Datos de configuración del separador de componentes por defecto. ....	77
<b>Figura 33-3:</b>	Configuración de datos en la tubería VERTICAL. ....	80
<b>Figura 34-3:</b>	Configuración de datos en la tubería DE DISTRIBUCIÓN. ....	80
<b>Figura 35-3:</b>	Ingreso de datos en el divisor de corriente I. ....	83
<b>Figura 36-3:</b>	Ingreso de datos para el segmento de tubería DE SERVICIO 01 y 03. ....	84
<b>Figura 37-3:</b>	Ingreso de datos para la válvula VALV-01. ....	85
<b>Figura 38-3:</b>	Presentación de resultados por el simulador DWSIM. ....	86
<b>Figura 39-3:</b>	Captura de hoja de cálculo realizada para redes de aire comprimido (ANEXO A) .....	88
<b>Figura 40-3:</b>	Datos técnicos del secador existente. ....	90
<b>Figura 41-3:</b>	Filtro DD 65 existente en bodega de la fábrica. ....	92
<b>Figura 42-3:</b>	Datos técnicos de filtros DD/PD marca Atlas Copco. ....	92
<b>Figura 1-4:</b>	Captura de resultados sobre las principales propiedades de los estados iniciales en la simulación. ....	96
<b>Figura 2-4:</b>	Captura de resultados del simulador DWSIM para el estado A y B. ....	97
<b>Figura 3-4:</b>	Captura de las tablas de velocidades de fluido en las tuberías vertical y de distribución. ....	97
<b>Figura 4-4:</b>	Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 01-04. .....	98
<b>Figura 5-4:</b>	Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 05-08. .....	98
<b>Figura 6-4:</b>	Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 09-12. .....	99
<b>Figura 7-4:</b>	Captura de pérdidas de carga en tuberías. ....	100
<b>Figura 8-4:</b>	Captura de presiones de salida a las tuberías de servicio. ....	100

<b>Figura 9-4:</b>	Captura de las propiedades de los usuarios antes de la válvula reguladora de presión.....	101
<b>Figura 10-4:</b>	Captura de las propiedades de los usuarios.....	102



## INDICE DE GRÁFICOS

- Gráfico 1-3:** Diagrama sobre la división de caudales en [m<sup>3</sup>/s]..... 81
- Gráfico 2-3:** Diagrama sobre las proporciones de caudales a ingresarse en la simulación..... 82

## **INDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Hojas de cálculo para el diseño de redes de aire comprimido.

**ANEXO B:** Plano P&ID de la nueva red de aire comprimido.

**ANEXO C:** Planos dimensionales de la nueva red de aire comprimido

**ANEXO D:** Diagrama de flujo simulado en DWSIM

**ANEXO E:** Proforma de compra para tuberías y accesorios.

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo por objeto validar el cálculo de una red de aire comprimido, localizada en Guano, provincia de Chimborazo, a través del software DWSIM y hojas de cálculo, por medio de los parámetros de consumo para cada equipo y pérdidas de presión recomendadas en las tuberías. Para lo cual, se estudió las características de la red existente y posteriormente se realizó el diseño de la nueva red bajo el manual ATLAS COPCO y la calidad de aire seleccionado con la norma ISO 8573-1:2010. En el proceso de la central generadora de aire comprimido simulado se incluyó un compresor, post enfriador, un separador, la red de distribución, la unidad de acondicionamiento neumática y la utilización. La simulación se realizó bajo el modelo termodinámico “Ley de Raoult” y estuvo regido bajo las condiciones de estado estacionario, procesos adiabáticos, equilibrio mecánico y pérdidas de presión insignificantes en elementos. Hallando el flujo másico de aire húmedo (0,03323 kg/s), el trabajo real del compresor (14,6636 KW) y el calor de salida en el post enfriador (14,4701 KW). Además, se seleccionó diámetros de 3” SCH-80 para las tuberías principal y de distribución, ¾” SCH-160 y 1” SCH-80 para las tuberías de servicio. Los errores relativos entre el simulador y el cálculo manual fueron menores al 5% en variables significativas, para los caudales reales hubo menores al 3%, en velocidades reales del fluido existieron menores del 2 % y para presiones en cada usuario hubo menores al 1%, interpretando al simulador DWSIM como apto para la simulación de redes de aire comprimido. Es recomendable usar el modelo termodinámico adecuado y no comparar las entalpías del simulador con las del cálculo manual, ya que tienen distinto procesamiento de datos.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA> <RED DE AIRE COMPRIMIDO> <SIMULACIÓN> <DWSIM (SOFTWARE)> <GUANO (CANTÓN)>.

## SUMMARY

The purpose of this research work was to validate the calculation of a compressed air network, located in Guano, Chimborazo province, through the DWSIM software and spreadsheets, by means of the consumption parameters for each equipment and pressure losses recommended in the pipes. For which, the characteristics of the existing network were studied and later the design of the new network was carried out under the ATLAS COPCO manual and the air quality selected with the ISO 8573-1: 2010 Standard. The simulated compressed air generating plant process included a compressor, aftercooler, a separator, the distribution network, the pneumatic conditioning unit, and the utilization. The simulation was carried out under the thermodynamic model "Raoult's Law" and was governed under the conditions of steady state, adiabatic processes, mechanical equilibrium, and insignificant pressure losses in elements. Finding the mass flow of humid air (0.03323 kg / s), the real work of the compressor (14.6636 KW) and the exit heat in the aftercooler (14.4701 KW). In addition, diameters of 3" SCH-80 were selected for the main and distribution pipes, 3/4" SCH-160 and 1" SCH-80 for the service pipes. The relative errors between the simulator and the manual calculation were less than 5% in significant variables, for real flows there were less than 3%, in real fluid velocities there were less than 2% and for pressures in each user there were less than 1%, interpreting the DWSIM simulator as suitable for simulating compressed air networks. It is advisable to use the appropriate thermodynamic model and not to compare the enthalpies of the simulator with those of the manual calculation, since they have different data processing.

Keywords:

**Keywords:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES> <AIR NETWORK COMPRESSED> <SIMULATION> <DWSIM (SOFTWARE)> <GUANO (CANTON)>.

## INTRODUCCIÓN

Las redes de aire comprimido es una de las formas de energía más utilizadas y antiguas que tiene el hombre para la fabricación, en la actualidad adquiere cada vez más importancia en los procesos industriales por lo cual, las fábricas de calzado las emplean. Por otro lado, los simuladores son herramientas excelentes para recrear situaciones reales o que se aproximen a la realidad en la validación de una fase o proceso técnico.

Hoy en día los simuladores son multidisciplinarios, precisos y con tiempos de convergencia cada vez más cortos, por lo cual las empresas los utilizan para toma de decisiones de suma importancia. Entre los simuladores de procesos industriales se destaca DWSIM por ser de código abierto, confiable y de libre descarga.

El presente proyecto tiene como propósito mejorar la distribución de aire comprimido en la empresa de calzado OFÁHER mediante la recopilación de información sobre las necesidades actuales en la fábrica y el rediseño de la red existente, empleando la simulación en el software DWSIM y hojas de cálculo.

OFAHER Factory se ubica en la provincia de Chimborazo, cantón Guano, cuenta con un diseño improvisado de red de aire comprimido desde el año 2015, su temperatura local varía entre 6,2 [°C] hasta 16,4[°C]. La altitud del Cantón Guano es de 2280 m.s.n.m. con una humedad relativa del 72%.

Es evidente que al garantizar que las pérdidas de presión se encuentren entre los límites sugeridos por los profesionales en el tema de la industria del aire comprimido, además de que se cumplan otras recomendaciones como el diámetro interno mínimo de tubería, velocidad máxima de fluido comprimido y el uso del material idóneo en las tuberías y accesorios, la distribución de aire comprimido tendrá mejoras, frente a un diseño de red improvisado.

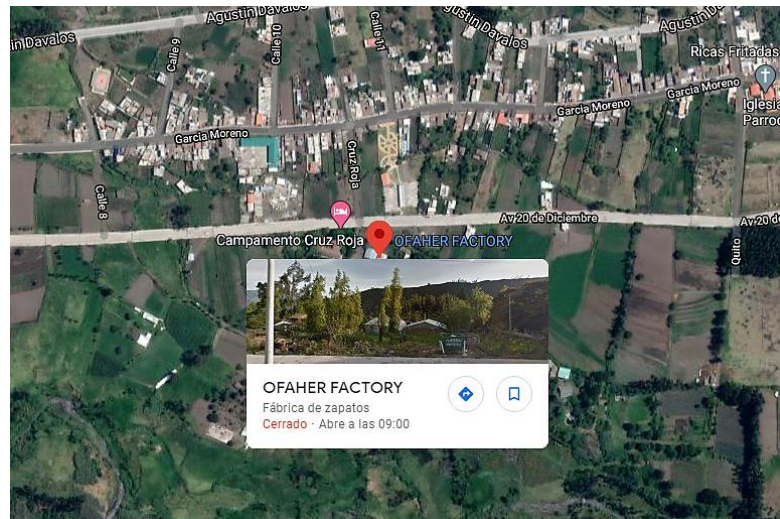
La convicción del simulador DWSIM se evidencia al obtener errores relativos tolerables, procedentes de la comparación de los resultados del simulador con los del cálculo manual, evaluando los parámetros de consumo para cada equipo y las pérdidas de presión respectivamente.

## CAPITULO I

### 1. MARCO REFERENCIAL.

#### 1.1. Antecedentes históricos de la empresa.

Las fábricas de zapatos del Ecuador ya sean, artesanales e industriales trabajan por todas las regiones del país y cuentan con opciones destacadas para sobresalir en el mercado internacional. Además, el flujo de capital, la tecnología empleada, los mercados secundarios procedentes de estas, y los grandes volúmenes de mano de obra fortalecen el mercado interno y apoyan así a la economía nacional. OFAHER Factory se ubica en la provincia de Chimborazo, cantón Guano, barrio Santa Teresita, avenida 20 de diciembre, frente al campamento Cruz Roja. Cabe mencionar que Guano con una cultura basada en su pueblo artesano está lleno de talleres y zapaterías, por lo cual se considera la capital artesanal.



**Figura 1-1:** Localización de OFAHER Factory.

**Realizado por:** Macas Rivera Alex, 2020

OFAHER Factory, es una empresa fundada por un gran emprendedor migrante, el señor Armando Ruperto Fajardo Landívar quien, debido a la gran crisis económica del país conocida por todos los ecuatorianos en el año 1999, migró hacia España y aprendió de la industria del calzado durante 10 años, luego regreso a su país, trayendo consigo maquinaria extranjera principalmente europea dedicada a la fabricación de calzado.

La empresa OFÁHER tiene por objeto el fabricar calzado, cinturones y correas para hombre, mujer y niños en grandes cantidades que satisfaga las necesidades de los clientes y la sociedad en general.

## **1.2. Elaboración de calzado.**

La elaboración de calzado se realiza de manera artesanal desde el comienzo de la humanidad, produciendo únicamente un par de zapatos o a baja escala, en el sector del cantón Guano aún existen fabricantes de calzado de manera artesanal. La revolución industrial trajo consigo la producción masiva del calzado, pero los pasos y procedimientos a seguir para su producción no han cambiado en su esencia.

Inicialmente se diseña el calzado, dándole sus características estéticas que sobresalgan de los demás diseños, realizando los patrones para su fabricación, ya sea en papel, cartón u otro material ligero. Se continúa con el patronaje, lo cual es escalar los diseños terminados a tallas más grandes y pequeñas en forma sucesiva.

Obteniendo los patrones de diseño, las características estéticas, ya sea color forma y detalle de la piel a utilizar, se procede a conseguir las materias primas, en donde la calidad del calzado depende en gran medida de encontrar el cuero o piel curtida idónea para el trabajo. También, se adquieren los pegamentos líquidos para su unión, hilos, pigmentos o pinturas, ojalillos, cordones, zuelas, plantas, y demás materiales que intervengan en la producción de calzado.

A continuación, se realizan cortes siguiendo con los patrones ya diseñados sobre el cuero y en materiales sintéticos si se trata del forro, para obtener las piezas que van a conformar el calzado. Luego, se prepara los cortes para su unión, ya sea reduciendo su espesor, realizando tajos de adornos y los pliegues necesarios.

Teniendo los cortes preparados se procede a su unión con hilo, dependiendo de la calidad del calzado se utilizan diferentes gamas, colores y grosores de hilos, este proceso de unión culmina cuando se junta la parte externa con su forro o interior, quedando solamente por acoplarlo a su planta y se denomina aparado.

Posteriormente, el corte ya terminado se coloca en hormas del modelo al tamaño del pie solicitado, se recubre de pegamento su base junto a su planta, se ingresa al horno reactivador de adhesivo y se une las dos partes a través de una prensa neumática, en seguida pasan por el túnel de frío para terminar la unión del calzado y retirar la horma; por último, se dan los respectivos acabados. Concluyendo con un calzado estéticamente agradable, confiable y de calidad.

El siguiente esquema representa los pasos a seguir para la producción de calzado en la fábrica OFAHER (Ver Figura 2-1).



**Figura 2-1:** Proceso industrial de la fábrica OFAHER para producir calzado.

Realizado por: Macas Alex, 2021

### 1.3. Procesos de fabricación de calzado, donde interviene el aire comprimido.

Los procesos para la fabricación de calzado se pueden realizar en forma artesanal, pero al intervenir la ayuda de máquinas, herramientas e instrumentos sofisticados ya se convierte en industria de calzado, en la cual actúan diferentes tipos de energía, siendo una principal de ellas el aire comprimido.

En el comienzo de la fabricación del calzado encontramos el diseño y patronaje, lo cual ya se puede hacer bajo varios softwares especializados en esa rama. Se procede con el corte de los patrones, en donde ya interviene la maquinaria y es utilizado el corte por troquel, cuyas prensas están alimentados de energía eléctrica y aire comprimido. Además, el armado se puede realizar bajo máquinas de coser sofisticadas que poseen alimentación de aire comprimido para realizar una costura más penetrante, nítida y de mejor calidad, adicional a esto existen máquinas como las repujadoras de cuero, que son empleadas para estampar figuras o logotipos en alto relieve, que a la par su accionar es a base de aire comprimido. Denotando que la neumática está presente en el proceso de respunte o armado de calzado.

Para el proceso de montaje, según sea el tipo de calzado a fabricar se usa las conocidas máquinas moldeadoras de talones, planchadoras para cañas de botas y los aplicadores de punteras y taloneras termo adheribles, que tienen accionamiento neumático. En la unión de la planta, se utiliza grapadoras neumáticas, rayadoras de contorno de suelas y prensas, las cuales requieren de aire comprimido para su funcionamiento. Además, existen hornos conformadores y túneles de frío que son intermediarios



entre diferentes procesos de calzado, que principalmente no funcionan con aire comprimido, pero necesitan de este, para accionar algunos elementos de su maquinaria, ya sea puertas, rendijas etc.

Finalmente se debe tener en cuenta que siempre en fábricas o talleres, se necesita tomas aire comprimido para máquinas y herramientas utilizadas en su mantenimiento.

#### **1.4. Formulación del problema.**

La empresa de calzado OFÁHER tiene por objeto el fabricar calzado para hombre, mujer y niños en grandes cantidades que satisfagan las necesidades de los clientes y la sociedad en general.

Debido a que la empresa OFÁHER cuenta con una repotenciación en su producción, añadiendo nueva maquinaria a sus líneas de proceso se ve en la necesidad de optar por un nuevo diseño de red de aire comprimido, ya que el actual diseño no cumple eficientemente con los requerimientos de la empresa.

Las técnicas de fabricación de calzado en la empresa OFÁHER donde se necesita el suministro de aire comprimido son: aparado, montado y plantado; los cuales no poseen un abastecimiento de aire eficiente, debido a que el diseño actual de la red de aire comprimido se lo realizo de forma artesanal y sin prever la adquisición de nueva maquinaria lo que provoca desconfianza en la red, para lo cual el uso del software de simulación DWSIM busca contribuir con el diseño de la red de aire comprimido, ya que proporciona las siguientes ventajas:

- Proporciona valores cuantitativos de datos necesarios en el funcionamiento de los sistemas de aire comprimido bajo numerosas situaciones existentes o diseñadas.
- Tiene la capacidad de poder analizar las posibles alternativas a la optimización del sistema de aire comprimido, sin tener que alterar físicamente el mismo.
- Provee de información sobre cada operación unitaria en las redes de aire comprimido, permitiendo la detección de problemas logísticos.

Por las ventajas señaladas del software DWSIM se denota que aporta en el diseño de redes de aire comprimido, aumentando así la fiabilidad del cálculo en la red a diseñar.

## **1.5. Objetivos.**

### ***1.5.1. Objetivo general.***

Validar el cálculo de una red de aire comprimido, mediante el software de código abierto DWSIM y hojas de cálculo.

### ***1.5.2. Objetivos específicos.***

- Estudiar las características de la red existente de aire comprimido de la empresa, dedicada a la fabricación de calzado.
- Realizar el levantamiento isométrico de la red actual de aire comprimido.
- Levantar la información de los requerimientos de aire comprimido por parte de las máquinas, herramientas y la ubicación de la maquinaria.
- Diseñar la nueva red de aire comprimido de la fábrica, bajo las normas: ISO 3857-1:1977; ISO 3857-2:1977; ISO 8573-1:2010; y el manual ATLAS COPCO para aire comprimido.
- Simular la nueva red de aire comprimido, en el software DWSIM.
- Validar los cálculos del nuevo diseño mediante el software DWSIM y hojas de cálculo, bajo los parámetros de consumo para cada equipo y pérdidas de presión recomendadas en las tuberías principales y secundarias.
- Elaborar los planos de la nueva red de aire comprimido.
- Calcular los costos de implementación del proyecto.

## **1.6. Justificación.**

El presente proyecto tiene como propósito mejorar la distribución de aire comprimido en la fábrica de calzado OFÁHER, recopilando los datos e información de las necesidades actuales en los procesos de fabricación; ya que la red existente fue construida de forma artesanal, por lo cual no cuenta con los diámetros recomendados en las tuberías de la industria del aire comprimido y que por la adición de nueva maquinaria a las líneas de producción, tampoco tiene distribuidores de aire estratégicamente ubicados que impartan el suministro.

Por tal razón se validará el cálculo de la nueva red de aire comprimido para la fábrica, bajo los parámetros de consumo en cada equipo y pérdidas de presión en las tuberías; mediante el levantamiento de información necesaria de toda la maquinaria adquirida por parte de la empresa además de las herramientas y la simulación ejecutada en el software de código abierto DWSIM comparando los resultados con hojas de cálculo previamente elaboradas.

### **1.7. Alcance.**

El presente trabajo muestra la validación del cálculo de una red de aire comprimido, mediante el software de código abierto DWSIM y hojas de cálculo, bajo el vocabulario de las normas: ISO 3857-1:1977; ISO 3857-2:1977, la calidad de aire entregada por la norma ISO 8573-1:2010 y el manual ATLAS COPCO para aire comprimido, con el modelo termodinámico adecuado y sus operaciones unitarias respectivas. Además, se validará todos los cálculos realizados, bajo los parámetros de consumo para cada equipo y pérdidas de presión en tuberías.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO.

#### 2.1. Generación de aire comprimido.

La generación del aire comprimido es indispensable en el mundo de la industria por suministrar movimientos controlados en varios actuadores neumáticos ya sean: cilindros, prensas, robots industriales, etc. En adición presenta propiedades dignas de ser mencionadas, ya que la distinguen de otras fuentes de energía (Bayas Urquizo 2016).

Entre las propiedades que posee un sistema de aire comprimido se tienen:

- **Buen comportamiento con sobrecargas:** Los dispositivos y actuadores neumáticos no son afectados a condiciones de sobrecarga, ya que suelen soltarse sin dificultad.
- **Disponibilidad:** El uso del aire comprimido en la industria es muy antigua y ya conocida, por lo que su generación y uso se encuentra en cada taller profesional.
- **Almacenamiento:** el aire comprimido se puede almacenar en tanques o depósitos sin haber perdido sus propiedades.
- **Economía:** El coste de los componentes de aire comprimido es módico junto a su operación.
- **Resistencia al entorno:** El aire comprimido es resistente a ambientes corrosivos y de altas temperaturas.
- **Fiabilidad:** La generación del aire comprimido, es sencillo, seguro y su uso puede ser prolongado (Bayas Urquizo 2016).

#### 2.2. Ecuación general para el estado gaseoso.

El aire y el vapor de agua a bajas presiones se pueden considerar como gases ideales, por lo que sus comportamientos se cuantifican mediante la ecuación general de gases ideales, donde la dependencia reciproca de sus propiedades (volumen, temperatura y presión) se la expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{P_2 \times V_2}{T_2} = \frac{P_1 \times V_1}{T_1} = R_i \quad (1)$$

Donde:

$P_1$  : Presión inicial

$P_2$  : Presión final

$T_1$  : Temperatura inicial

$T_2$  : Temperatura final

$V_1$ : Volumen inicial

$V_2$ : Volumen final

$R_i$  : Constante del gas.

La constante del gas para el aire es  $R_a = 0,2870 \left[ \frac{KPa \cdot m^3}{Kg \cdot K} \right]$  y para el vapor  $R_v = 0,4615 \left[ \frac{KPa \cdot m^3}{Kg \cdot K} \right]$ .

Si se considera que el recíproco de la densidad es el volumen específico y se considera que la masa es la única constante se puede aplicar la ecuación (1) con la densidad.

$$\frac{P_2}{T_2 \times \rho_2} = \frac{P_1}{T_1 \times \rho_1} \quad (2)$$

Donde:

$P_1$  : Presión inicial

$P_2$  : Presión final

$T_1$  : Temperatura inicial

$T_2$  : Temperatura final

$\rho_1$ : Densidad inicial

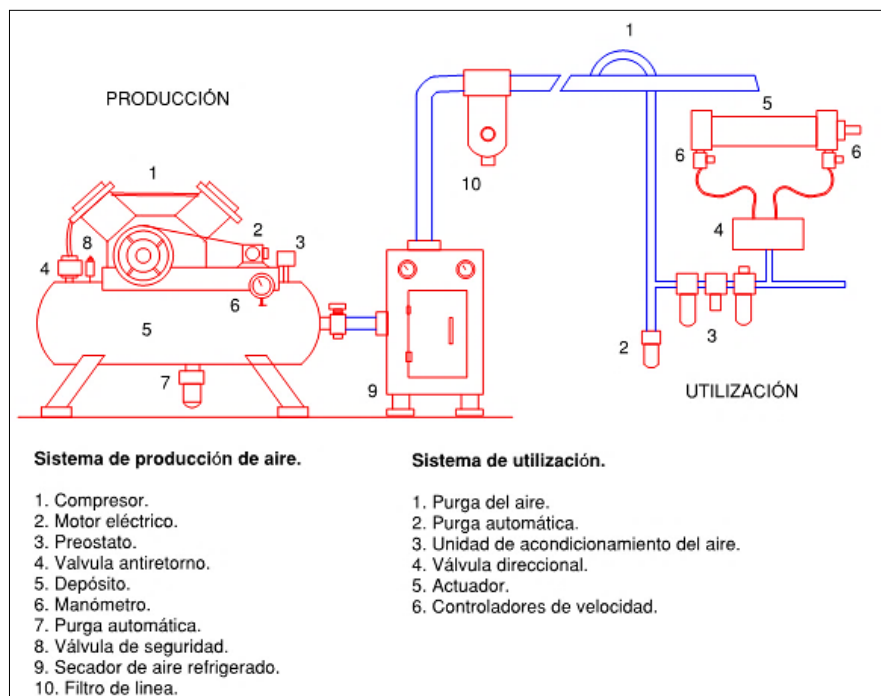
$\rho_2$ : Densidad final

## 2.3. Requerimientos de una red de aire comprimido.

### 2.3.1. Elementos Básicos.

En la generación de aire comprimido para los sistemas neumáticos previamente se necesita tratar el aire, donde intervienen los siguientes elementos: compresor, depósito, componentes de preparación para pasar a una red de distribución y llegar a las máquinas y herramientas neumáticas (Bayas Urquiza 2016).

La siguiente figura representa los elementos básicos para la generación de aire comprimido.



**Figura 1-2:** Elementos básicos para generación de aire comprimido.

**Fuente:** (Bayas Urquiza 2016)

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

En la Figura 1-2 se puede observar los elementos básicos de una red neumática, comenzando desde el compresor accionado por un motor eléctrico conectado a un depósito para continuar a un secador frigorífico hasta llegar al punto de utilización.

### 2.3.2. Caudal

Se conoce como caudal a la cantidad de aire a presión atmosférica que un compresor comprime y entrega al sistema. Caudal es la relación que tiene el volumen de un fluido sobre el tiempo, en este caso el aire comprimido, las unidades que se emplean son metros cúbicos por hora o litros por segundo. Además, las normas ISO 1217, en el anexo C y las normas DIN 1945 parte 1, sugieren varios pasos para la medición correcta del caudal, como son (KAESER Compresores 2010, p. 4):

:

- Se debe empezar midiendo la temperatura, presión atmosférica y la humedad del aire a la entrada del equipo.
- Seguido se identifica la presión máxima de trabajo, la temperatura del aire comprimido y su volumen a la desembocadura.
- Se concluye con el recalcu del volumen de salida (KAESER Compresores 2010, p. 4).

## **2.4. Distribución del aire comprimido**

Para su distribución se emplean varios elementos, tales como: tuberías, válvulas, accesorios y otros.

### **2.4.1. Tubería vertical o primaria.**

Son aquellas que están encargadas de llevar el suministro de aire comprimido desde la zona de los compresores hasta las líneas o tuberías de distribución.

Las redes de aire comprimido fijas tienen un gran factor a tomar en cuenta que es la longitud máxima ya que la caída de presión en las tuberías no debe sobrepasar los 0,1 bar entre el compresor y el punto de consumo más distante, y solo en las tuberías verticales la pérdida de carga admitida es de 0,02 [bar]. (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 89)

### **2.4.2. Líneas de distribución.**

Son aquellas tuberías dedicadas a llevar el aire comprimido desde la tubería vertical hasta los puntos de consumo. La pérdida en las líneas de alimentación o distribución no debe superar el 0,05 [bar] (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 92).

### **2.4.3. Tuberías de Servicio.**

Unen las tuberías de distribución con sus respectivos consumidores, llegando a la zona de los usuarios. Se diseñan con el caudal solicitado por cada usuario, mas no, con el total de la fábrica. La pérdida máxima permitida en las tuberías de servicio según Atlas Copco Airpower NV (2011, p. 92) es de 0,03 [bar]. Adicionando las pérdidas de los demás grupos de tubería se espera una pérdida total de 0,1 [bar].

## 2.5. Depósitos de aire.

Según Carnicer R. Enrique (1994, p. 83) un depósito de aire es un elemento primordial en toda red de aire comprimido, se encuentra entre el compresor y la red, cumpliendo con las siguientes funciones:

- Disminuye las variaciones bruscas del caudal procedentes de los compresores alternativos.
- Opera de distanciador en los tiempos de regulación.
- Enfrenta a los picos de demanda sobre caudal sin sufrir caídas excesivas de presión.
- Normaliza el caudal proveniente del compresor según el consumo deseado por la red.(Carnicer Royo 1994, p. 83)

Existen acumuladores de aire intermedios en la red, su diferencia con los depósitos es que son de menor volumen.

Para Atlas Copco Airpower (2011) el tamaño del depósito depende de la capacidad del compresor junto al método de regulación y del patrón de consumo de aire. Además, incluye una función adicional a las anteriores sobre el depósito que es recoger la condensación, y recomienda que, en caso de tener varios compresores, el depósito de aire se dimensiona siempre con las especificaciones del compresor más grande, también se puede unir varios compresores a un único depósito de aire que, por otro lado, Carnicer R. Enrique (1994) no lo recomienda, sino que, en tal caso aconseja colocar acumuladores intermedios luego del depósito principal.

Los depósitos de aire son recipientes a presión, fabricados a partir de chapa metálica con cabeza y fondo semiesféricos, por tal motivo su construcción debe estar regulada bajo el código ASME VIII, DIV.1 además, su orientación puede ser vertical u horizontal y deben tener los siguientes accesorios (Sánchez Carrión 2012, p. 10):

- Válvula de purga, para la expulsión de los condensados.
- Interruptor de presión para iniciar el arranque y apagado según la presión nominal interna.
- Válvula de seguridad, para disminuir la presión interna cuando exista una sobre carga del 10 % adicional a la presión de trabajo.
- Manómetro, para conocer su presión interna (Sánchez Carrión 2012, p. 10)



## **2.6. Disposición de redes neumáticas.**

Dependiendo de cómo está ubicado la tubería principal, existen diferentes tipos de redes de aire comprimido que se describirán a continuación.

### **2.6.1. Disposición cerrada o de anillo.**

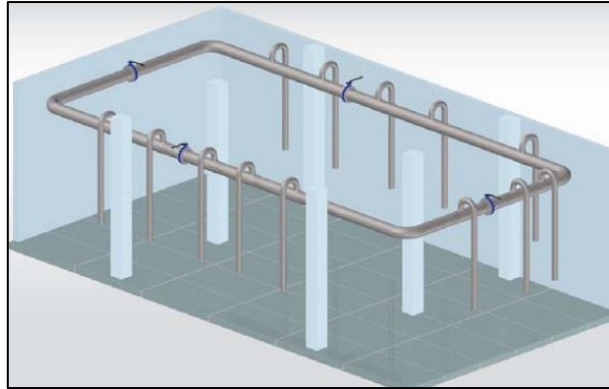
Se trata de un circuito cerrado por el motivo de que las tuberías y elementos forman un ciclo cerrado de circulación de aire comprimido.

Las ventajas que presenta esta disposición de red de aire comprimido son:

- El aire comprimido es transportado desde la sala de compresores hasta el punto de utilidad por dos sentidos ya que se cuenta con una disposición cerrada que convergen en los compresores.
- No poseen inclinación o pendientes en sus tuberías.
- Permite minimizar la caída de presión.
- Durante el mantenimiento a la tubería de distribución, parcialmente no se detendrá la producción, ya que el flujo de aire comprimido llega a los puntos solicitados por dos direcciones (Sánchez Carrión 2012).

Pero con estas ventajas también se tienen las siguientes desventajas:

- Todos los instrumentos o elementos unidireccionales ya sea: separadores, filtros, etc. Que estén interconectados en un circuito cerrado de aire comprimido quedan inservibles ya que en esta disposición no está definido el sentido de la dirección del origen del aire. (Carnicer Royo 1994)
- Presenta dificultad al desechar el condensado ya que, por su flujo de aire comprimido incierto en su dirección, deja inútiles las purgas automáticas o manuales y así mismo las pendientes de sus tuberías (Sánchez Carrión 2012).
- La inversión inicial de esta disposición de red es mayor a la disposición abierta (Sánchez Carrión 2012).



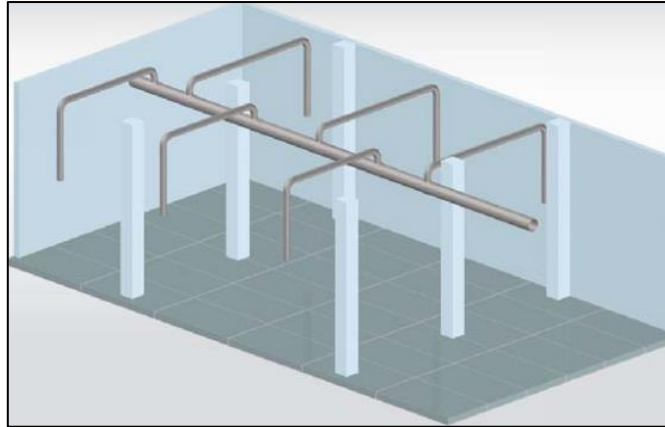
**Figura 2-2:** Disposición cerrada de una red de aire comprimido.

Fuente: (KAESER Compresores 2010)

### 2.6.2. *Disposición abierta.*

La dirección del aire comprimido en la presente disposición no sufre recirculación. La ventaja principal que brinda esta disposición es que la dirección del flujo es conocida, por lo cual los elementos e instrumentos unidireccionales son válidos y muy necesarios. Además, que su inversión inicial es mucho menor a las otras disposiciones de redes. Por otro lado, como desventajas presentes en esta disposición se tiene:

- Si la instalación no lleva secador de aire se debe pensar en la formación de condensados, los cuales se deben evitar con pendientes en la red, que van desde el 2-3%, además de la instalación obligatoria de purgas automáticas o manuales, filtros, separadores, etc.(Sánchez Carrión 2012)
- Al momento del mantenimiento correctivo, podría ocasionar el freno de la producción ya que no circularía aire por esta tubería (Sánchez Carrión 2012).

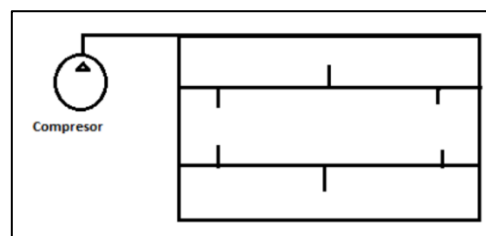


**Figura 3-2:** Disposición abierta de una red de aire comprimido.

Fuente: (KAESER Compresores 2010)

### 2.6.3. Disposición mixta.

Como su nombre mismo lo dice, esta disposición es similar a la disposición de anillo o cerrado con la diferencia que cuenta con un baipás conectando las líneas principales. También se conoce como distribución entrelazada. Su ventaja es que se puede repartir aire comprimido en lugares próximos y dentro de las instalaciones del anillo o circuito cerrado de la red, en forma ordenada y alineada. Como desventajas presenta las mismas de la disposición cerrada.



**Figura 4-2:** Disposición mixta de una red de aire comprimido.

Fuente:(Sánchez Carrión 2012).

## 2.7. Elementos que contiene el aire.

El aire atmosférico se considera una mezcla de gases, compuesto por los siguientes elementos:

**Tabla 1-2:** Elementos presentes en el aire

Elemento	% en masa	% en volumen
Argón	1,288	0,934
Kriptón	0,000330	0,000114
Dióxido de nitrógeno	0,0000002	0,0000001
Dióxido de carbono	0,0477	0,0314
Hidrógeno	0,000003	0,00005
Helio	0,0000724	0,000524
Metano	0,0001	0,0002
Monóxido de carbono	0,00002	0,00001
Nitrógeno	75,520	78,084
Neón	0,001267	0,001818
Oxígeno	23,142	20,9476
Óxido nitroso	0,00008	0,00005
Ozono	0 a 0,00001	0 a 0,000007

Fuente: (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 132)

Como se observa en el aire atmosférico utilizado en las redes neumáticas, posee humedad y dependiendo de la temperatura del ambiente habrá vapor de agua. Igualmente, al comprimir el aire para su uso, aumenta la concentración de agua formándose los condensados que traen consigo dificultades además de perturbaciones en las tuberías y en los equipos acoplados al sistema, por tal motivo el aire comprimido debe tener un proceso de secado. Un término involucrado en los condensados es el punto de rocío, el cual describe la temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse. Se debe tener en cuenta que mientras más bajo sea este punto de rocío, mayor será el costo de operación del secador (Ramírez Zamora 2018, p. 43).

## 2.8. Humedad del aire.

El aire en el medio ambiente se presenta como aire húmedo conformado por vapor de agua recalentado y aire seco, la cantidad de vapor de agua contenida en forma limitada depende de la temperatura y la presión del sistema, obteniendo más humedad del ambiente que lo rodea. Para cada temperatura corresponde una cantidad máxima de vapor de agua; desde luego, un aire húmedo saturado (100% de humedad) podrá retener más humedad si se incrementa la temperatura o decrece la presión, en cambio, si desciende la temperatura o aumenta la presión suelta una parte de su humedad. Los extremos en donde varía su humedad son entre el aire completamente seco (vapor

recalentado de agua más aire seco) y el aire completamente saturado (aire seco más vapor de agua saturado a líquido, o saturado a sólido).

### 2.8.1. *Humedad relativa del aire.*

La humedad relativa expresa la capacidad que tiene el aire para absorber agua, a una determinada temperatura hasta que el aire se sature.

También se puede definir a la humedad relativa como la relación entre la presión parcial del vapor de agua, tal cual está en la mezcla y la presión de saturación del vapor a la misma temperatura de la mezcla, entendiéndose como mezcla al aire húmedo.

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \leq 1 \quad (3)$$

Donde:

$\phi$  : Humedad relativa

$P_v$  : Presión parcial de vapor de agua.

$P_{sat}$  : Presión de saturación a la temperatura de la mezcla.

### 2.8.2. *Humedad específica del aire*

La humedad específica es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco, y se puede calcular en base a sus presiones parciales, con la siguiente formula.

$$\omega = 0,622 \times \left( \frac{P_v}{P - P_v} \right) \quad (4)$$

Donde:

$\omega$  : Humedad específica  $\left[ \frac{kg_{vapor}}{kg_{aire}} \right]$

$P_v$  : Presión parcial del vapor de agua. [KPa]

$P$  : Presión absoluta de la mezcla. [KPa]

### 2.8.3. Fracción Molar

La fracción molar es usada para describir la composición de una mezcla en este caso el aire húmedo, y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Y_i = \frac{P_i}{P} = \frac{N_i}{N} \quad (5)$$

Donde:

$Y_i$  : Fracción molar de un componente.

$P_i$  : Presión parcial de un componente.

$P$ : Presión absoluta de la mezcla.

$N_i$  : Número de moles de un componente de la mezcla.

$N$  : Numero de moles totales de la mezcla.

### 2.9. Cálculo del condensado.

Para obtener el condensado, se debe hallar la diferencia de la masa de vapor que ingresa al proceso con la que sale, bajo la Ley de Dalton, donde se menciona que la presión total de una mezcla (aire húmedo) es igual a la suma de las presiones parciales de sus componentes (aire seco y vapor de agua) mientras sean medidas a la misma temperatura e igual volumen.

Con el valor del caudal aspirado se obtiene sus masas, encontrando antes los volúmenes específicos del ingreso con la ecuación de estado para los gases ideales

$$m_a = \frac{Q_{act}}{v_a} ; m_v = \frac{Q_{act}}{v_v} \quad (6)$$

Donde:

$m_a$  : Masa de aire seco [ $kg_{aire}$ ]

$m_v$  : Masa de vapor de agua [ $kg_{vapor}$ ]

$Q_{act}$  : Caudal actual de aire aspirado [ $\frac{m^3}{s}$ ]

$v_a$  : Volumen específico del aire seco [ $\frac{m^3}{kg_{aire}}$ ]

$v_v$  : Volumen específico del vapor de agua [ $\frac{m^3}{kg_{vapor}}$ ]

Para que se condense el vapor se considera el 100% de la humedad relativa luego del post enfriado. Dado que el aire seco no se condensa este permanece constante durante todo el proceso y si se multiplica por la humedad específica de la salida, se obtiene la masa de vapor saliente libre del condensado.

$$m_{v_{out}} = \omega_{out} \times m_a \quad (7)$$

Donde:

$m_{v_{out}}$  : Masa de vapor a la salida del proceso [ $kg_{vapor}$ ]

$\omega_{out}$  : Humedad específica luego de la compresión y post enfriado  $\left[ \frac{kg_{vapor}}{kg_{aire}} \right]$

$m_a$  : Masa de aire seco [ $kg_{aire}$ ]

Finalmente, la diferencia entre las dos masas de vapor calculadas es el líquido que se ha condensado.

$$m_L = m_{v_{in}} - m_{v_{out}} \quad (8)$$

Donde:

$m_L$  : Masa del condensado [kg]

$m_{v_{in}}$  : Masa del vapor al ingreso [kg]

$m_{v_{out}}$  : Masa del vapor a la salida del post enfriado [kg]

## 2.10. Punto de rocío.

El punto de rocío es la temperatura a la cual el aire se llena con vapor de agua saturado, produciendo rocío, neblina y si es muy baja produce escarcha. Puntos de rocío muy bajos reflejan aire muy seco reflejando gran calidad, por el contrario, puntos de rocío elevados suponen aire con altas humedades relativas. El punto de rocío es muy importante en una red neumática ya que limita considerablemente el funcionamiento de sus componentes y el caudal.

También interviene el término punto de rocío a presión, el cual indica la temperatura a la que se obtendrán condensados dentro de las conducciones del aire comprimido a una presión dada. En otras palabras, equivale a la temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse con una presión superior (Atlas Copco Airpower NV 2011).

## **2.11. Técnicas de eliminación de humedad.**

Atlas Copco Airpower NV,(2011) menciona que existen cinco técnicas para eliminar la humedad del aire comprimido, que son:

- Refrigeración más Separación.
- Enfriamiento por secador.
- Sobrecompresión.
- A través de secadores de Membranas.
- Absorción y adsorción.

### ***2.11.1. Refrigeración más Separación.***

En el método de refrigeración interviene principalmente un refrigerador posterior a base de agua o aire, el cual es un intercambiador de calor utilizado para enfriar el aire comprimido caliente a aproximadamente  $10[^\circ\text{C}]$  por encima de la temperatura del refrigerante y formando precipitados de agua que se aíslan del aire comprimido y posteriormente son recolectados en el separador de humedad ubicado en el propio refrigerador posterior. Es recomendado para las instalaciones estacionarias (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 45).

### ***2.11.2. Enfriamiento por secador***

El enfriamiento del aire comprimido es producido a través de un sistema cerrado de refrigerante, donde se produce el intercambio de calor entre el aire comprimido de entrada y de salida, que condensa una gran cantidad de agua, su uso es recomendado entre puntos de rocío de 2 y  $10 [^\circ\text{C}]$ , cabe denotar que tienen un límite inferior que es el punto de congelación del condensado extraído. (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 46).

### ***2.11.3. Sobrecompresión.***

En el presente proceso el aire atmosférico es comprimido hasta una presión mayor a la del trabajo esperado, aumentando la concentración de vapor de agua, a continuación, el enfriamiento del aire ya



compreso da como efecto la dispersión del agua. Para terminar con la expansión del aire hasta la presión de trabajo solicitado, provocando que la presión del punto de rocío disminuya. La principal desventaja de este método es que consume elevadas cantidades de energía, por lo cual es recomendable ser utilizado con caudales diminutos de aire (Ramírez Zamora 2018, p. 47).

#### ***2.11.4. A través de secadores de Membranas.***

El proceso de secado se lleva a cabo a través de membranas de permeación selectiva. Los secadores de membrana contienen un cilindro con fibras de polímero huecas con tamaños imperceptibles y la cualidad de permeación selectiva, producida por el diferencial de presiones parciales del gas que presenta el interior y exterior de la fibra, que atrapa al vapor de agua en el interior de sus fibras, y da paso al aire comprimido seco que fluye aproximadamente a la misma presión que ingreso el aire comprimido húmedo (Ramírez Zamora 2018, p. 50).

#### ***2.11.5. Absorción y adsorción***

En primer lugar, el método de absorción es un proceso químico, donde el vapor de agua queda arraigado a un material absorbente, que comúnmente se emplea ácido sulfúrico o cloruro de sodio, en estado líquido o sólido, inducido a corrosión. También consume elevadas cantidades de materiales absorbentes y acorta de forma limitada al punto de rocío. Por otro lado, el método de adsorción utiliza material higroscópico o desecante, como: alúmina activada, tamices moleculares, etc. Los cuales tienen la propiedad de absorber la humedad del medio presente. Pero el material desecante se degenera, por lo que necesita regeneración periódica. Además, el secado por adsorción es el más capaz para proveer aire comprimido ya que el punto de rocío a presión se queda a aproximadamente  $-40[^\circ\text{C}]$  (Ramírez Zamora 2018, p. 47).

### **2.12. Microorganismos presentes en el aire comprimido.**

Atlas Copco Airpower NV, (2011) menciona que existe el riesgo de que las partículas que pasan el filtro de aspiración puedan dispersarse por medio de las líneas de distribución mezclándose con restos de aceite, agua y depósitos amontonados, dando paso al desarrollo de microorganismos, ya que el 80% de las partículas presentes en el aire atmosférico son aproximadamente de  $2 [\mu\text{m}]$ . La posible solución a este problema es la colocación directa de un filtro luego del compresor.

La norma ISO 8573-1 dicta las calidades de aire comprimido, cantidades de agua, partículas y de aceite regulables en los sistemas neumáticos, dependiendo del uso del aire comprimido.

**Tabla 2-2:** Resumen de la calidad de aire según la norma ISO 8573-1:2010

Clase	Partículas			Máxima concentración de masa de masa (mg/m <sup>3</sup> )	Agua		Aceite
	Máximo número de partículas por metro cúbico basado en el tamaño de las partículas				Punto de rocío (°C)	Concentración de agua líquida(g/m <sup>3</sup> )	Concentración total de aceite (mg/m <sup>3</sup> )
	0,1µm-0,5µm	0,5µm-1,0µm	1,0µm- 5µm				
0	Según lo especificado por el usuario o proveedor del equipo y más estricto que la clase 1						
1	≤20 000	≤400	≤10		≤-70	No admitida	≤0,01
2	≤400 000	≤6 000	≤100		≤-40	No admitida	≤0,1
3	No especificado	≤90 000	≤1 000		≤-20	No admitida	≤1
4	No especificado	No especificado	≤10 000		≤+3	No admitida	≤5
5	No especificado	No especificado	≤100 000		≤+7	No admitida	>5
6	No especificado	No especificado	No especificado	0 - ≤5	≤+10	No admitida	No especificado
7	No especificado	No especificado	No especificado	5 - ≤10		≤0,5	No especificado
8	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado		≤5	No especificado
9	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado		≤10	No especificado
X	No especificado	No especificado	No especificado	>10		>10	>5

Fuente:(Ramírez Zamora 2018, p. 53)

Realizado por: Macas Alex, 2021

### 2.13. El aceite en el aire comprimido.

El aceite cumple la función de lubricar todos los componentes mecánicos de los compresores que alimentan a las redes neumáticas. El aceite en el aire comprimido dependiendo su finalidad de uso no es un conflicto significativo, ya que su presencia en compresores de tornillo es menor a 3[mg/m<sup>3</sup>]. Para los requisitos de calidad más altos, los costes de energía que conlleva tener un aire comprimido con la cantidad de aceite adecuada son elevados (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 73).

### 2.14. Filtración de aire comprimido.

La filtración de aire comprimido funciona bajo un accionamiento mecánico también conocido como efecto tamiz siempre que las partículas sean menores a los poros del material filtrante, usualmente para partículas mayores a 1 mm, si son menores de 1 mm se usa métodos físicos de colisión de

partículas, para recogerlas en el material filtrante, clasificándose en 3, que son (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 51):

- **Difusión:** la filtración se obtiene cuando la partícula, se desvía de la trayectoria de flujo circulando aleatoriamente por los choques con las partículas del fluido, describiendo un movimiento browniano.
- **Interceptación:** Cuando el espacio entre la trayectoria del fluido y el contorno de la fibra es menor al radio de la partícula, ésta queda atrapada en la fibra.
- **Impacto inercial:** En partículas relativamente grandes al existir un cambio de trayectoria de fluido éstas colisionan directamente, por la inercia del movimiento, con la fibra quedando atrapadas (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 51).

La filtración en realidad no es totalmente efectiva para todo tamaño de partículas, ya que depende de otros factores adicionales como la distribución del tamaño de las partículas de aerosol, la velocidad del aire y de la distribución del diámetro en la fibra (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 51).

Según Stefan Hesse en “Aire comprimido, fuente de energía” (2002) clasifica a los filtros de aire comprimido como:

- **Filtros:** Detienen partículas de volumen superiores a 5 [ $\mu\text{m}$ ] o a 40 [ $\mu\text{m}$ ] según el tipo de cartucho filtrante.
- **Microfiltro:** Destinados a detener partículas superiores a 0,1 [ $\mu\text{m}$ ]
- **Submicrónico:** Recibe aire previamente filtrado para partículas superiores a 5 [ $\mu\text{m}$ ] y detiene partículas mayores a 0,01 [ $\mu\text{m}$ ].
- **Filtros con carbón activado:** Usado en la filtración hasta partículas de 0,003 [ $\mu\text{m}$ ] (Hesse 2002).

Según la finalidad del uso del aire comprimido se tiene diferentes grados de filtración, como:

- **Partículas menores a 1 [ $\mu\text{m}$ ]:** Son admisibles en industrias electrónicas, alimenticias y farmacéuticas.

- **Partículas Menores a 5 [µm]:** Es necesario en instrumentos de medición, reguladores, válvulas y pistolas de inyección.
- **Partículas entre 5 y 40 [µm]:** Son admitidas en aplicaciones con cilindros neumáticos, unidades de mando y herramientas percutoras (Hesse 2002).

Atlas Copco Airpower NV, (2019) proporciona la siguiente tabla, para seleccionar los diferentes filtros para cumplir con la calidad de aire ISO 8573-1 deseada.

**Tabla 3-2:** Filtros sugeridos para cada calidad de aire según la norma ISO 8573-1:2010

CLASE ISO 8573-1	Partículas sólidas		Agua	Aceite	
	Condiciones húmedas	Condiciones secas			
0	Según lo especificado por el cliente*			Compresor exento de aceite	
1	DD+ y PD+	DDp+ y PDp+	Secador de adsorción	DD+ y PD+	y QD+/QDT
	UD+			UD+	y QD+/QDT
2	DD+	DDp+	Secador de adsorción	DD+ y PD+	
				UD+	
3	DD+	DDp+	Secador de adsorción, secador de membrana, secador con tambor rotativo	DD+	
4	DD+	DDp+	Secador de membrana, secador frigorífico	DD+	
5	DD+	DDp+	Secador de membrana, secador frigorífico	-	
6	-	-	Secador de membrana, secador frigorífico	-	

Fuente: (Atlas Copco Airpower NV 2019, p. 4)

### 2.15. Factores de consideración en el caudal.

El caudal necesario depende de los consumos de aire de cada equipo, del factor de simultaneidad, las pérdidas consideradas por fugas o desgaste en la red y la reserva para posibles ampliaciones futuras.

Los factores de simultaneidad son considerados como el promedio de los coeficientes de utilización y también son dependientes de la cantidad de unidades consumidoras.

**Tabla 4-2:** Factores de simultaneidad.

Número de consumidores	Factor de simultaneidad	Número de consumidores	Factor de simultaneidad
1	1	10	0,71
2	0,94	12	0,68
4	0,86	14	0,66
6	0,80	15	0,65
8	0,75	100	0,20

Fuente: (Hesse 2002, p. 65)

Realizado por: Macas Alex, 2021

Al hallar la suma total de los consumidores y multiplicarlo por el factor de simultaneidad, se tiene que corregir interviniendo las consideraciones del margen de seguridad entre el 10-20 %, según lo recomienda Atlas Copco Airpower NV,(2011).

Si se desea conocer el flujo másico, basta multiplicar el caudal por su densidad mientras ambas sean evaluadas a las mismas condiciones.

$$m' = \rho \times Q \quad (9)$$

Donde:

$m'$ : Flujo másico

$\rho$  : Densidad

$Q$  : Caudal

## 2.16. Cálculo termodinámico de la potencia real de un compresor

Para iniciar con el cálculo termodinámico de la potencia real de un compresor se debe obtener la presión relativa y la entalpia del estado inicial, donde interviene la relación de presiones.

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \quad (10)$$

Donde:

$r_p$ : Relación de presiones

$P_1$ : Presión al inicio de la compresión

$P_2$ : Presión al final de la compresión

$P_{r1}$ : Presión relativa inicial

$P_{r2}$ : Presión relativa final

Para poder hallar el trabajo isoentrópico del compresor se usa la siguiente ecuación, obtenida del balance de energía en el compresor:

$$W_{c_s} = m' \times (h_{2_s} - h_1) \quad (11)$$

Donde:

$W_{c_s}$  : Trabajo isoentrópico del compresor

$m'$  : Flujo másico

$h_{2_s}$  : Entalpia del estado final a condiciones isoentrópicas

$h_1$  : Entalpia del estado inicial de la compresión

Otro factor importante para tener en cuenta es la eficiencia adiabática del compresor.

$$\eta = \frac{W_{c_s}}{W_{c_r}} \quad (12)$$

Donde:

$\eta$  : Eficiencia adiabática del compresor

$W_{c_s}$  : Trabajo del compresor a condiciones isoentrópicas

$W_{c_r}$  : Trabajo real del compresor

## 2.17. Cálculo del calor de salida en el post enfriador

En el cálculo del calor de salida en el post enfriador intervienen las entalpias de entrada y salida, junto a su flujo másico, obtenido de un balance energético en la operación unitaria.

$$q_s = m' \times (h_1 - h_2) \quad (13)$$

Donde:

$q_s$  : Flujo calórico de salida en el post enfriador

$m'$  : Flujo másico

$h_1$  : Entalpia al ingreso del post enfriador

$h_2$  : Entalpia a la salida del post enfriador

## 2.18. Pérdidas de presión en el sistema de distribución de aire comprimido.

La presión recién obtenida del compresor no es aprovechable en su totalidad debido a las pérdidas de presión generadas en su distribución, por lo que se debe tener en cuenta las pérdidas de carga admisibles en los distintos grupos de tuberías (Atlas Copco Airpower NV 2011).












**Tabla 5-2:** Pérdidas de presión admisibles en el sistema de distribución.

<b>Caídas de presión en:</b>	<b>Valor (bar).</b>
Tuberías de servicio	0,03
Tuberías de distribución.	0,05
Tuberías verticales.	0,02
Total	0,10

**Fuente:** (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 92)

Dado que un sistema de distribución de aire comprimido, aparte de las tuberías, tiene elementos adicionales como válvulas, codos, reducciones, etcétera, los cuales también influyen en la pérdida de carga, por lo que sus pérdidas son traducidas en longitud equivalente de tubería para que se pueda realizar los cálculos de la distribución de aire con más factibilidad (Atlas Copco Airpower NV 2011).

Las longitudes de tubería equivalente se muestran a continuación en la Figura 5-2.

Longitud equivalente en metros												
Componente		Diámetro interior de la tubería en mm (d)										
		25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Válvula de bola totalmente abierta		0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válvula de diafragma totalmente abierta		1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válvula angular totalmente abierta		4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo		7.5	12	15	24	30	38	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta		2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Codo R = 2d		0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Codo R = d		0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ángulo 90°		1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Te, salida en línea		0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
Te, salida angular		1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reductor		0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

**Figura 5-2:** Longitudes equivalentes de accesorios de tuberías.

Fuente: (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 92)

## 2.19. Cálculo del diámetro de tubería.

El diámetro de tubería para la distribución de aire comprimido se puede hallar en las unidades más comunes con la siguiente ecuación, proporcionada por Atlas Copco Airpower NV, (2011):

$$d = \sqrt[5]{450 \times \frac{Q^{1.85} \times L}{P_{act} \times \Delta p}} \quad (14)$$

Donde:

$d$  : Diámetro interno de tubería [mm]

$\Delta p$  : Caída de presión [bar]

$Q$  : Caudal de aire, FAD [l/s]

$L$  : Longitud de tubería [m]

$P_{act}$  : Presión absoluta inicial [bar]



## 2.20. Diámetros, accesorios y válvulas recomendados.

En la industria del aire comprimido, interviene el termino cédula que delimita el diámetro, dimensiones y tolerancias para una cañería específica, ya que las redes de aire comprimido están sometidas a grandes presiones internas se debe tomar en cuenta solo los diámetros recomendados, junto a sus accesorios para lo cual se tiene la especificación “H” ANSI 150 resumida en la siguiente tabla.

**Tabla 6-2:** Diámetros y accesorios recomendados bajo la especificación “H” ANSI 150#.

SERVICIOS: <i>Air Instrument, Air utility, Fire Water.</i>						
SIZE (in)	PIPE			FITTINGS		
1/4	SCH 160	TDH	ASTM-A53 GRB, GALV	3000#	THD	ASTM-A105, GALV
3/4						
1	SCH 80	TDH	ASTM-A53 GRB, GALV	3000#	THD	ASTM-A105, GALV
2						
3						
3-1/2.	SCH STD	BE, SMLS	ASTM-A53 GRB	Misma cédula de tubería	BW, SMLS	ASTM-A234 GR WPB
4						
6						
8						
10						
12						
16						
20						
24						
Máximas condiciones de diseño: -20/100 °F a 285 PSIG, 200 °F a 260 PSIG, 250 °F a 245 PSIG.						

Fuente: (CHUQUÍN VASCO et al. 2019, p. 28)

Realizado por: Macas Alex, 2021

En cuanto a la recomendación en torno al caudal, presión interna y caída de presión en las tuberías se cuenta con la siguiente tabla donde se recomienda que los índices de flujo se basan en una caída de presión de 1 [psi] por cada 100 [ft] en tramos de tubo en línea recta y para los sistemas de recirculación, los caudales se pueden duplicar (Gardner Denver Inc. 2013).

**Tabla 7-2:** Caudales recomendados para tuberías de bloqueo rápido.

Diámetro interno		CFM @ 220 psig	CFM @ 175 psig	CFM @ 150 psig	CFM @ 125 psig
Mm	In				
14	1/2	21	17	14	12
20	3/4	48	42	39	36
25	1	99	88	81	76
32	1 1/4	189	171	158	146
40	1 1/2	348	310	291	266
50	2	627	565	526	476
63	2 1/2	1153	1047	965	881

Fuente: (Gardner Denver Inc. 2013, p. 7)

Realizado por: Macas Alex, 2021

Para las válvulas en la industria del aire comprimido también se emplea la especificación “H” ANSI 150# resumida a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 8-2:** Tipo de válvulas de bola recomendadas según la especificación “H” ANSI 150#.

SERVICIOS: <i>Air Instrument, Air utility, Fire Water</i>			
TIPO	DESCRIPCIÓN	DESIGNACIÓN	TAMAÑO
<b>BALL</b>	<i>1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.</i>	CA1-2S	3" y menores
	<i>1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316 SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, full port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.</i>	CA1-2SF	3" y menores
	<i>Class 150#, CS body (ASTM-A216 Gr WCB or ASTM-A105), CS 1 mil ENP ball and stem. RF flanged ends per ASME B16.5, reduced port, lever or gear (6") operated, Floating ball. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.</i>	HA1-2R	3-1/2" - 6"

Fuente: (CHUQUÍN VASCO et al. 2019, p. 29)

Realizado por: Macas Alex, 2021

## 2.21. Velocidades de flujo recomendadas.

Primero se debe conocer la velocidad real en las tuberías, por lo cual se emplea la siguiente ecuación.

$$V_{real} = \frac{4 \times Q_{real}}{\pi \times \phi_{int}^2} \quad (15)$$

Donde:

$V_{real}$  : Velocidad de flujo real dentro de la tubería

$Q_{real}$  : Caudal real del flujo

$\phi_{int}$  : Diámetro interno de la tubería

Una vez conocida las velocidades de flujo reales dentro de los diferentes grupos de tuberías, se debe tener en cuenta las velocidades máximas con el fin de no crear contrapresiones, turbulencias o incluso señales erráticas para el sistema de control del compresor, por lo cual se recomienda una velocidad máxima de 8 [m/s] para tuberías principales y de distribución, mientras que para las tuberías de servicio es de 15 [m/s], evitando tuberías inferiores a ½" (12,7 [mm]) ya que pueden originar pérdidas de cargas significantes (García López 2011, p. 365).

## 2.22. Cálculo de la pérdida de presión en tuberías

Para obtener la caída de presión en las tuberías previamente se debe conocer el número de Reynolds con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\phi_{int} \times V_{real} \times \rho_{ope}}{\mu} \quad (16)$$

Donde

$Re$ : El número de Reynolds

$\phi_{int}$  : Diámetro interno de la tubería

$V_{real}$  : Velocidad real del flujo

$\rho_{ope}$  : Densidad a las condiciones de operación

$\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de operación

Después de obtener el número de Reynolds, se procede a calcular el factor de fricción de Swamee-Jain con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3,7 \times D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (17)$$

Donde:

$f$  : Factor de fricción

$\varepsilon$  : Rugosidad absoluta del material

$D$  : Diámetro interno de la tubería

$Re$  : Número de Reynolds

Finalmente, para conocer la caída de presión se tiene la ecuación (18) despejada del factor de fricción de Moody.

$$\Delta P = \frac{f \times L \times V_{real}^2 \times \rho_{ope}}{2 \times \phi_{int} \times 1000} \quad (18)$$

Donde:

$\Delta P$  : Caída de presión en la tubería [KPa]

$f$  : Factor de fricción [adimensional]

$L$  : Longitud de tubería [m]

$V_{real}$  : Velocidad real del flujo dentro de la tubería [m/s]

$\rho_{ope}$  : Densidad del fluido a las condiciones de operación [kg/m<sup>3</sup>]

$\phi_{int}$  : Diámetro interno de la tubería [m]

### **2.23. Estudio de Normas para diseño de aire comprimido.**

Las normas más conocidas a nivel internacional son las emitidas por la Organización internacional de Normalización (ISO), también está el Comité Europeo de Normalización (CEN) dirigido a sus 30 países miembros. Además, existen asociaciones comerciales que emite normas, por ejemplo: el PNEUROP (Comité Europeo de fabricantes de equipos de aire comprimido, bombas de vacío, herramientas neumáticas y quipos afines) y su equivalente en Estados Unidos que es el CAGUI (Instituto del gas y aire comprimido) junto a estas están las normas emitidas por las asociaciones dirigidas a sectores industriales específicos como la industria petrolera, la industria del aire comprimido, etc. (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 135)

Los tres grupos de normas internacionales que estan relacionadas con la calidad de aire y a las pruebas del aire comprimido, son:

- Serie ISO 8573.
- Serie ISO 12500.
- Serie ISO 7183.

Adicional a este grupo de normas destaca la norma ISO 1217, anexo C, la cual describe el método para medir el caudal efectivo de aire libre a las condiciones de 1 bar de presión, 20 °C de temperatura y 0% de Humedad relativa (KAESER Compresores 2010, p. 4).



**Figura 6-2:** Objetivos de las normas ISO sobre calidad de aire.

**Fuente:**(Parker Hannifin Corporation 2011)

**Realizado por:** Macas, Alex, 2021

La Figura 6-2, presenta los objetivos que tiene las principales normas ISO dedicadas a la industria del aire comprimido.

### 2.23.1. ISO 8573

La norma ISO 8573 está dirigida a la calidad o pureza del aire comprimido, consta de nueve partes. La primera parte describe las necesidades de calidad del aire comprimido y desde la segunda parte hasta la novena detallan los múltiples métodos de prueba para una gama de contaminantes.



**Figura 7-2:** Objetivos del grupo de normas ISO8573.

**Fuente:** (Parker Hannifin Corporation 2011)

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

Del Grupo de normas ISO 8573 la más usada es la Norma ISO8573-1:2010, en la cual se establece la cantidad de contaminación autorizada en un metro cubico de aire comprimido enumerando los principales contaminantes como partículas sólidas, agua y aceite, representados en una tabla descrita anteriormente (Ver Tabla 2-2)

Los tres dígitos hacen referencia a las clasificaciones de pureza seleccionadas para partículas sólidas, agua y el total de aceite en ese orden.

La definición de Clase 0 indica que el usuario junto al fabricante del equipo, deben acordar los niveles de contaminación especificándolo por escrito. Además, tiene que ser posible su medición con los equipos de pruebas y los métodos establecidos en ISO 8573 desde la parte 2 hasta la parte 9. Por otro lado, el aire respirable de uso clínico, sector alimenticio, etc., usualmente requieren solo calidad de Clase ISO 8573-1 [2,2,1] o Clase [2.1.1] (Parker Hannifin Corporation 2011, p. 3)

### **2.23.2. ISO 3857-1:1977.**

Esta norma internacional titulada: "Compressors, pneumatic tools and machines- Vocabulary – Part 1: General" constituye la primera parte de un vocabulario relacionado con compresores, herramientas neumáticas y máquinas. Revelando conceptos, símbolos y unidades básicas usadas en compresores neumáticos y lo que se relacione a estos.

En un comienzo define los diferentes tipos de presiones utilizadas, ya sea: atmosférica, manométrica, absoluta, estática, dinámica, total, crítica, reducida y el factor de compresibilidad. Luego pasa a definir las temperaturas, a saber: estática, dinámica, total, crítica y reducida. A continuación, presenta la primera tabla de: "Symbols and units" presentando la cantidad junto a su símbolo correspondiente, la dimensión, las unidades en el sistema internacional y otras unidades prácticas. Después, presenta la tabla 2 llamada: "Letters used as symbols"; en donde define 30 letras con su significado en el área del aire comprimido junto a sus unidades. Por último, muestra la tabla 3, denominada: "Letters and figures used as subscripts" donde hay los símbolos usados como subíndices en las ecuaciones o fórmulas.

### **2.23.3. ISO 3857-2:1977.**

La norma ISO 3857-2:1977 titulada "Compressors, pneumatic tools and machines – Vocabulary – Part 2: Compressors" es la segunda parte del vocabulario referente a los compresores, máquinas y herramientas neumáticas. Inicia con conceptos generales, ya sea: volumen de barrido para un compresor de desplazamiento, recorrido para un compresor de desplazamiento, volumen de espacio libre, volumen de espacio libre relativo, factor de volumen, punto de entrada estándar, condición de entrada estándar, condición de salida estándar y el número de Mach. Luego continua con definiciones de temperaturas, a saber: temperatura de entrada y temperatura de descarga; después, define caudales, es decir: caudal volumétrico real de un compresor y caudal volumétrico estándar; prosigue con las presiones, ya sea: presión de entrada, presión de descarga, relación de presión total, relación de presión de etapa, relación de presión de etapa total, coeficiente de presión para un compresor dinámico de etapas, coeficiente global de presión para un compresor dinámico y compresión ideal multietapas. Después continúa con las definiciones de potencias, a saber: potencia teórica requerida, potencia indicada, potencia interna y potencia en el eje; en seguida define los requisitos energéticos específicos, que son: requerimientos energéticos teóricos específicos y requerimiento energético específico real. A continuación, define las eficiencias: eficiencia teórica, eficiencia interna, eficiencia

mecánica, eficiencia total y eficiencia volumétrica. Finalmente, muestra los conceptos de Información relacionada, como son: balance de calor de un compresor dinámico y rendimiento especificado.

#### **2.23.4. Normas en general.**

##### *2.23.4.1. Con respecto a seguridad en máquinas.*

Las normas internacionales referentes a seguridad en máquinas con aire comprimido más usadas son:

ISO 1210-1:2003 Amd.1:2009 (Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 1: Terminología básica, metodología. Modificación 1); UNE-EN ISO 12100-2:2004/1:2010 (Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 2: Principios técnicos. Modificación 1); UNE-EN 1012-1:2011 (Compresores y bombas de vacío. Requisitos de seguridad. Parte 1: Compresores de aire) (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 135)

##### *2.23.4.2. Con respeto a seguridad en equipos a presión.*

Las normas internacionales que rigen a la seguridad en equipos a presión son:

EN 286-1 a 4 (Depósitos de presión simples no expuestos al fuego diseñados para contener aire o nitrógeno); EN 764-1 a 7 (Equipos de presión); Directiva 87/404/CE de la UE (Depósitos de presión simples). Sección VIII (Recipientes a presión, del Código de recipientes a presión y calderas de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 136)

##### *2.23.4.3. Con respecto al Medioambiente.*

Las normas sobresalientes relacionadas al medio ambiente y al aire comprimido son:

ISO 3744:2009 (Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido utilizando la potencia acústica de fuentes de ruido utilizando la presión acústica – Método de ingeniería); ISO 2151:2004 (Código de pruebas de ruido para compresores y bombas de vacío – Método de ingeniería); la directiva 2004/26/CE de la Unión Europea (Norma sobre emisiones de motores no de carretera/ Niveles de Fase III implementados de 2006 a 2013, Fase IV a partir de 2014) y la norma federal de Estados Unidos sobre emisiones de motores no de carretera. Niveles *Tier* III implementados de 2006 a 2008 y niveles *Tier* IV de 2008 a 2015 (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 136)



#### 2.23.4.4. Con respecto a las pruebas y especificaciones.

ISO 1217:2009 (Compresores de desplazamiento. Pruebas de aceptación); ISO 7183:2007 (Secadores de aire comprimido. Especificaciones y prueba); ISO 5389:2005 (Turbocompresores. Código de prueba de rendimiento) e ISO 12500:2007. Parte 1 a 3 (Filtros de aire comprimido. Métodos de ensayo) (Atlas Copco Airpower NV 2011, p. 136)

#### 2.23.4.5. Manual de aire comprimido Atlas Copco.

Es un documento que recopila información de los principales especialistas en tecnologías de aire comprimido desde varias décadas atrás, tiene el objetivo de ofrecer productividad responsable, soluciones más fiables, sostenibles y eficientes a problemas relacionados a la industria, además imparte conocimiento buscando siempre una mayor eficiencia técnica y está dirigido a negocios, fabricantes, estudiantes universitarios, asistentes técnicos y científicos con intereses en el área del aire comprimido.

### 2.24. Simulador DWSIM.

DWSIM fue desarrollado originalmente por Daniel Medeiros, un ingeniero de procesos brasileño, en 2006, al que luego se le sumó Gregor Reichert. DWSIM es un simulador de procesos químicos. Su entorno permite crear modelos termodinámicos, unidades de operaciones y entre otras tantas funciones. Su funcionalidad central es usada para balances de masa y energía de estado estacionario. Es fácil de usar, fácil de informar y los tiempos de convergencia son buenos. Una ventaja de ser de código abierto es que los cálculos pueden ser más transparentes para el usuario al momento de aprender y verificar.

DWSIM es capaz de simular el estado de equilibrio entre: el vapor-líquido, líquido-vapor-líquido, sólido-líquido y los procesos de equilibrio de electrolitos acuosos con varios modelos termodinámicos y operaciones unitarias además de contar con una interfaz gráfica fácil de usar. Sus cualidades de interés son descritas a continuación (DWSIM 2020).

- **Modelos termodinámicos:** GERG-2008, PC-SAFT, *CoolProp*, Peng-Robinson, Peng-Robinson (1978), *Soave-Redlich-Kwong*, *Lee-Kesler*, *Lee-Kesler-Plöcker*, UNIFAC, UNIFAC modificado, UNIQUAC, NRTL, *Chao-Seader*, Grayson-Streed, Ley de Raoult, Tablas de vapor IAPWS-IF97, Agua de mar IAPWS-08, Aceite negro, Agua amarga y Electrolitos acuosos.

- **Operaciones unitarias:** En las operaciones unitarias se tiene a Mezcladores, Cajas de separación, bomba, compresor, expansiones, calefacciones, radiadores, válvulas, segmento de tubería, columna de acceso directo, intercambiadores de calor, reactores, columnas de destilación simple y de reflujo, separadores de componentes, separadores de sólidos, *cake-filtration* continua y la placa orificio.
- **Utilidades:** Entre sus utilidades se tiene a los cálculos de hidratación, punto crítico, tamaño de recipiente, hoja de cálculo y propiedades de flujo frío del petróleo.
- **Análisis de proceso:** Los análisis de procesos presentes en DWSIM son la utilidad de análisis sobre sensibilidad y la optimización restringida multivariada.
- **Extras:** Sistema de *Scripting* y complementos de interfaz (DWSIM 2020)

### 2.25. Ley de Raoult, paquete de propiedades.

El paquete de propiedades consiste en un conjunto de métodos y modelos para el tratamiento de la información sobre las propiedades físicas y químicas de las corrientes de materia en la simulación. Formado de un modelo termodinámico, una ecuación de estado o un modelo combinado y los métodos para el cálculo de sus múltiples propiedades termodinámicas.

“*Raoult’s Law property package*” según DWSIM simulator es idóneo usarlo en mezcla de gases no polares ideales en fase líquida y gaseosa a presiones bajas. Dado que el aire atmosférico es una mezcla de gases ideales que no reaccionan entre ellos, pero que adicional contiene vapor de agua, que este puede o no sufrir cambio de fases según varíen sus propiedades termodinámicas se puede considerar como una mezcla en equilibrio Líquido-Vapor que se encuentra dentro del límite para la simulación (DWSIM 2020).

La Ley de Raoult es aplicable en las disoluciones ideales, es decir que están formadas por moléculas tan semejantes que, si una molécula de un componente reemplaza a otra molécula de diferente soluto, no produce variación de su volumen y tampoco produce variación en la energía de la interacción intermolecular (Atarés Huerta 2016).

La ecuación de estado a la que se rige es:

$$P_i = x_i^L \times P_i^* \quad (19)$$

Donde:

$P_i$  : Presión parcial de i en el vapor en la disolución en equilibrio

$x_i^L$  : Fracción molar de i en la disolución líquida

$P_i^*$  : Presión de vapor del líquido i puro.

Se puede notar que es semejante a la Ecuación (3) de la humedad relativa, con presiones parciales.

Para las disoluciones ideales se consideran las propiedades como la temperatura y la presión que son constantes, dando las siguientes reglas:

- La disolución no sufre cambios de volumen.
- Su energía interna permanece constante
- La variación de la entalpía de la mezcla es nula.
- La variación de la entropía de la mezcla es mayor a cero (Atarés Huerta 2016)

## **2.26. Operaciones unitarias de interés en DWSIM.**

Las operaciones unitarias son los pasos básicos que implica todo un proceso, donde la corriente de materia o energía que ingresan sufren una transformación química o a su vez un cambio físico.

### **2.26.1. Compresor**

Proporcionar energía a una corriente de vapor, incrementando su presión. El proceso ideal es isoentrópico, el no ideal considera la eficiencia del compresor y la trayectoria termodinámica.

#### *2.26.1.1. Parámetros de entrada.*

Como parámetros de entrada se tiene:

- **Delta P:** Cambio de presión en el equipo
- **Eficiencia:** Eficiencia adiabática/politrópica

- **Ignorar líquido en la corriente de entrada:** Determina si la calculadora debe ignorar cualquier líquido en la corriente de entrada
- **Ruta termodinámica:** Seleccione la ruta termodinámica de acuerdo con los datos experimentales o de campo disponibles (Medeiros 2020, p. 74).

#### 2.26.1.2. Método de cálculo

La potencia isoentrópica o politrópica se calcula a partir de:

$$P = \frac{H_{2s} - H_1}{\eta} \times W \quad (20)$$

Donde:

P: Potencia del compresor.

$H_{2s}$  : Entalpia de salida para procesos isoentrópicos.

$H_1$  : Entalpia de ingreso.

$W$  : Flujo másico.

$\eta$  : Eficiencia adiabática o politrópica.

#### 2.26.2. Enfriador (Cooler).

El enfriador simula un proceso de enfriamiento por corrientes.

##### 2.26.2.1. Parámetros de entrada.

Como parámetros de entrada se tiene:

- **Caída de presión:** Caída de presión en el enfriador
- **Calor eliminado:** Cantidad de calor eliminada por el enfriador
- **Eficiencia:** Eficiencia considerada para el enfriador.

#### 2.26.2.2. Método de cálculo.

La temperatura de la corriente de salida se calcula a través de un PH Flash (rutina de código en lenguaje de programación), donde la entalpía de la corriente de salida se calcula mediante un balance de energía en el enfriador (Medeiros 2020, p. 76).

#### 2.26.2.3. Parámetros de salida.

Como parámetro de salida, únicamente se tiene:

- **Delta-T:** Caída de temperatura observada por el proceso de enfriamiento.

#### 2.26.3. Separador de componentes.

En la presente operación unitaria los componentes están separados entre dos corrientes, especificadas con fracciones o tasas de flujo absolutas. Para proseguir se calcula el balance energético tras la separación.

##### 2.26.3.1. Parámetros de entrada

Como parámetros de entrada se tiene:

- **Secuencia especificada:** Establece la secuencia a la que se aplicarán las especificaciones de separación. "0" corresponde al primer flujo de salida (salida superior) y "1" corresponde al flujo de salida (salida del fondo) (Medeiros 2020, p. 81)

##### 2.26.3.2. Resultados

Los resultados que presenta son:

- **Desequilibrio energético:** Diferencia entre la entalpía de las corrientes de entrada y salida.

#### **2.26.4. Segmento de tubería.**

La operación unitaria segmento de tubería se puede utilizar para simular el proceso del flujo de un fluido a través de una tubería. El segmento de tubería se divide en secciones, que pueden ser tubos rectos, válvulas, codos, etc.

##### *2.26.4.1. Parámetros de entrada*

Como parámetro de entrada se tiene:

- **Perfil hidráulico:** En el editor de perfil hidráulico de tubería se puede agregar secciones, definir su tipo, los incrementos usado en los cálculos, el material de la tubería, la longitud, su elevación y los diámetros interno y externo.
- **Correlación de caída de presión:** Se debe seleccionar el modelo que se utilizará para el cálculo de la caída de presión en el segmento de tubería (Medeiros 2020, p. 71)

##### *2.26.4.2. Método de cálculo*

Se calcula en base a balances en incremento de masa y energía. El algoritmo completo consta de tres bucles anidados. El bucle externo itera en las secciones, el bucle medio itera sobre la temperatura y el bucle interno calcula la presión. La presión y la temperatura se calculan de la siguiente manera (Medeiros 2020, p. 72):

- La temperatura y la presión de entrada se utilizan para estimar el incremento de la presión
- Las propiedades del fluido se calculan con base en una media aritmética de las condiciones de entrada y salida.
- Las propiedades calculadas y la presión de entrada se utilizan para calcular la caída de presión. calculando la presión final.
- Se comparan las presiones calculadas y estimadas, y si su diferencia excede la tolerancia, se estima una nueva presión de salida y se repiten los pasos 2 y 3.
- Cuando la presión y la temperatura concluyen, los resultados se pasan al siguiente incremento, donde se reinicia el cálculo (Medeiros 2020, p. 72).

#### 2.26.4.3. *Parámetros de salida*

Para los parámetros de salida se tiene:

- **Delta-P:** Variación de presión en el segmento de tubería
- **Tabla de resultados:** Los resultados se muestran sección por sección en una tabla
- **Gráfico de resultados:** Un gráfico muestra los perfiles de temperatura, presión, retención de líquido, velocidad y calor intercambiados.

#### 2.26.5. *Válvula.*

La válvula funciona como una caída de presión fija, donde las propiedades de la corriente de la materia de salida se calculan teniendo en cuenta el principio de que la expansión es un proceso isoentálpico.

##### 2.26.5.1. *Parámetros de entrada*

El parámetro de entrada es:

- **Caída de presión:** Diferencia de presión entre las corrientes de salida y entrada.

##### 2.26.5.2. *Método de cálculo*

La presión de la corriente de salida se calcula a partir de la presión de entrada y la caída de presión.

La temperatura de la corriente de salida se halla haciendo un PH Flash. (Medeiros 2020, p. 73)

##### 2.26.5.3. *Parámetros de salida*

El parámetro de salida es:

- **Delta-P:** Caída de presión observada en el proceso de expansión de la válvula.

### **2.26.6. Divisor.**

El divisor fracciona una corriente de materia en otras dos corrientes, usando el balance de masas.

#### *2.26.6.1. Parámetros de entrada*

El parámetro de entrada es:

- **Fracciones de flujo:** Define la fracción de flujo másico que se pasará a cada flujo de salida en el divisor. Cada fracción debe tener un valor entre 0-1 y la suma total no debe ser mayor que 1 (Medeiros 2020, p. 70)

#### *2.26.6.2. Parámetros de salida*

No presentan parámetros de salida.



## CAPITULO III

### 3. DIAGNOSTICO SITUACIONAL DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO EN LA FÁBRICA Y DISEÑO DE LA RED DE AIRE COMPRIMIDO

#### 3.1. Estado actual de la red de aire comprimido

En primer lugar, la red actual de aire comprimido carece de información en general, ya que no cuenta con los planos estructurales y mucho menos de la línea de aire. Se hizo de forma inminente un levantamiento general de la red de aire comprimido. Cabe mencionar que en este proceso se invirtió gran parte de tiempo, las medidas reales se obtuvieron en campo, persiguiendo a pie las cañerías de aire que, además, no poseen normalización de tonos de pinturas bajo la norma técnica ecuatoriana INEN 440:1984, que define los colores, significado y aplicación que deben usarse para identificar tuberías que transportan fluidos, en instalaciones en tierra y a bordo de barcos.

Para tener en consideración el color de las cañerías bajo la norma INEN 440:1984 se presenta la siguiente tabla:

**Tabla 1-3:** Clasificación de Fluidos según la norma NTE INEN 440:1984

CLASE	COLORACIÓN	FLUIDO
1	Verde	Agua
2	Plata-gris	Vapor de agua
3	Azul	Aire y oxígeno
4	amarillo ocre	Gases combustibles
5	amarillo ocre	Gases no combustibles
6	Anaranjado	Ácidos
7	Violeta	Álcalis
8	Café	Líquidos combustibles
9	Negro	Líquidos no combustibles
0	Gris	Vacío
-	rojo de seguridad	Agua o vapor contra incendios
-	blanco	GLP (gas licuado de petróleo)

Fuente: (INEN 2010, p. 2)

### 3.1.1. Área del compresor.

OFAHER Factory cuenta con una red improvisada de aire comprimido desde el año 2015. El área del compresor se ubica en el exterior del taller junto a la puerta de ingreso, cuenta con 1 compresor de pistón de doble etapa marca BALMA con un depósito de 500 litros de capacidad, accionado por correas, modelo NS59S/500 T 7.5, con funcionamiento eléctrico y a primera impresión no silencioso.

El compresor utilizado tiene un caudal de admisión de 1900 litros por minuto, un motor de 7,5 [HP] de potencia, conexión eléctrica trifásica, puede entregar 11 [bar] o 160 [psi] de presión. (Ver Figura 1-3.)

Modèle/Model	Code	Groupe Pumps	F C			HP	kW	Vitesse rpm	Volt/Hz	Phases	bar	psi	mm	kg
			L/Lt	l/min	cfm									
NS29S/500 T 4	4116019532	NS29S	500 F	1028	36,30	4+4	3+3	1400	400/50	3	11	160	2070x680x1300	304
NS39/500 T 5,5	4116019439	NS39	500 F	1300	45,91	5,5+5,5	4,1+4,1	1000	400/50	3	11	160	2070x680x1300	400
NS59S/500 T 7,5	4116020098	NS59S	500 F	1900	67,10	7,5+7,5	5,5+5,5	750	400/50	3	11	160	2450x660x1400	406
NS59S/500 T 10	4116020101	NS59S	500 F	2420	85,46	10+10	7,5+7,5	950	400/50	3	11	160	2450x660x1400	426
NS59S/900 T 10	4116020009	NS59S	900 F	2420	85,46	10+10	7,5+7,5	950	400/50	3	11	160	2650x950x1770	586
NS6000/500 YD 15 bar	4116020250	NS6000	500 F	570	20,13	7,5	5,5	1000	400/50 $\Delta$	3	15	218	2030x680x1400	290
NS7000/500 YD 15 bar	4116020861	NS7000	500 F	930	32,84	10	7,5	1000	400/50 $\Delta$	3	15	218	2030x680x1400	305

**Figura 1-3:** Datos principales del compresor BALMA NS59S/500 T 7.5

Fuente: (BALMA 2017, p. 30)

Dado que el compresor fue diseñado para trabajar en Europa con una frecuencia de 50 [Hz] y a 400 [V] trifásico, y en la planta se tiene a 60 [Hz] y 220 [V], esto provoca que el motor pierda potencia y la presión de salida decaiga.

### 3.1.2. Presión de trabajo.

La presión a la que la red neumática actual de la empresa OFÁHER trabaja es a 120 [psi].

### 3.1.3. Caída de presión admisible.

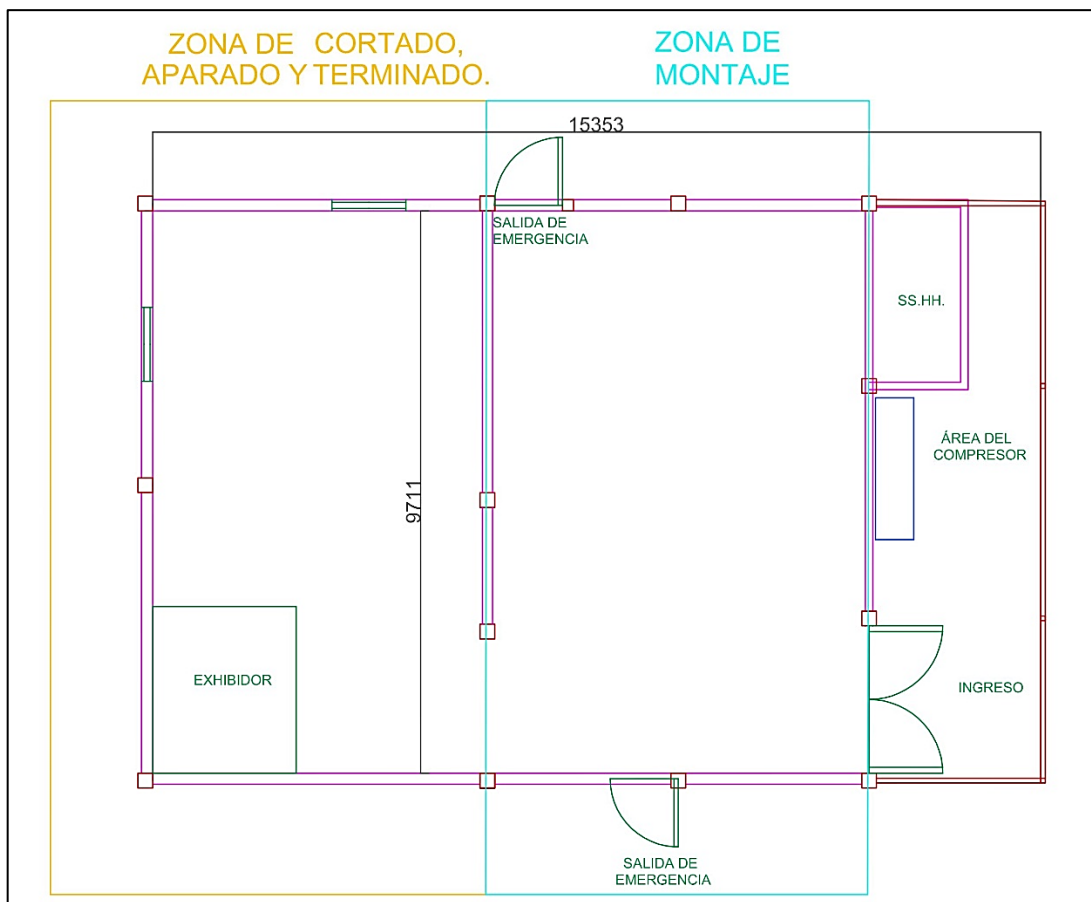
La caída de presión aceptable en el funcionamiento del sistema es del 5 %, según los requerimientos de la empresa.

### 3.1.4. Fugas en el sistema de aire comprimido actual.

Una red de aire comprimido para ser considerada útil y eficaz, debe tener una caída de presión mínima, así mismo debe carecer de fugas en las tuberías. Bajo una inspección y recorrido minucioso sobre la red de distribución de aire comprimido se confirmó que no presenta fugas el sistema.

### 3.1.5. Distribución de la planta.

La fábrica OFAHER internamente tiene un espacio de 15 x 10 metros aproximadamente, cuenta con una distribución principal de dos zonas, siendo estas: zona de montaje y la zona de cortado, aparado y terminado. Además, el área del compresor se ubica fuera de la planta, aparte de ello, tiene un espacio destinado a mostrar sus productos en cuero dentro de la segunda zona. La puerta de ingreso está ubicada al sureste de la fábrica y también tiene dos salidas de emergencia. (Figura 2-3)



**Figura 2-3:** Distribución de la fábrica OFAHER.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.1.6. Levantamiento isométrico de la red de aire comprimido actual

Del levantamiento isométrico se obtiene las siguientes características de la red de aire comprimido actual, tales como:

- La red de distribución para aire comprimido está elaborada con tubería de acero galvanizado, aparte de ello posee una disposición tipo abierta.
- Cuenta con una tubería vertical de diámetro de 1 ¼” que parte desde la zona del compresor hacia la zona de montaje, dividiéndose inicialmente para una toma de aire de ½” a en la zona para pintura en el exterior de la planta, continua por una división a través de una Tee hacia las tuberías de distribución de 1 ¼” para la zona de montaje y tubería de ½” con dirección a la zona de cortado, aparado y terminado.
- Las tuberías de servicio tienen un diámetro de ½ de pulgada, conectadas a una válvula de esfera y terminan en acoples rápidos.



**Figura 3-3:** Tubería vertical de diámetro 1 ¼”

Realizado por: Macas Alex, 2021.



**Figura 4-3:** Tuberías de distribución en 1 ¼” de diámetro.

Realizado por: Macas Alex, 2021.



**Figura 5-3:** Tubería de distribución con diámetro de ½”, con dirección a la siguiente zona

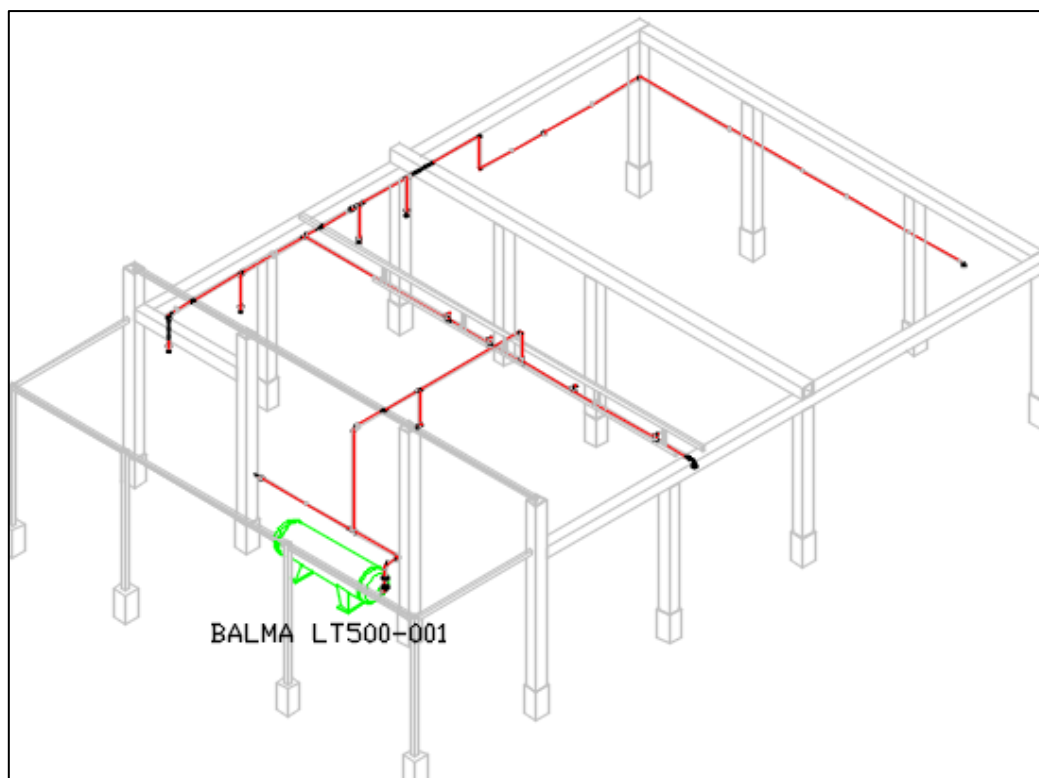
Realizado por: Macas Alex, 2021.



**Figura 6-3:** Tubería de servicio de diámetro de  $\frac{1}{2}$ ".

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

El levantamiento isométrico sobre la red de aire comprimido se presenta en forma resumida en la siguiente figura.



**Figura 7-3:** Esquema Isométrico de la actual red de aire comprimido en la fábrica OFAHER.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.1.7. *Condensado.*

Una observación importante sobre la red actual de aire comprimido es que al ser del tipo abierto y no tener pendientes no cuenta con el desfogue óptimo de condensados, y que además no posee ningún tipo de purgas, es decir que posiblemente el condensado esté ingresando a la línea de aire y a los equipos conectados.

### 3.1.8. *Secador de aire.*

La red actual de aire comprimido de la fábrica no tiene conectado ningún secador de aire, sin embargo, en reparación, existe un secador frigorífico KAESER TA 8.



**Figura 8-3:** Secador de aire comprimido de la fábrica, sin instalación.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

<b>KAESER KOMPRESSOREN</b>		Typ/Model/Type/Typo/Modelo/Type	TA 8
KAESER KOMPRESSOREN GmbH Carl-Kaaser-Strasse 26 D-96450 Coburg Germany Tel.: (09561) 640-0 Fax (09561) 640-130		Artikel-Nr./Part-No./Réfarence/Codice/Artículo-Nº/ Artikel-Nr.	117902.20010
		Baujahr/Year/Année de fabrication/Anno/Año de construcción/Bouwjaar	1997
		Serien-Nr./Serial No./No. de série/N. di Matricola/Nº de Matricula/Serienr.	081367
Kältesystem/Refrigerant system/Système frigorifique/Circuito refrigerante/Circuito frigorífico/Koelsysteem	Kältemittel/Refrigerant/Système frigorifique/Agente frigorifique/Koelmiddel		R 22
		Füllgewicht/Charge/Charge/Carica/Peso de relleno/Wulgewicht	0,300 kg
		Betriebedruck HD/Working pressure HP/Pression de fonctionnement NP/Pressione AP/Presión de trabajo AP/Bedrijfsdruk HD	2,5 bar
			1,6 bar
Luftsystem/Air system/Système d'air/Circuito aere/Circuito de aire/Luchtsysteem	Betriebedruck/Working pressure/Pression de fonctionnement/Pressione di esercizio/Presión de trabajo/Bedrijfsdruk		1,6 bar
E-Anschluß/Electrical supply/Alimentation électrique/Alimentación eléctrica/Elctriche aansluiting	Nennspannung/Rated voltage/Tension nominale/Tensione nominale/Tensión nominal/Nominale spanning	230 V	<input type="checkbox"/> 1- <input type="checkbox"/> 3-
		Frequenz/Frequency/Frequence/Frequencia/Frequentie	50 Hz
		Nennstrom/Rated current/Courant nominal/Corrente nominale/Corriente nominal/Nominale stroom	2,5 A
Umgebungstemperatur/Ambient temperature/Temperature ambiante/Temperatur ambiente/Temperatur ambiente/Omgevingstemperatuur		min. 5 °C / max. 43 °C	
Dichtheit geprüft/Leakproof/Etanchéité testée/Ermetico/Hermetico/Dichtheid getest			

**Figura 9-3:** Placa informativa del secador.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.1.9. Acumulador.

En la red actual de aire comprimido de la fábrica OFAHER únicamente cuenta con el depósito de aire que viene con el compresor BALMA NS59S/500 T 7.5, que tiene una capacidad de 500 litros, cuenta



con su manómetro, presostato, válvula de seguridad y llave para purga. Como depósitos de aire intermedios o acumuladores no cuenta con ninguno adicional en su red.

### **3.2. Necesidades y requerimientos de consumidores de aire comprimido en la planta.**

#### **3.2.1. Identificación de usuarios.**

Los datos de operación fueron proporcionados por la empresa, obtenidos de los manuales y fichas técnicas propiedades de dicha fábrica.

##### **3.2.1.1. Prensa IRONFOX AS 1800:**

La máquina IRONFOX AS 1800 es una prensa de membrana, empleada para pegar las plantas al calzado, tiene como actuador neumático un cilindro de doble efecto que es usado para el ascenso y descenso del estuche metálico que tiene la membrana en su interior. Se opera de manera semiautomática y su presión absoluta de trabajo es de 490,166 [KPa] (4,90 [bar]). Se dispone de una unidad en toda la fábrica.



**Figura 10-3:** Prensa IRONFOX AS 1800.

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.2. Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025.

La grapadora es usada en la fabricación de calzado para sujetar la plantilla de cartón prensado a la base de la horma con el corte ya montado para su posterior plantado, el aire comprimido es para forzar la grapa fuera de la maquina a la superficie deseada. Su presión absoluta es de 620,528 [KPa] (6,21 [bar]).



**Figura 11-3:** Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025.

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.3. Rayadora de contorno de suelas.

La presente máquina sirve para marcar en el corte montado la referencia de la suela a unir, ya sea con bolígrafos o rayadores, este proceso es usado para conocer la zona a desbastar del cuero o a cardar dejándola preparada para añadir el pegamento. Cuenta con dos cilindros neumáticos, un cojín inflable que sirven de sujeción para el calzado y un cilindro principal que desciende la horquilla a través de una válvula de pedal con enclavamiento. Su presión absoluta es de 752,856 [KPa] (7,52 [bar]).



**Figura 12-3:** Rayadora de contorno de suelas.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

#### *3.2.1.4. Máquina para aplicar topes termoadheribles.*

Los topes termoadheribles son colocados tanto en las punteras como en los talones de los cortes, para brindar resistencia y ayudar en el termoconformado del calzado. La máquina presente sirve para añadir topes en la puntera del corte, además cuenta con un cilindro de doble acción usado como estampadora y su accionamiento es mediante pedal. Su presión absoluta es de 600 [KPa] (6 [bar]).



**Figura 13-3:** Máquina para aplicar topes termoadheribles, modelo V.

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

#### *3.2.1.5. Moldeadora de talones marca NORBA N89CF.*

La máquina NORBA N89CF es usada en el termoformado del corte, precisamente en el talón, cuenta con dos unidades de calor y frío. Tiene dos pistones de doble acción usados como prensa con accionamiento independiente de pedal y su presión absoluta es de 600 [KPa] (6 [bar]).



**Figura 14-3:** Moldeadora de talones marca NORBA N89CF

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

#### 3.2.1.6. *Planchadora de cañas de bota.*

Es utilizada para la eliminación de arrugas en las cañas de las botas, causadas por el proceso de montaje. Consta de dos moldes divididos de metal, que van dentro de la bota, junto a dos cilindros neumáticos usados para abrir y cerrar los moldes sujetando así la bota y luego pasar un rodillo aplanador por la superficie de la caña. Su presión absoluta es de 794,166 [KPa] (7,94 [bar]).



**Figura 15-3:** Planchadora de cañas de bota marca DISA

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.7. Máquina de empiolar *ADLER*.

La presente máquina de coser es usada para sobre hilar uniendo la plantilla interior a los cortes de zapatos de cuero y textil. En su accionamiento cuenta con una válvula de control marca “az 321 MT 1/8” que tiene una presión absoluta de 367,166 [KPa] (3,67 [bar]).



**Figura 16-3:** Máquina de empiolar *ADLER* y su válvula de control marca “az 321 MT 1/8”

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.8. *Repujadora.*

La repujadora es una prensa neumática semiautomática, que utiliza una cinta dorada para labrar figuras en alto relieve con ayuda de la presión y temperatura. Es una de las nuevas adquisiciones de la empresa, donde ya cuenta con su ubicación establecida, que es al final de la tubería en la zona de aparato cortado y terminado, donde anteriormente se encontraban instalada maquinaria de menor presión neumática y que ya no cuenta la empresa con ella. Su presión absoluta es de 500 [KPa] (5 [bar]).



**Figura 17-3:** Máquina repujadora.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.9. *Máquina de rayar costura y colocar cinta.*

La presente máquina junto a la repujadora son los nuevos integrantes de la fábrica de calzado. Es usada para alisar las costuras de los cortes y a su vez agregar cintas de refuerzo antes del proceso de montado. Es aplicable en los talones del calzado y botas, además tiene una presión absoluta de 500 [KPa] (5 [bar]) y su ubicación dispuesta por la empresa es junto a la maquina repujadora.



**Figura 18-3:** Máquina de rayar costura y colocar cinta  
marca FRA-COR

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

#### *3.2.1.10. Horno reactivador.*

Después de plantar el calzado se ingresa al horno reactivador para que las superficies pegadas sean secadas y reactivadas en menos tiempo en comparación a los tiempos habituales, la presión absoluta solicitada es de 600 [KPa] (6 [bar]) y cuenta con temperatura regulable e independiente para suelas y calzado.



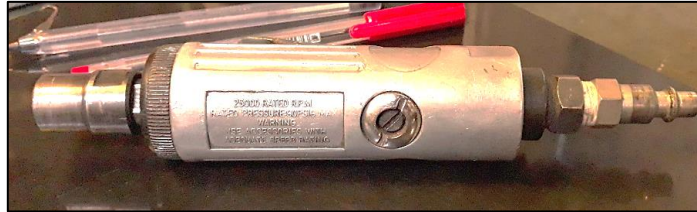
**Figura 19-3:** Horno Reactivador

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.



### 3.2.1.11. Pulidor esmeril neumático.

Es una herramienta utilizada para dar mantenimiento en la fábrica, únicamente se cuenta con un pulidor en la fábrica. Su presión de absoluta es de 620,53 KPa (6,20 bar).



**Figura 20-3:** Pulidor esmeril neumático.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.2.1.12. Pistolas sopladoras de aire.

Son usados tanto como para dar mantenimiento en la fábrica y en trabajos de pintura en el calzado. Se cuenta con 4 pistolas en total y su flujo de aire es dosificable. Su presión absoluta es de 600 KPa (6 bar).



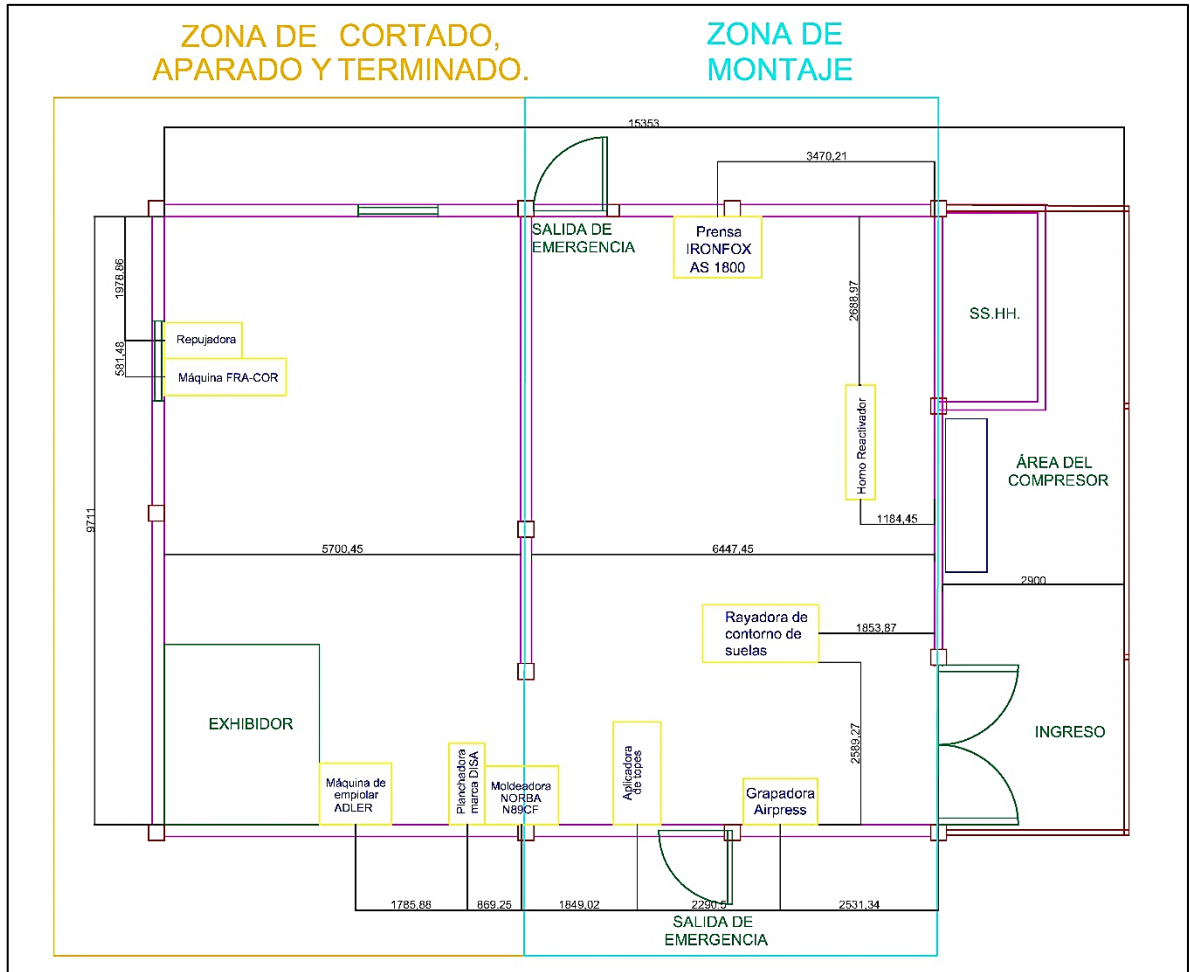
**Figura 21-3:** Pistolas sopladoras de aire para pintura.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.2.2. Ubicación de los consumidores de aire.

Como fue descrito anteriormente la planta se divide en dos grandes zonas siendo estas la zona de montaje y la zona de cortado, aparado y terminado. Las ubicaciones y delimitaciones de las máquinas se han podido medir dentro de la fábrica, dando a conocer que existen 10 máquinas neumáticas, y 2 tipos de herramientas con aire comprimido en toda la fábrica hasta el presente levantamiento de

información. Además, la ubicación de la línea de producción de calzado no es fija, puede variar según los modelos a realizar, esto quiere decir que las máquinas se pueden reubicar en casos extremos para reducir distancias innecesarias y bajar tiempos de producción.



**Figura 22-3:** Ubicación de los consumidores de aire en la fábrica OFAHER.

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

Como se observa en la Figura 22-3, en la zona de montaje se encuentra la prensa IRONFOX AS 1800, el horno reactivador, la máquina rayadora de suelas, la grapadora Airpress y la máquina para aplicar toques termoadheribles, por el contrario, en la zona de cortado, aparado y terminado se ubican la planchadora de cañas de botas marca DISA, la máquina de empiolar ADLER, adicional a estas se encuentran las dos nuevas adquisiciones que son la máquina de rayar costura marca FRA-COR y la repujadora. En la mitad de las dos zonas se ubica la moldeadora de talones marca NORBA N89CF. En conclusión, la mayor parte de las máquinas se encuentran a los extremos de las zonas, dejando así un espacio libre en el centro para circulación de los trabajadores.

### 3.2.3. Necesidades particulares de máquinas y herramientas.

La maquinaria neumática que posee la Fabrica OFAHER únicamente necesita aire comprimido estable y disponible las 24 horas, ya que cada elemento cuenta con su zona delimitada y sus conexiones eléctricas consignadas, cabe mencionar que cada consumidor de aire cuenta con su propia unidad de acondicionamiento neumático en la toma de aire comprimido, excepto las herramientas que son las pistolas sopladoras y el pulidor.

### 3.2.4. Consumos de equipos y herramientas neumáticas.

Con el uso de la Ley general del estado gaseoso (1) se puede determinar el volumen actual, con condiciones de la localidad (temperatura y presión) y el volumen real del aire ya comprimido y enfriado, antes de ingresar al sistema de tuberías para su distribución.

$$\frac{P_2 \times V_2}{T_2} = \frac{P_1 \times V_1}{T_1} = R_i$$

Si al estado inicial o 1 se entiende como las condiciones estándares, al estado final o 2 como condiciones actuales y se procede a despejar el volumen actual y dividirlo para el tiempo, se obtiene la ecuación del caudal actual, presentada a continuación:

$$Q_{act} = \frac{P_{std} \times Q_{std} \times T_{act}}{T_{std} \times P_{act}} \quad (21)$$

Donde:

$Q_{act}$  : Caudal FAD a condiciones actuales

$P_{std}$  : Presión estándar

$Q_{std}$  : Caudal FAD estándar

$T_{act}$  : Temperatura a condiciones actuales

$T_{std}$  : Temperatura estándar

$P_{act}$  : Presión atmosférica a la altura de operación

Para la prensa, IRONFOX AS 1800, su caudal de aire FAD estándar es de 0,0015 [ $m^3/s$ ] entonces usando la ecuación (21) se tiene:

$$Q_{act} = \frac{100 \text{ [KPa]} \times 0,0015 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \times 289,55 \text{ [K]}}{293,15 \text{ [K]} \times 76,74 \text{ [KPa]}}$$

$$Q_{act} = 0,0019 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

La prensa, IRONFOX AS 1800, necesita un caudal FAD actual de 0,0019 [m<sup>3</sup>/s]

En otro caso, con la ley general del estado gaseoso (1), se considera al estado inicial o 1 como las condiciones actuales y al estado final o 2 como condiciones reales. Luego, se despeja el volumen real y se divide para el tiempo, concluyendo con la ecuación del caudal real, presentada a continuación:

$$Q_r = \frac{P_{act} \times Q_{act} \times T_r}{T_{act} \times P_r} \quad (22)$$

Donde:

$Q_r$  : Caudal real de flujo comprimido

$P_{act}$  : Presión atmosférica a la altura de operación

$Q_{act}$  : Caudal FAD actual

$T_r$  : Temperatura real de operación a la descarga

$T_{act}$  : Temperatura a condiciones actuales

$P_r$  : Presión real de operación

Para la prensa, IRONFOX AS 1800, su caudal de aire FAD actual calculado es de 0,0019 [m<sup>3</sup>/s] entonces usando la ecuación (22) se tiene:

$$Q_r = \frac{76,74 \text{ [KPa]} \times 0,0019 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \times 294,55 \text{ [K]}}{289,55 \text{ [K]} \times 1100 \text{ [KPa]}}$$

$$Q_r = 0,000137 \frac{m^3}{s}$$

La prensa, IRONFOX AS 1800, necesita un caudal real del flujo comprimido de 0,000137 [m<sup>3</sup>/s]

La demanda de aire de los equipos instalados en la fábrica OFAHER se obtuvo de los manuales y catálogos proporcionados por el fabricante, sus caudales actuales y reales fueron calculados con las ecuaciones (21) y (22) respectivamente, y se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2-3:** Consumos de Equipos y herramientas neumáticas en la fábrica.

N°	Nombre del consumidor	Caudal de aire FAD Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Caudal de aire FAD Actual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal real de aire comprimido (m <sup>3</sup> /s)	Presión absoluta (bar)	Presión absoluta (KPa)	Cantidad. (u)
1	Prensa IRONFOX AS 1800	0,0015	0,0019	0,000137	4,90166	490,166	1
2	Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025	0,0004	0,0005	0,000037	6,20528	620,528	1
3	Rayadora de contorno de suelas	0,0091	0,0117	0,000831	7,52856	752,856	1
4	Máquina para aplicar topes termoadheribles, modelo V.	0,0004	0,0006	0,000040	6,00	600	1
5	Moldeadora de talones marca Norba N89CF	0,0050	0,0064	0,000457	6,00	600	1
6	Planchadora de cañas de bota marca DISA	0,0009	0,0011	0,000079	7,94166	794,166	1
7	Máquina de empiolar ADLER (válvula de control az 321 MT 1/8")	0,0092	0,0118	0,000837	3,67166	367,166	1
8	Repujadora	0,0010	0,0013	0,000091	5,00	500	1
9	Máquina de rayar costura y colocar cinta marca FRACOR	0,0025	0,0032	0,000228	5,00	500	1
10	Horno Reactivador	0,0015	0,0019	0,000137	6,00	600	1
11	Pulidor esmeril Neumático.	0,0019	0,0024	0,000172	6,2053	620,53	1
12	Pistolas Sopladoras de aire	0,0020	0,0026	0,000183	6,00	600,00	4

Realizado por: Macas Alex, 2021.

Cabe mencionar que existen cuatro pistolas sopladoras de aire, pero solo es permitido utilizar una a la vez, ya que cada una es para diferentes trabajos en la fabricación de calzado y la zona de pintura está delimitada solo para una herramienta de pintura.

La Tabla 2-3, muestra los caudales FAD actuales a las condiciones de la localidad ( $P= 76,74$  [KPa] y  $T = 289,55$  [K]) junto a sus presiones absolutas. Además, se observa la presión absoluta máxima de 794,166 KPa solicitada por la Planchadora de cañas de bota marca DISA, y a la cual debe llegar a cumplir el compresor.

### 3.3. Diseño de la red de aire comprimido

#### 3.3.1. Condiciones ambientales de la localidad

##### 3.3.1.1. Temperatura ambiente.

La temperatura promedio de la localidad (Guano), se consigue de los PLANES DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL-PDYOT obtenido de la Secretaria Técnica del Ecuador, donde expresa que el Cantón Guano presenta una variación de temperatura anual entre 6,2 [°C] hasta 16,4 [°C] con un promedio de: 12,6 [°C] (Consejo municipal del GAD Guano 2015, p. 61).

##### 3.3.1.2. Presión ambiental.

La presión Barométrica en la localidad es de 76,74 [KPa] (0,7674 [bar]) ya que la altitud del Cantón Guano es de 2280 m.s.n.m. en la Comunidad.

##### 3.3.1.3. Humedad Relativa.

La humedad relativa existente en la zona es de 72% anual y es casi constante a lo largo de todo el año (Consejo municipal del GAD Guano 2015, p. 60).

##### 3.3.1.4. Porcentajes de vapor de agua y aire seco.

Para comenzar con la simulación se debe conocer los porcentajes de aire seco y vapor, que contiene el aire del medio circundante, por lo que, se emplea la humedad relativa, para calcular la presión de vapor, pero antes se necesita la presión de saturación a la temperatura máxima.

La presión de saturación a la temperatura de 16,4 [°C] es obtenida de la interpolación de la tabla A-4 en la Termodinámica de Cengel, obteniendo un valor de 1,8831 [KPa], entonces con una humedad relativa del 72 %, se tiene (Cengel 2009, p. 914) :

De la ecuación (3), se tiene:

$$\phi_{rel} = \frac{P_v}{P_{sat}}$$

$$P_v = \phi_{rel} \times P_{sat}$$

$$P_v = 0,72 \times 1,8831 \text{ KPa} = 1,3558 \text{ KPa}$$

Dado que la Ley de Dalton menciona que la presión de una mezcla es la suma de las presiones parciales de cada constituyente, siempre y cuando sean evaluados a la misma temperatura y volumen, se tiene:  $P = P_a + P_v$ , donde P es la presión de la mezcla, es decir el aire húmedo,  $P_a$  corresponde a la presión del aire seco y  $P_v$  a la presión de vapor, entonces:

$$P_a = P - P_v \quad (23)$$

$$P_a = (76,74 - 1,3558) \text{ KPa} = 75,3842 \text{ KPa}$$

Se procede a calcular las fracciones molares, con la ecuación (5) :

$$Y_i = \frac{P_i}{P} = \frac{N_i}{N}$$

$$Y_v = \frac{P_v}{P} = \frac{1,3558 \text{ KPa}}{76,74 \text{ KPa}} = 0,0177$$

$$Y_a = \frac{P_a}{P} = \frac{75,3842 \text{ KPa}}{76,74 \text{ KPa}} = 0,9823$$

### 3.3.1.5. Determinación del caudal necesario

**Para conocer el caudal que ingresa en la simulación se parte de la sumatoria de caudales en condiciones actuales de los usuarios, multiplicándolo por el factor de simultaneidad para 12 usuarios de la**

Tabla 4-2, que es 0,68.

$$Q = 0,0455 \frac{m^3}{s} \times 0,68 = 0,0309 \frac{m^3}{s}$$

Considerando un margen de seguridad de 15 % para posteriores necesidades de aire comprimido como lo recomienda Atlas Copco Airpower NV, se tiene:

$$Q_{tot} = 0,0309 \frac{m^3}{s} \times 1,15 = 0,0356 \frac{m^3}{s}$$

Usando las ecuaciones (22) se determinar el caudal real de flujo comprimido.

$$Q_r = 0,002521 \frac{m^3}{s}$$

### 3.3.2. *Calidad del aire comprimido.*

La red de aire comprimido está destinada a proporcionar energía para el funcionamiento de diversas maquinas neumáticas de la fábrica de calzado. Cabe destacar que la mayoría de los consumidores cuenta con cilindros neumáticos, por tal razón la calidad de aire se selecciona en base a dichos consumidores.

#### 3.3.2.1. *Determinación de la calidad de aire bajo ISO 8573-1:2010.*

Según Stefan Hesse en “Aire comprimido, fuente de energía” (2002, p. 43) indica que: Para la mejor de las opciones con una eliminación prioritaria de polvo, aceite y con una pequeña porción de humedad, destinada a equipos industriales, actuadores, motores y herramientas neumáticas, se recomienda eliminar impurezas superiores a 0,3 [ $\mu$ m] y niebla de aceite superior a 99,9 %, es decir una calidad ISO 8573-1 [2,4,2] o [2,5,2] (ver Tabla 2-2). Además, hace mención que: para cilindros, válvulas, máquinas herramientas neumáticas, se admiten partículas menores a 40 [ $\mu$ m], punto de condensación del agua a 3 [°C] y 25 [mg] de aceite por metro cúbico, es decir ISO 8573-1 [3,4,5]; entonces, teniendo en cuenta que la calidad de aire requeridos en el sector alimenticio o clínicas es exentó de aceite con ISO 8573-1 [2,2,1], y es una de las calidades más exigentes de aire, se opta por una calidad ISO 8573-1 [3,4,3] para la fábrica de calzado.



### 3.3.3. *Simulación en el Software DWSIM.*

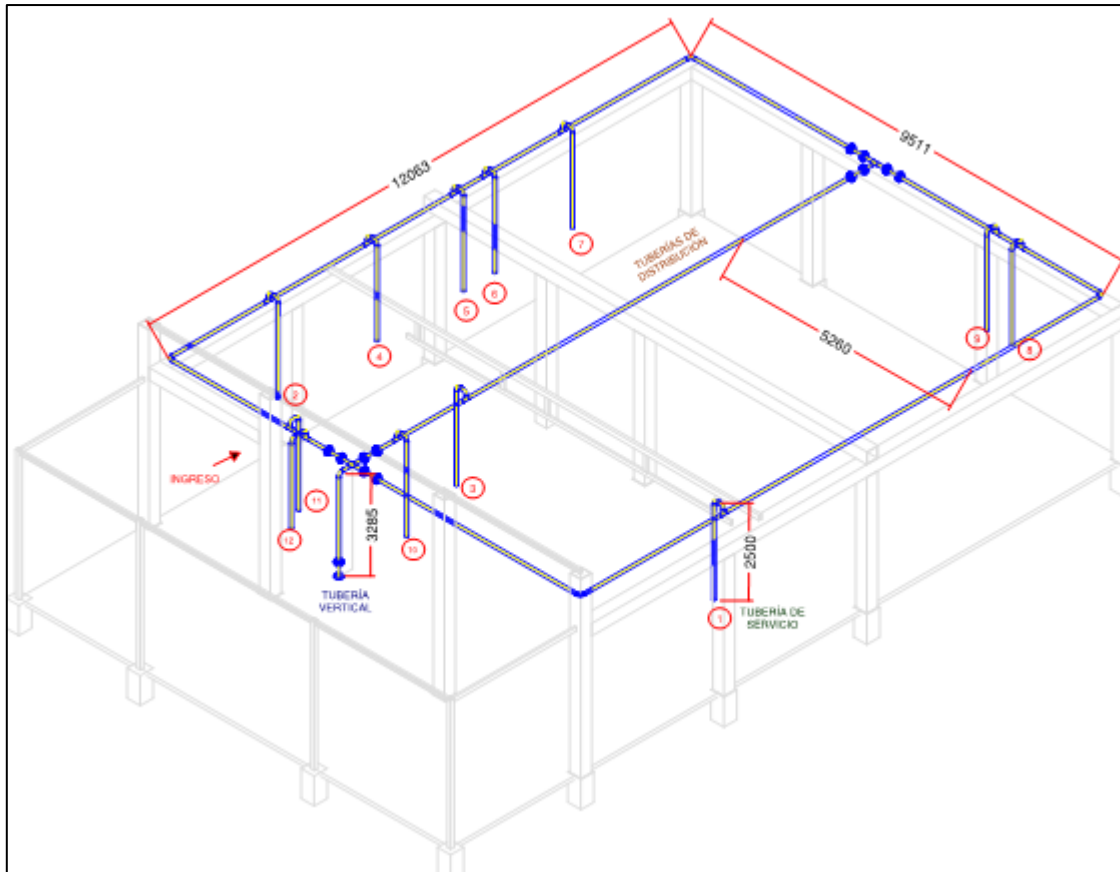
#### 3.3.3.1. *Definición del sistema.*

Para comenzar con la simulación en DWSIM se debe contar con las condiciones a las cuales va a estar regido el sistema. Las condiciones son:

- **Estado estacionario:** Las propiedades calculadas son independientes del tiempo.
- **Procesos adiabáticos:** Se considera que los procesos termodinámicos a simular son adiabáticos.
- **Equilibrio mecánico:** La configuración de las cañerías para la distribución del aire comprimido, se encuentran en equilibrio mecánico, es decir, todas las partes del mismo grupo o sistema de tuberías ya sean verticales, de distribución o de servicio, se encuentra a igual presión de su sistema.
- Pérdidas de presión en elementos son insignificantes.

#### 3.3.3.2. *Formulación del modelo.*

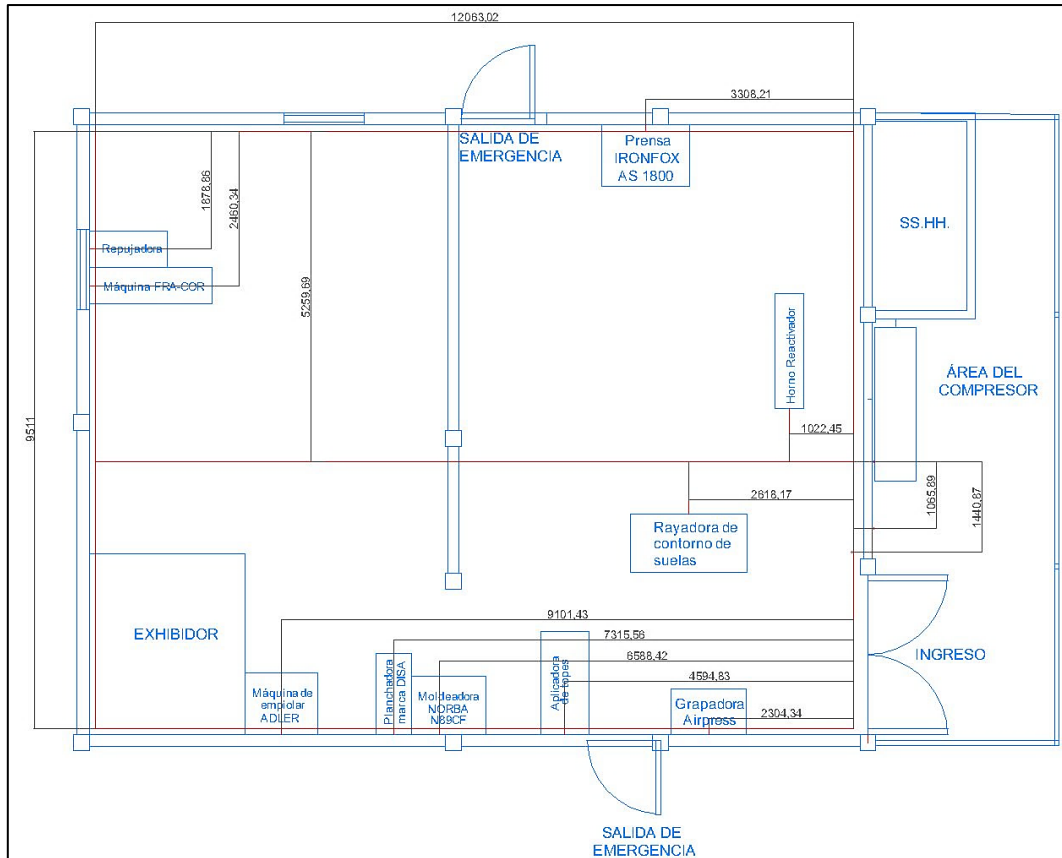
Para formular el modelo, se debe tener de referencia o elegido previamente la mejor distribución de aire comprimido, Según KAESER COMPRESORES en “Técnica de aire comprimido” (2010, p. 24), una distribución mixta o entrelazada es la más óptima tanto para sanear la red como por todas sus ventajas y desventajas que presenta, por lo que se ha optado este modelo en cuanto a las tuberías y es de suma ayuda tener un ruteado previo.



**Figura 23-3:** Distribución entrelazada de aire comprimido en la fábrica.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

En la Figura 23-3 se puede observar que la distribución de aire comprimido empieza con una tubería vertical que parte desde el área del compresor a través de una válvula de esfera hasta una longitud de 3,285 [m]; luego su distribución continua por dos anillos con tres caminos en las cuales se encuentran válvulas de esfera para poder individualizar la distribución del fluido, finalmente a través “de cuellos de cisne” se llega a los consumidores de aire comprimido, que están numerados según la Tabla 2-3.

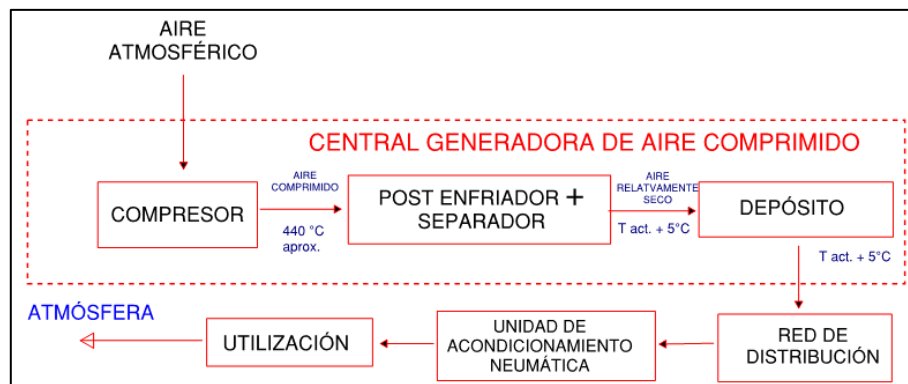


**Figura 24-3:** Longitudes en mm para la distribución entrelazada de aire comprimido.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

De la Figura 24-3 se obtiene las longitudes en milímetros de las tuberías a ser usadas en la simulación para el cálculo de caída de presión por longitud de tubería.

El modelo termodinámico del proceso de producción de aire comprimido se describe a continuación.



**Figura 25-3:** Procesos de la central generadora de aire comprimido.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

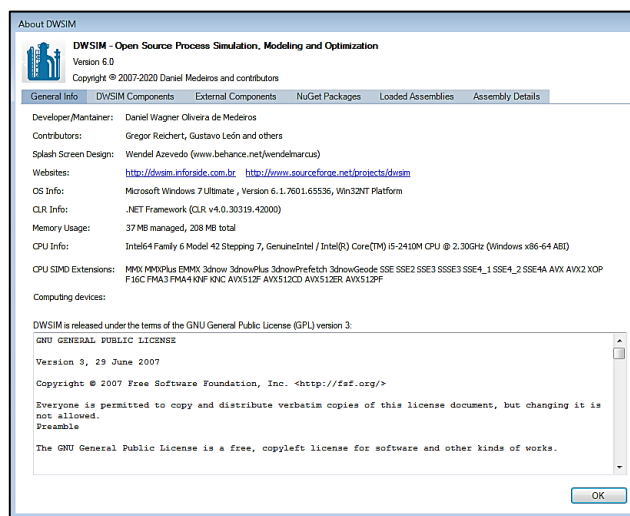
El proceso de producción de aire comprimido como se puede observar en la Figura 25-3, comienza desde el aire atmosférico, que también es considerado aire húmedo, ingresando al compresor para obtener el aire comprimido con una temperatura de 440 [°C] aproximadamente y a la presión deseada que en este caso es de 1100 [KPa] ( presión que entrega el compresor), luego continua al post enfriador y separador donde su temperatura disminuye hasta quedar solo 5 [°C] por encima de la temperatura actual (16,4 [°C]), después prosigue al depósito donde solamente sirve de acumulación y no sufren cambios significativos sus propiedades físicas, para finalmente dirigirse a la red de distribución hasta llegar a los usuarios, ser utilizado y luego volver a la atmosfera.

### 3.4. Implementación del modelo.

En el simulador DWSIM se utiliza el apartado de *Process Modeling* o modelado de procesos, cargando en el asistente de configuración de simulación los componentes aire y agua que se encuentran como *Air* y *Water*. En la selección del paquete de propiedades se opta por la Ley de Raoult o *Raoult's Law* junto a un sistema de unidades internacionales.

#### 3.4.1. Modelado en DWSIM simulator

La versión usada es “DWSIM - *Open Source Process Simulation. Modelling and Optimization*, versión 6.0, 2007-2020”

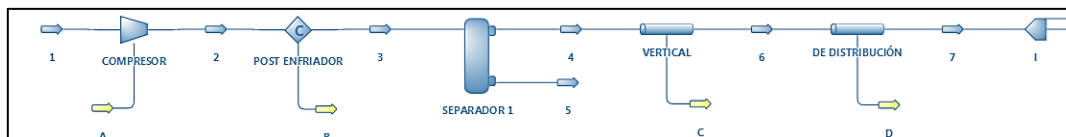


**Figura 26-3:** Información de la versión del simulador DWSIM empleado.

**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

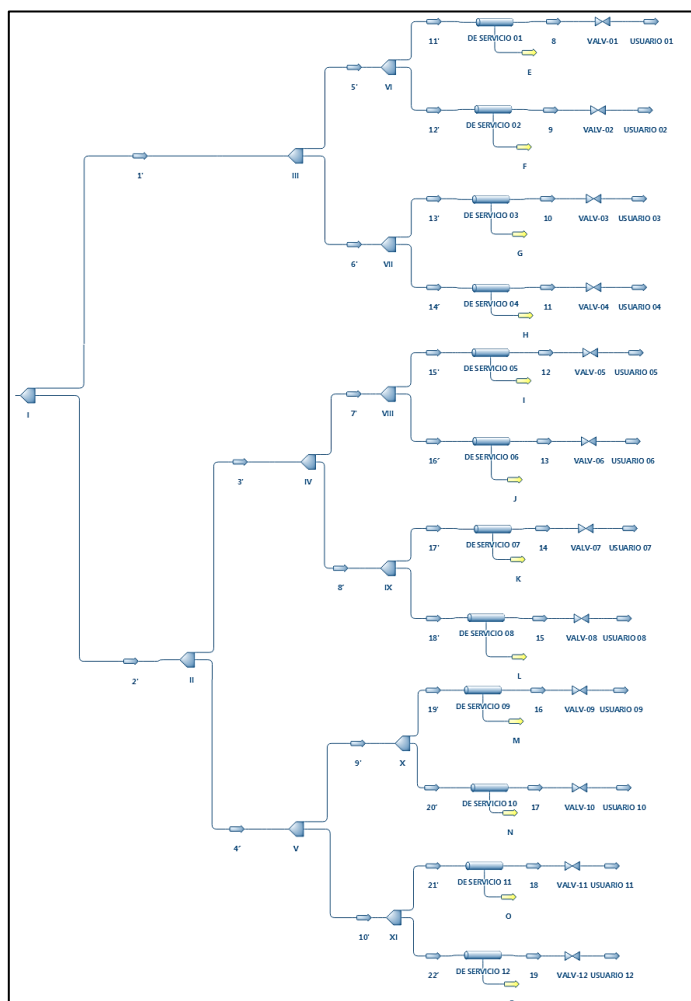
Luego de agregar los componentes, seleccionar el paquete de datos junto a las unidades, se procede a añadir las corrientes de materia y energía junto a las operaciones unitarias, tal como se muestra a continuación (ver ANEXO D).



**Figura 27-3:** Corrientes de materia, energía y operaciones unitarias usadas en la simulación (1era Parte).

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021.



**Figura 28-4:** Corrientes de materia, energía y operaciones unitarias usadas en la simulación (2da Parte).

Fuente: DWSIM

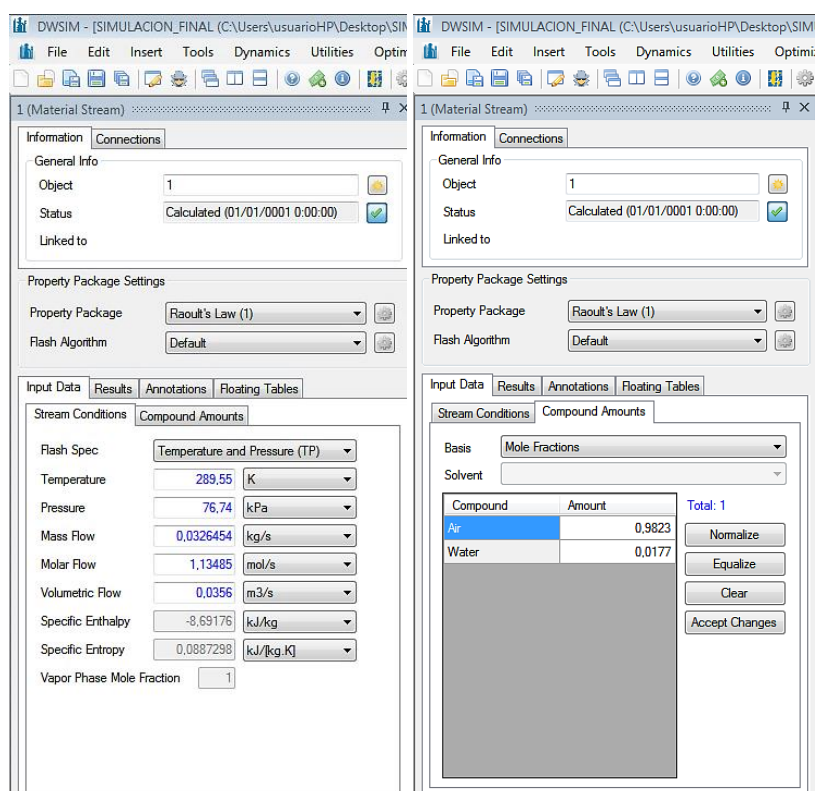
Realizado por: Macas Rivera Alex, 2020.

La Figura 27-3 y Figura 28-3, muestran todas las corrientes de materia y energía que hay en la central generadora de aire comprimido de acuerdo con la Figura 25-3, incluido el sistema de tuberías para su distribución a 12 usuarios.

Los grupos de tuberías empleados en la distribución de aire comprimido son simulados en diferentes operaciones unitarias llamadas segmentos de Tuberías, ya que cuentan con desiguales características y por la razón de que se pueda cambiar el diámetro de tubería fácilmente en cada grupo.

### 3.4.2. Configuración del estado inicial 01

En la corriente de materia “01” como método de entrada se selecciona *Temperature and Pressure* para ingresar  $T = 289,55$  [K],  $P = 76,74$  [kPa] (condiciones actuales) y de flujo volumétrico  $0,0356$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. Adicional a esto, las fracciones molares de los componentes del vapor de agua ( $0,0177$ ) y aire seco ( $0,9823$ ) calculadas en el apartado 3.3.1.4 que son ingresadas en la pestaña *Compound Amounts*, como se muestra en la Figura 29-3.



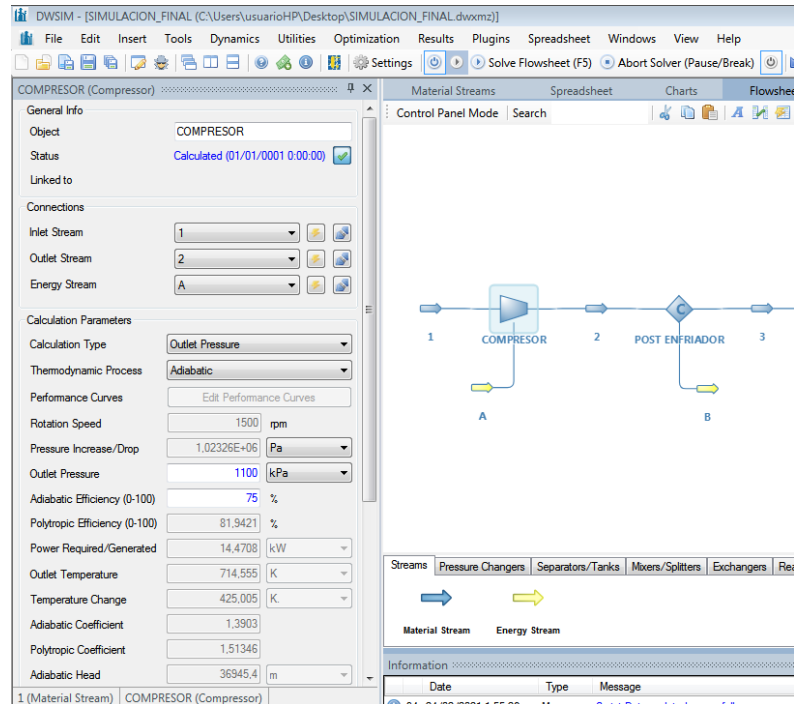
**Figura 29-3:** Ingreso de temperatura y presión con fracciones molares en la corriente de materia 01.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2020.

### 3.4.3. Configuración del compresor en la simulación.

Para la presión de salida del compresor se considera a la denominada presión real que es entregada por el compresor BALMA y se encuentra en sus datos técnicos (Figura 1-3), que es 1100 [KPa], junto a una eficiencia adiabática del 75 %.



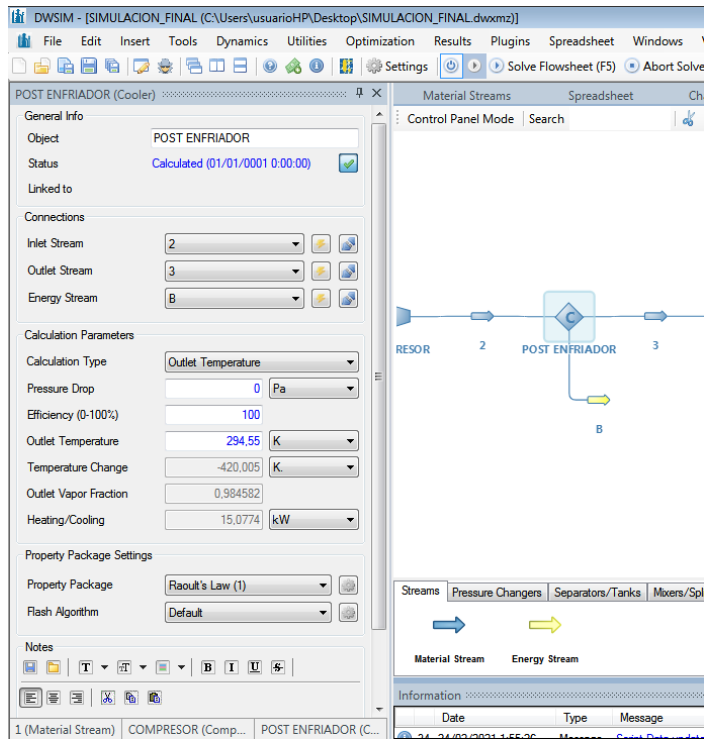
**Figura 30-3:** Ingreso de presión absoluta a la salida del compresor, con su rendimiento.

**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.4.4. Configuración del post enfriador en la simulación.

El aire al ser comprimido incrementa su temperatura, por lo que necesita un enfriamiento posterior que generalmente ya viene equipado en el compresor. Para la simulación se escoge un enfriador (*Cooler*), en el tipo de cálculo *Outlet temperatura*, se ingresa la temperatura de salida perteneciente al estado 02 que son 5[°C] adicionales a la temperatura ambiente, es decir 294,55 [K], junto a una eficiencia del 100 % y caída de presión cero.



**Figura 31-3:** Ingreso de temperatura de salida del POST ENFRIADOR con su rendimiento.

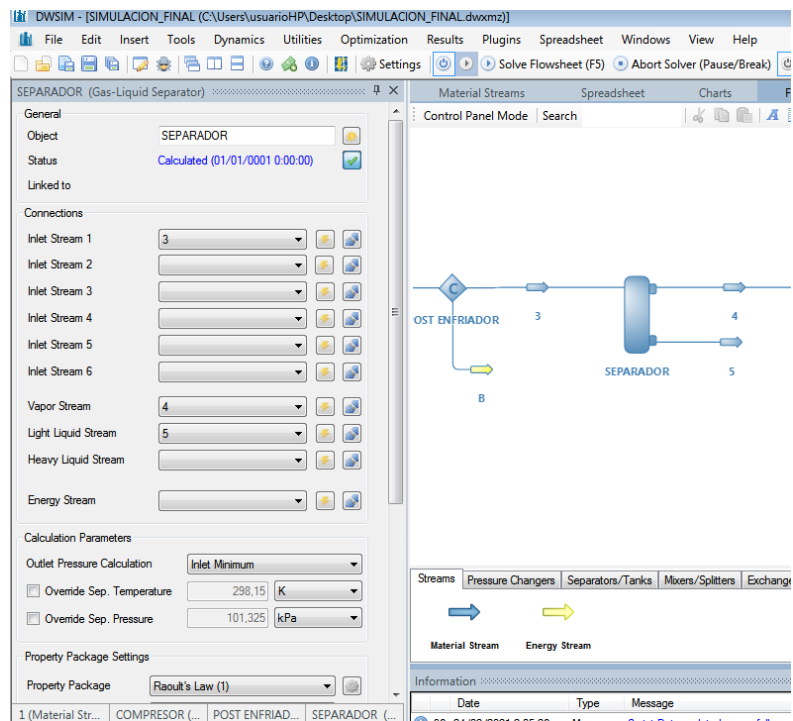
**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

### 3.4.5. Configuración del separador de componentes en la simulación.

El separador de componentes es encargado de aislar al vapor y al líquido sin intervención de energía externa por lo cual, en su configuración se coloca, solo la corriente de materia que ingresa (estado 03) y las que salen (estado 04 y 05).





**Figura 32-3:** Datos de configuración del separador de componentes por defecto.

**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Rivera Alex, 2021.

### 3.4.6. Configuración de los segmentos de tubería en la simulación.

Para los segmentos de tubería, se necesita ingresar el diámetro, para lo cual se usa la ecuación (14), la Tabla 5-2 y la Tabla 6-2. De igual manera, se necesita conocer la longitud, caída de presión y el número de accesorios presentes en cada grupo de tuberías, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 3-3:** Características principales de las tuberías a considerar en la simulación

TIPO DE TUBERÍA	Cantidad de accesorios					Longitud de tubería [m]	Caída de presión admisible [bar]	Máxima velocidad interna recomendada [m/s]
	Válvula de bola	Codo R=d	Tee, salida en línea	Tee, salida angular	Reductor			
Vertical	1	1	0	0	0	3,285	0,02	8
De distribución	6	4	12	1	0	55,2111	0,05	8
De servicio	1	0	0	1	1	2,5	0,03	15

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

Todas las tuberías se simulan con una rugosidad de 0,00015 [m] equivalente a la rugosidad del acero galvanizado.

La tubería vertical tiene una longitud estimada de 3,285 [m], conjuntamente cuenta con una válvula de bola y un codo. Para comenzar con el cálculo del diámetro tenemos que  $L = 3,285$  [m],  $Q = 35,5239$  [l/s],  $P = 0,7674$  [bar] y la caída de presión admisible es de 0,02 [bar] entonces la ecuación (14) queda:

$$d = \sqrt[5]{450 \times \frac{Q^{1,85} \times L}{P_{act} \times \Delta p}}$$

$$d_A = \sqrt[5]{450 \times \frac{35,5239^{1,85} \times 3,285}{0,7674 \times 0,02}}$$

$$d_A = 37,1905 \text{ mm}$$

La tubería de distribución cuenta con 6 válvulas de bola, 4 codos, 12 Tee salidas en línea y 1 Tee salida angular. Para el cálculo del diámetro tenemos que  $L = 55,2211$  [m],  $Q = 35,5239$  [l/s],  $P = 0,7674$  [bar] y la caída de presión admisible es de 0,05 [bar] Entonces:

$$d = \sqrt[5]{450 \times \frac{Q^{1,85} \times L}{P_{act} \times \Delta p}}$$

$$d_A = \sqrt[5]{450 \times \frac{35,5239^{1,85} \times 55,2211}{0,7674 \times 0,05}}$$

$$d_A = 54,4430 \text{ mm}$$

El diámetro estimado de 54,4430 [mm] es el mínimo que podría cumplir con estas condiciones, para que la tubería vertical y de distribución sean del mismo diámetro y reducir el uso de accesorios. Si se tiene de referencia a la Tabla 7-2, el diámetro recomendado para un flujo de 81 [cfm] ó 38,2 [l/s] a 150 [psig] (10,34 [bar]) es de 1" (25 [mm]) entonces, si se cuenta con un caudal total de 75,2 [cfm] (0,0355 [m<sup>3</sup>/s]) y la presión manométrica de 149 [psig] (1023,26 [KPa]), se recomienda un diámetro de 1" mínimo para garantizar una caída de presión de 1 [psi] (0,06 [bar]) por cada 100 [pies] (30,48 [m]) en tramos de tubo recto. Dado que se cuenta con mayor longitud de tubería por las longitudes equivalentes por accesorios, se escoge un diámetro superior recomendado por la Tabla 6-2, optando por una tubería de 3" SCH-80, con un diámetro interno de 73,7 [mm], que no es el diámetro inmediato superior de 1", pero así se pueda garantizar que la velocidad interna sea menor a la máxima recomendada de 8 m/s y una pérdida de carga menor a 0,05 [bar].

De igual manera se procede para la tubería de servicio, con la diferencia de que el caudal aspirado en las tuberías es el que necesita cada usuario, y su diámetro sea mayor al mínimo recomendado de ½” en el apartado 2.21.

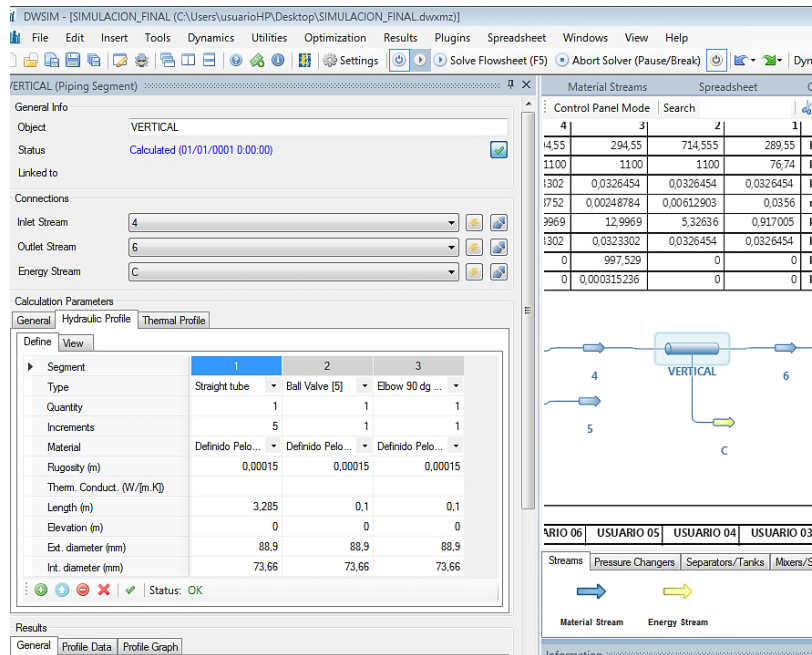
Se resume en la siguiente tabla los cálculos realizados.

**Tabla 4-3:** Diámetros calculados y seleccionados para la simulación.

Tuberías		Caudal de aire actual, FAD [l/s]	Diámetro calculado [mm]	Diámetro elegido	Diámetro interno [mm]
Vertical		35,5239	37,1905	3" SCH-80	73,7
De distribución		35,5239	54,4430	3" SCH-80	73,7
De servicio	Usuario-01	1,9306	11,0538	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-02	0,5148	6,7783	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-03	11,7126	21,5379	1" SCH-80	24,3
	Usuario-04	0,5577	6,982	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-05	6,4355	17,2575	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-06	1,1155	9,0232	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-07	11,7984	21,5962	1" SCH-80	24,3
	Usuario-08	1,2871	9,5139	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-09	3,2177	13,3535	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-10	1,9306	11,0538	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-11	2,4283	12,0328	3/4" SCH-160	15,5
	Usuario-12	2,5742	12,2953	3/4" SCH-160	15,5

**Realizado por:** Macas Rivera Alex, 2021.

En la tubería vertical para ingresar los datos se comienza eligiendo la opción de *Specify Length/Hydraulic Profile* y en la pestaña del perfil hidráulico, se ingresa la rugosidad del material junto a su longitud y a 3” SCH 80 en el diámetro exterior. Además, como accesorio se ingresa una válvula de bola y un codo a 90°.

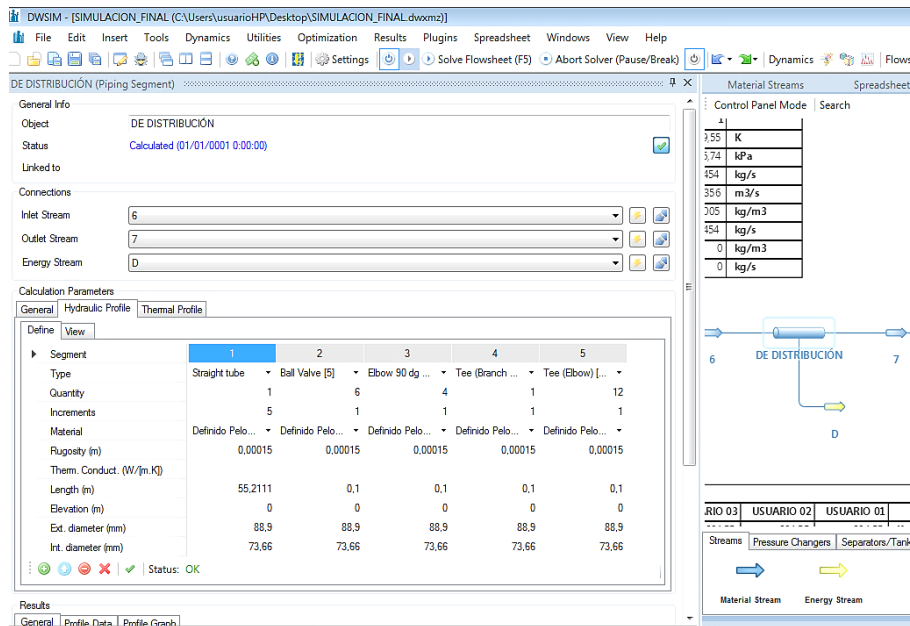


**Figura 33-3:** Configuración de datos en la tubería VERTICAL.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021.

Para el caso de la tubería de distribución se tiene la siguiente configuración.



**Figura 34-3:** Configuración de datos en la tubería DE DISTRIBUCIÓN.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021.

Antes de ingresar en la simulación las tuberías de servicio se debe dividir el flujo de aire a la salida de la tubería de distribución empleando divisores de corriente de materia.

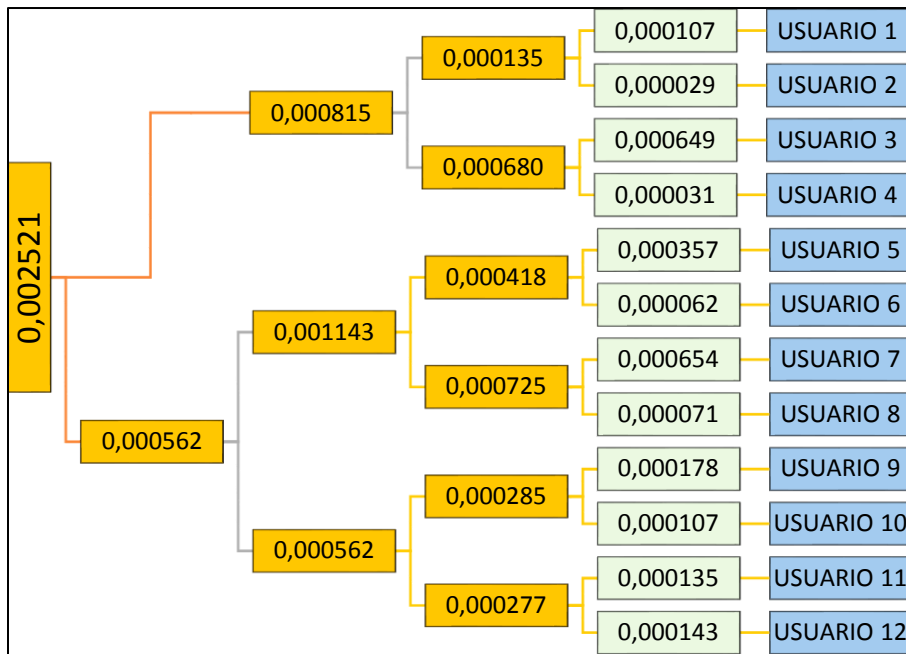
**3.4.7. Configuración de los divisores de corriente en la simulación.**

Los divisores de corriente usados (once en total) son nombrados con números romanos. A la salida de los divisores finales de corriente se encuentra las tuberías de servicio para cada consumidor desde el “USUARIO 1” hasta el “USUARIO 12” ordenados según la Tabla 2-3.

Para las operaciones unitarias divisores de corriente (*Stream Splitter*), se debe considerar que el caudal de inicio es el caudal real, calculado en el apartado 3.3.1.5

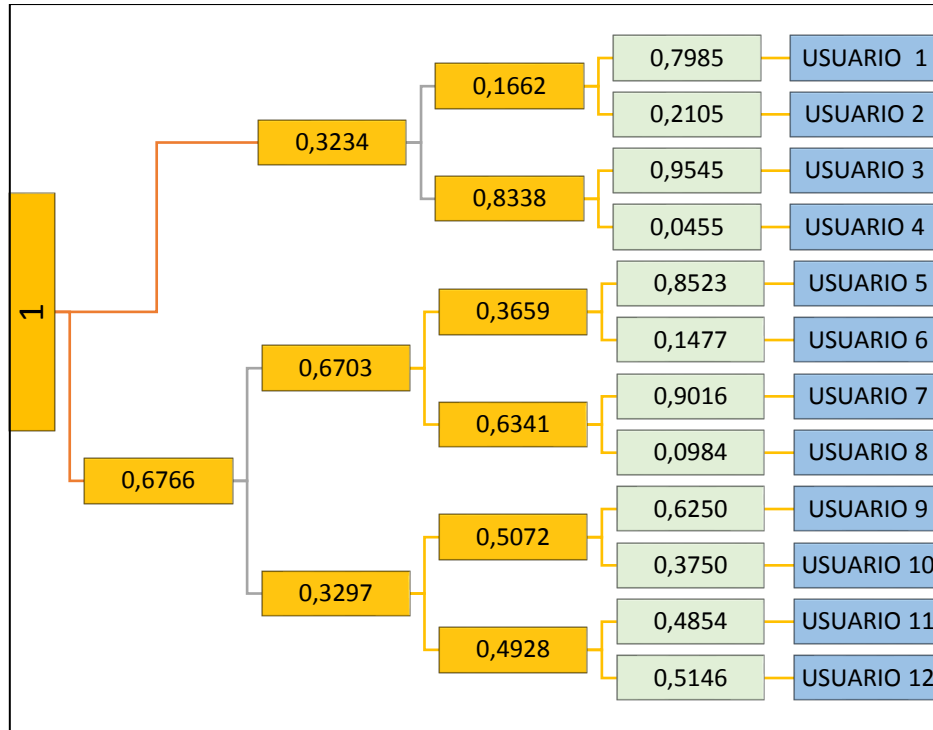
$$Q_r = 0,002521 \frac{m^3}{s}$$

Y los caudales finales son los demandados por los usuarios (caudales reales) multiplicado por los factores de 0,68 debido al factor de simultaneidad y del 1,15 por margen de seguridad, además se conoce que estas operaciones poseen la opción de ingresar las proporciones para dos flujos volumétricos, másicos o molares, se escoge la opción del flujo volumétrico, por tal razón se realiza un ramal divisorio de caudal para doce usuarios utilizando once elementos divisores.



**Gráfico 1-3:** Diagrama sobre la división de caudales en [m³/s]

Realizado por: Macas Alex, 2021.

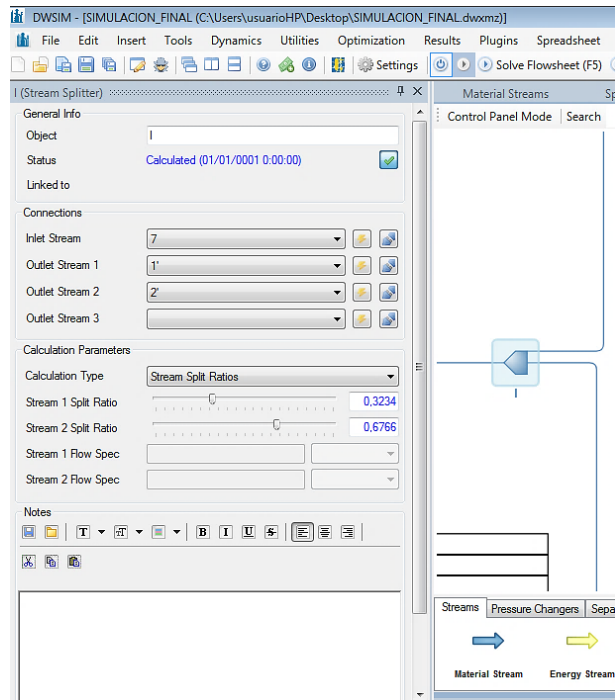


**Gráfico 2-3:** Diagrama sobre las proporciones de caudales a ingresarse en la simulación.

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

El Gráfico 1-3, muestra el valor del caudal que está ingresando a cada divisor (color amarillo) junto al camino de división del caudal para dos fraccionamientos, hasta llegar a los 12 usuarios (color verde). En el Gráfico 2-3, se observa 11 divisores y 12 corrientes de materia que representan a los usuarios finales, que se debe ingresar en la simulación.

En el divisor de corriente “I”, la opción de relación de división del flujo 1 (*Stream 1 Split ratio*) se llena con el valor de 0,3234 y automáticamente la calculadora del diagrama de flujo entrega la relación de división del flujo 2 siendo esta 0,6766 que es acorde al Gráfico 2-3.



**Figura 35-3:** Ingreso de datos en el divisor de corriente I.

**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Alex, 2021.

El ingreso de datos para los otros divisores se lo realiza de la misma forma que el divisor de corriente “I” y se resume en la siguiente tabla.

**Tabla 5-3:** Relaciones de división de flujos a ingresar en los divisores de corriente

Divisores de corriente	Relación de división del flujo 1	Relación de división del flujo 2
I	0,3234	0,6766
II	0,6703	0,3297
III	0,1662	0,8338
IV	0,3659	0,6341
V	0,5072	0,4928
VI	0,7895	0,2105
VII	0,9545	0,0455
VIII	0,8523	0,1477
IX	0,9016	0,0984
X	0,6250	0,3750
XI	0,4854	0,5146

**Realizado por:** Macas Rivera Alex, 2021.

### 3.4.8. Configuración de las tuberías de servicio

Para las tuberías de servicio, según la Tabla 4-3 los diámetros de ¾” SCH-160 y 1” SCH-80 son los óptimos, entonces su menor diámetro interno es de 15,5 [mm] y es mayor a los 12,7 [mm] recomendados en el apartado 2.21, por otro lado, el diámetro interior de ½” SCH-160 es de 11,74 [mm] siendo menor al recomendado.

La Tabla 3-3 señala que las tuberías de servicio tienen una válvula de bola, una Tee en salida angular y un reductor, poseen una longitud aproximada de 2,5 [m] características que son ingresadas en la simulación para cada usuario.

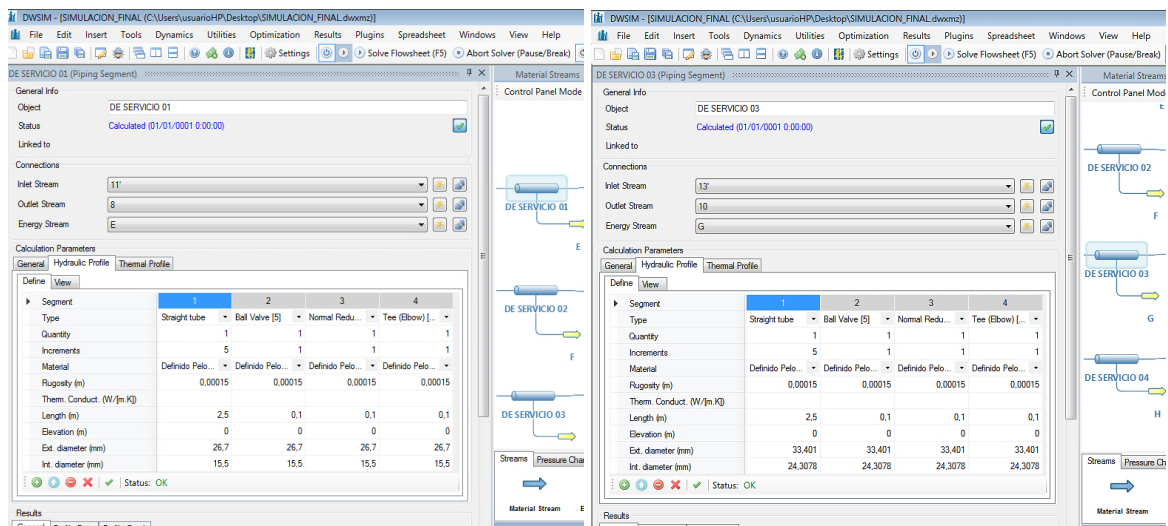


Figura 36-3: Ingreso de datos para el segmento de tubería DE SERVICIO 01 y 03.

Fuente: DWSIM

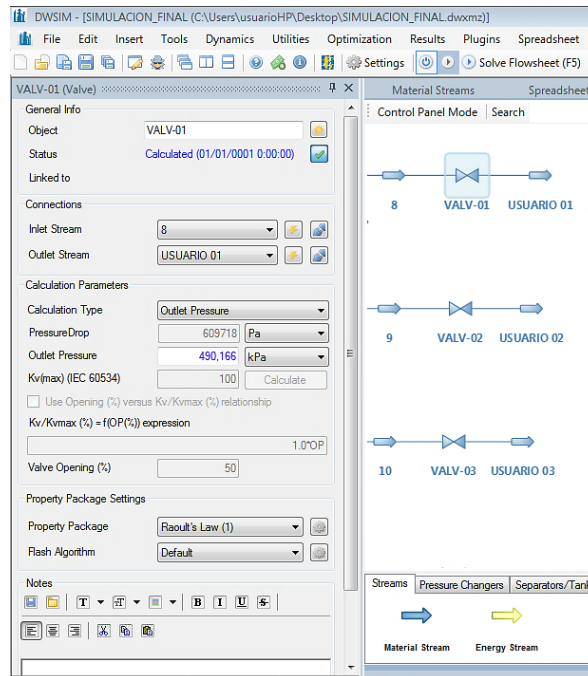
Realizado por: Macas, Alex, 2021.

Las otras tuberías de servicio se ingresan a la simulación de igual forma que la descrita anteriormente.

### 3.4.9. Configuración de las válvulas reguladoras de presión.

La configuración de cada válvula a la salida de las tuberías de servicio se hace en base a la presión de salida requerida por los usuarios para lo cual se emplea la Tabla 2-3, precisamente la columna de presiones absolutas [KPa]. Según cada usuario se va ingresando la presión deseada.





**Figura 37-3:** Ingreso de datos para la válvula VALV-01

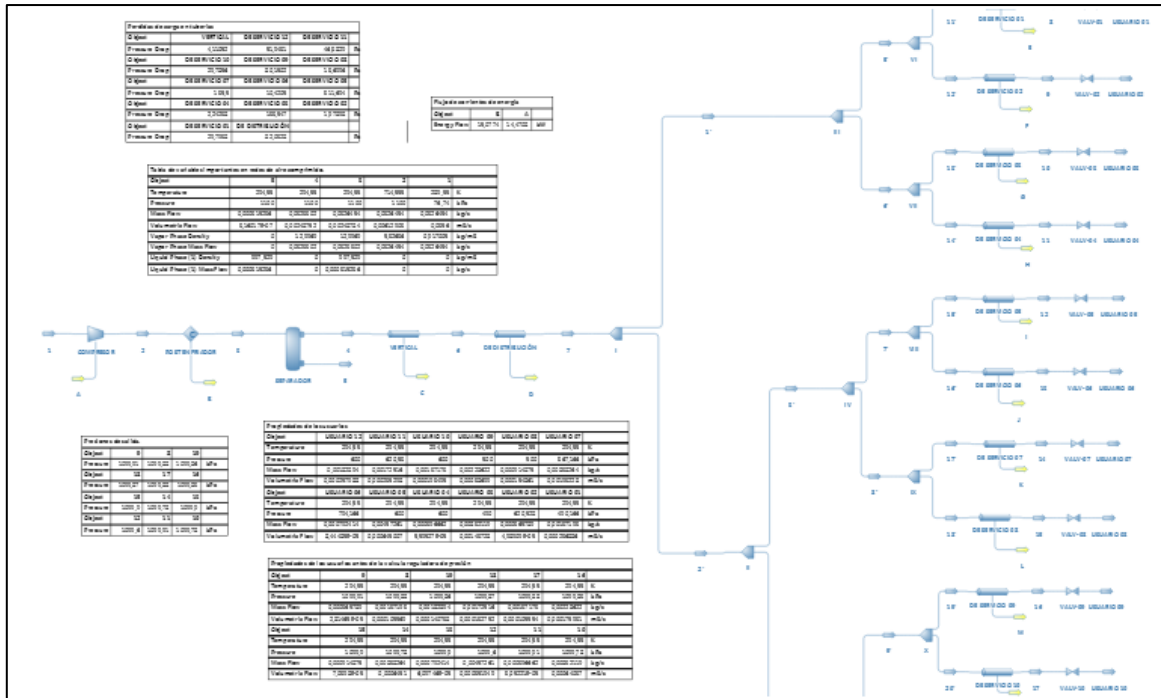
**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas, Alex, 2021.

Para el usuario 01 se necesita una presión absoluta de 490,166 [KPa] la cual es ingresada en la sección de *Outlet Pressure*. De forma similar se configura las siguientes 11 válvulas adicionales con la ayuda de la Tabla 2-3.

#### 3.4.10. Puesta en marcha la simulación en DWSIM.

Para que el software simule el diagrama de flujo realizado, se debe activar el botón de la calculadora de diagrama de flujo (*Flowsheet calculator Active*), luego se oprime el botón del solucionador del diagrama de flujo (*Solve Flowsheet*) y los resultados que nos arroja son presentados en tablas dentro del diagrama de flujo. Cabe mencionar que, si la simulación posee algún error, este se muestra en la ventana *Information* y el diagrama de flujo se pinta de color rojo.



**Figura 38-3:** Presentación de resultados por el simulador DWSIM.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021.

DWSIM presenta la facilidad de visualizar los resultados de la simulación tabulados con las propiedades y elementos previamente seleccionados para el interés del usuario. En la Figura 38-3, se puede visualizar en forma global dichas tablas.

### 3.5. Elaboración de hojas de cálculos para el diseño de la red de aire comprimido.

Para el procesamiento de datos obtenidos, se han empleado 6 hojas de cálculo (ver ANEXO A) en las cuales se muestra las fórmulas utilizadas, las operaciones aritméticas hechas y los resultados o valores en diferentes unidades, cuando sea necesario. Además, los datos que se deben ingresar están en fuente color roja.

El caudal estándar total, es la sumatoria de los caudales estándar de todos los usuarios según la Tabla 2-3, multiplicado por el factor de simultaneidad (0,68) y el del margen de seguridad (1,15).

$$Q_{FAD} = 0,0354 * 0,68 * 1,15 = 0,0276 \frac{m^3}{s} = 28 \text{ l/s}$$

Además del caudal, son obligatorios otros factores adicionales como los que se muestran en la Tabla 6-3.

**Tabla 6-3:** Datos obligatorios del diseño de la red, en la hoja de cálculo.

DATOS DE DISEÑO	SIMBOLO	UNIDAD			VALOR		
Caudal estándar	Qstd	m <sup>3</sup> /s		l/s	0,0276		28
Presión estándar	Pstd	KPa	bar	psi	100	1	14,5038
Presión atmosférica a la altura de operación	Pact	KPa	bar	psi	76,74	0,7674	11,130
Presión real de operación	Pr	KPa	bar	psi	1100	11	159,542
Temperatura estándar	°Tstd	°C	K	°R	20	293,15	527,67
Temperatura a condiciones actuales	°Tact	°C	K	°R	16,4	289,55	521,19
Temperatura real de operación a la descarga	°Tr	°C	K	°R	21,4	294,55	530,19
Densidad estándar	ρstd	kg/m <sup>3</sup>			1,204		
Eficiencia adiabática del compresor	η	%			75		
Viscosidad dinámica a la temperatura de operación	μ	N.s/m <sup>2</sup>			1,82E-05		
Rugosidad	ε	mm			0,15		
Longitud de tubería vertical	LA	m			3,285		
Longitud de tubería de distribución	LB	m			55,211		
Longitud de tubería de servicio	LC	m			2,500		

Realizado por: Macas Alex, 2021.

Luego de tener definidos los datos obligatorios de la red, el procesamiento de datos sigue el siguiente orden:

- Cálculo del caudal a condiciones actuales, con la ecuación (1)
- Cálculo del caudal real del flujo comprimido, con la ecuación (22)
- Cálculo de la densidad a la presión y temperatura actual, con la ecuación (2)
- Cálculo de la densidad a la presión y temperatura de operación, con la ecuación (2)
- Cálculo del flujo másico, con la ecuación (9)
- Cálculo de la potencia real del compresor, con las ecuaciones (10), (11) y (12)
- Cálculo del calor de salida en el post enfriador, con la ecuación (13)
- Cálculo del condensado, con las ecuaciones (3), (4), (21), (6), (7) y (8)
- Cálculo de los diámetros de tubería, con la ecuación (14)
- Cálculo de longitudes equivalentes totales por accesorio, con la Figura 5-2

- Cálculo de la velocidad real en tuberías, con la ecuación (15)
- Cálculo del número de Reynolds, con la ecuación (16)
- Cálculo del factor de fricción, con la ecuación (17)
- Cálculo de la pérdida de presión, con la ecuación (18)
- Presiones a la salida de las tuberías de distribución.

Longitud de tubería vertical	LA	m	3,285
Longitud de tubería de distribución	LB	m	55,2111
Longitud de tubería de servicio	LC	m	2,5

CALCULOS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<p>• CALCULO DEL CAUDAL A CONDICIONES ACTUALES</p> $Q_{act} = \frac{P_{act} \cdot Q_{std} \cdot T_{std}}{T_{act} \cdot P_{std}}$ $Q_{act} = (100 \cdot 0,0276 \cdot 289,55) / (293,15 \cdot 76,74)$	Qact	m <sup>3</sup> /s	0,0355
<p>• CALCULO DEL CAUDAL REAL DE FLUJO COMPRIMIDO</p> $Q_r = \frac{P_{act} \cdot Q_{act} \cdot T_r}{T_{act} \cdot P_r}$ $Q_r = (76,74 \cdot 0,0355 \cdot 294,55) / (289,55 \cdot 1100)$	Qr	m <sup>3</sup> /s	0,002521
<p>• CALCULO DE LA DENSIDAD A LA PRESION Y TEMPERATURA ACTUAL</p> $\rho_{act} = \frac{P_{act} \cdot \rho_{std} \cdot T_{std}}{P_{std} \cdot T_{act}}$ $\rho_r = (76,74 \cdot 1,204 \cdot 293,15) / (100 \cdot 289,55)$	pact	kg/m <sup>3</sup>	0,9354
<p>• CALCULO DE LA DENSIDAD A LA PRESION Y TEMPERATURA DE OPERACIÓN</p> $\rho_r = \frac{P_r \cdot \rho_{act} \cdot T_{act}}{T_r \cdot P_{act}}$ $\rho_r = (1100 \cdot 0,9354 \cdot 289,55) / (294,55 \cdot 76,74)$	pr	kg/m <sup>3</sup>	13,1811
<p>• CALCULO DEL FLUJO MÁSSICO</p> $m' = \rho_{act} \cdot Q_{act}$ $m' = 0,9354 \cdot 0,0355$	m'	kg/s	0,0332
<p>• CALCULO DE LA POTENCIA REAL DEL COMPRESOR</p>			

**Figura 39-3:** Captura de hoja de cálculo realizada para redes de aire comprimido (ANEXO A)

Realizado por: Macas Alex, 2021.

### 3.6. Selección de válvulas, accesorios y equipos.

#### 3.6.1. Selección de accesorios y válvulas.

Según los diámetros seleccionadas para la simulación se ha optado por tuberías roscadas (THD) de material ASTM-A53 GR B, GALV usando la Tabla 6-2, para lo cual se seleccionan accesorios que ayudaran a unir las tuberías mediante roscas, sin cédulas por el hecho de ser roscadas y se enlista a continuación:

- Codo 90° 3", THD, ASTM-A105, GALV

- Codo 90° 3/4", THD, ASTM-A105, GALV
- CRUZ 3", THD, ASTM-A105, GALV
- Tee 3", THD, ASTM-A105, GALV
- Tee 1" THD, ASTM-A105, GALV
- Tee 3/4" THD, ASTM-A105, GALV
- Reductor concéntrico 3" x 1-1/2" THD, ASTM-A105, GALV
- Reductor concéntrico 1-1/2" x 1" THD, ASTM-A105, GALV
- Reductor concéntrico 1-1/2" x 3/4" THD, ASTM-A105, GALV

Para el criterio de selección de válvulas se usa la Tabla 8-2, eligiendo lo siguiente, por ser las más idóneas para el uso y accesibles en el mercado:

- *3" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.*
- *1" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.*
- *3/4" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.*

### **3.6.2. Selección del compresor**

Dado que el caudal FAD del compresor BALMA NS59S/500 T 7.5 es 1900 [l/min] a 11 [bar] según la Figura 1-3; asimismo el caudal FAD a condiciones estándar, de todos los usuarios es  $0,0354 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ , según la Tabla 2-3, que multiplicado por el factor de simultaneidad y adicionándole el 15% del margen de seguridad se tiene:

$$Q_{FAD} = 0,0354 * 0,68 * 1,15 = 0,0276 \frac{m^3}{s} = 1656 \text{ l/min}$$

Como el caudal FAD suministrado por el compresor, es mayor al solicitado, se finiquita que el actual compresor cumple con la demanda y no es necesario reemplazarlo.

### 3.6.3. Selección del secador

Dado que la red de aire comprimido no cuenta con un secador instalado, pero si posee uno en reparación, se prosigue a verificar si el secador existente en la planta es útil.

En la selección del secador se usa el punto de rocío a presión deseado, que según nuestra calidad de aire ISO 8573-1 [3,4,3] previamente elegida en el apartado 3.3.2.1, se necesita un punto de rocío de 3 [°C] para secar un caudal (real) de aire comprimido de  $0,002521 \left[\frac{m^3}{s}\right]$  calculado en el apartado 3.3.1.5.

Modelo		Serie TA			Serie TB		Serie TC			Serie TD		
		5	8	11	19	26	31	36	44	51	61	76
Flujo volumétrico <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> /min	0,60	0,85	1,25	2,10	2,55	3,20	3,90	4,70	5,65	7,00	8,25
Pérdida de presión del secador frigorífico <sup>-1</sup>	bar	0,07	0,14	0,17	0,19	0,20	0,17	0,17	0,18	0,11	0,17	0,17
Pot. eléct. absorbida al 100 % del volumen <sup>-1</sup>	kW	0,30	0,29	0,35	0,44	0,62	0,74	0,89	0,88	0,97	1,25	1,67
Pot. eléct. absorbida al 50 % del volumen <sup>-1</sup>	kW	0,18	0,16	0,19	0,24	0,34	0,34	0,41	0,44	0,55	0,71	0,80
Peso	kg	70	80	85	108	116	155	170	200	251	251	287
Dimensiones an x prof x al	mm	630 x 484 x 779			620 x 540 x 963		764 x 660 x 1009			1125 x 759 x 1187		
Conexión de aire comprimido	G	¾			1		1 ¼			1 ½		2
Conexión de purga de condensado	G	¾			¾		¾			¾		
Alimentación eléctrica		230 V/1 Ph/50 Hz			230 V/1 Ph/50 Hz		230 V/1 Ph/50 Hz			400 V/3 Ph/50 Hz		
Masa de agente frigorífico R-513A	kg	0,27	0,22	0,36	0,56	0,53	0,80	1,00	1,04	1,25	1,30	1,50
Masa de agente frig. R-513A en CO <sub>2</sub> equivalente	t	0,17	0,14	0,23	0,35	0,33	0,50	0,63	0,66	0,79	0,82	0,95
Circuito de agente frigorífico hermético acorde a la normativa sobre gases F		sí			sí		sí			sí		

**Figura 40-3:** Datos técnicos del secador existente.

Fuente: (KAESER Compresores 2011, p. 19)

Los datos técnicos del secador se obtienen de su placa (Figura 9-3) y de la Figura 40-3. Por lo tanto, se tiene la siguiente tabla con los criterios para la selección del secador.

**Tabla 7-3:** Criterios de selección para el secador

SELECCIÓN DEL SECADOR				
Criterio	UNIDAD		VALOR	
Punto de rocío deseado	°C	°F	3	37,4
Temperatura máxima	°C	°F	21,4	70,52
Máxima Temperatura ambiente	°C	°F	16,4	61,52
Presión de compresión manométrica	Psig	bar(e)	148,4120	10,2326
Frecuencia Eléctrica	Hz		60	
Descripción del secador elegido	<b>Secador de aire frigorífico KAESER TA 8</b>			
Caudal nominal	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /s	0,85	0,01417
ΔP	psig	bar(e)	2,0305	0,14
Presión máxima admisible por el secador	psig	bar(e)	232,06	16
Voltaje	V.		230	
Peso	Kg.		80	
Máxima Temperatura de entrada al secador	°C	°F	55	131
FACTORES DE CORRECCIÓN.	Kp		1,12	
	kTe		1,54	
	kTa		1,02	
<b>CAUDAL REAL SECADO</b>	m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /s	<b>1,5</b>	<b>0,0249</b>
$Q_s = 0,85 * 1,12 * 1,54 * 1,02 = 1,5$				

Realizado por: Macas Alex, 2021

Según la Tabla 7-3 el secador KAESER TA 8, tiene un caudal nominal de  $0,01417 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , multiplicado por los factores de corrección, es de  $0,0249 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ ; lo cual, es superior al caudal a secar de  $0,002521 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  requerido en la fábrica. Además, cumple con el punto de rocío deseado, entonces se encuentra al secador existente en la fábrica apropiado para su funcionamiento en la nueva red de aire comprimido.

### 3.6.4. Selección de filtro

Se necesita una calidad de aire ISO 8573-1 [3, 4, 3] seleccionado en el apartado 3.3.2.1 y usando la Tabla 3-2, se opta por filtros para condiciones húmedas DD.

Con los datos de 2,5211 [l/s] de caudal de aire comprimido (apartado 3.3.1.5) y una presión manométrica de 10,233 [bar] entregada por el compresor y la existencia en bodega del filtro DD 65 marca Atlas Copco. Se procede a verificar si es útil para nuestra calidad de aire seleccionada.



**Figura 41-3:** Filtro DD 65 existente en bodega de la fábrica.

Realizado por: Macas Alex, 2021.

TAMAÑO DEL FILTRO DD/PD	Capacidad nominal				Presión de referencia		Presión máxima		Conexiones	Dimensiones						Espacio libre para cambio del cartucho		Peso		
	Estándar		+		bar(e)	psig	bar(e)	psig		A		B		C		D		kg	lb	
	Estándar	+	l/s	cfm					l/s	cfm	mm	pulg.	mm	pulg.	mm	pulg.	mm			pulg.
12	10+	12	25	10	21	7	102	16	232	3/8	90	3,5	61	2,4	268	10,6	75	2,9	1,0	2,2
25	20+	25	53	20	42	7	102	16	232	1/2	90	3,5	61	2,4	268	10,6	75	2,9	1,1	2,4
45	35+	45	95	35	74	7	102	16	232	1/2	90	3,5	61	2,4	323	12,7	75	2,9	1,3	2,9
65	50+	65	138	50	106	7	102	16	232	3/4 & 1	110	4,3	99	3,9	374	14,7	75	2,9	1,6	4,2
90	70+	90	191	70	148	7	102	16	232	1	110	4,3	99	3,9	414	16,3	75	2,9	2,1	4,6
160	130+	160	339	130	275	7	102	16	232	1-1/2	140	5,5	105	4,1	520	20,5	100	3,9	4,2	9,3
215	170+	215	456	170	360	7	102	16	232	1-1/2	140	5,5	105	4,1	603	23,7	100	3,9	4,5	9,9
265	210+	265	562	210	445	7	102	16	232	1-1/2	140	5,5	105	4,1	603	23,7	100	3,9	4,6	10,1
360	310+	360	763	310	657	7	102	16	232	2 & 2-1/2	179	7,0	121	4,8	689	27,1	150	5,9	6,9	15,2
525	425+	525	1112	425	901	7	102	16	232	3	210	8,3	128	5,0	791	31,1	200	7,9	11,0	24,2
690	550+	690	1462	550	1165	7	102	16	232	3	210	8,3	128	5,0	961	37,9	200	7,9	12,6	27,8
630F	550+F	630	1335	550	1165	7	102	16	232	DN80	370	14,6	280	11	1295	51,0	1375	54,1	76,0	167,6
-	850+T	-	-	850	1801	7	102	16	232	DN100	510	20,1	418	16,5	796	31,3	200	7,9	35,2	77,6
970F	850+F	970	2055	850	1801	7	102	16	232	DN100	510	20,1	410	16,1	1360	53,5	1500	59,1	141,0	310,9

Factores de corrección																
Presión de entrada (bar)	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16				
Presión de entrada (psig)	15	29	44	58	72,5	87	102	116	145	174	203	232				
Factor de corrección	0,38	0,53	0,65	0,75	0,83	0,92	1,00	1,06	1,20	1,31	1,41	1,50				

**Figura 42-3:** Datos técnicos de filtros DD/PD marca Atlas Copco.

Fuente: (Atlas Copco Airpower NV 2019, p. 8)

Realizado por: Macas Alex, 2021



Según la Figura 42-3, el filtro DD 65 cuenta con una capacidad estándar de 65 [l/s], y por la presión manométrica de 10,233 [bar] le corresponde un factor de corrección de 1,2128; entonces:

$$\text{Tamaño 65: } 65 \frac{l}{s} \times 1,2128 = 78,833 \text{ l/s}$$

Como 78,833 [l/s] es superior a los 2,5211 [l/s] de caudal de aire comprimido requerido, el filtro existente en la fábrica cumple con los requerimientos para la calidad de aire seleccionada.

### **3.7. Costos de implementación.**

#### **3.7.1. Costos directos**

Para todos los elementos de la red de aire comprimido seleccionados previamente se presentan los siguientes costos (ver ANEXO E):

**Tabla 8-4:** Costos de tuberías y accesorios.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO POR UNIDAD [€]	TOTAL, incluido IVA [€]
9	Tubería 3", SCH 80, THD, ASTM -A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	230,16	2320,01
1	Tubería 1 1/2", SCH 80, THD, ASTM -A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	82,32	92,20
1	Tubería 1", SCH 80, THD, ASTM -A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	43,68	48,92
5	Tubería 3/4", SCH 160, THD, ASTM -A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	29,40	164,64
5	Codo 90° 3", THD, ASTM-A105, GALV	18,69	104,66
2	Codo 90° 3/4", THD, ASTM-A105, GALV	0,87	1,96
1	Cruz 3", THD, ASTM-A105, GALV	35,20	39,42
13	Tee 3", THD, ASTM-A105, GALV	22,08	321,41
2	Tee 1" THD, ASTM-A105, GALV	2,36	5,29
10	Tee 3/4" THD, ASTM-A105, GALV	1,20	13,45
12	Reductor concéntrico 3" x 1 1/2" THD, ASTM-A105, GALV	8,22	110,53
2	Reductor concéntrico 1-1/2" x 1" THD, ASTM-A105, GALV	3,14	7,04
10	Reductor concéntrico 1-1/2" x 3/4" THD, ASTM-A105, GALV	3,14	35,19
7	<i>3" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 31SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.</i>	229,02	1795,50
2	<i>1" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 31SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated Fire safe Design per API 608. Test per API 598.</i>	20,87	46,74
10	<i>3/4" ball valve, 1440 PSI @ 100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 31SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduced port, lever operated. Fire safe. Design per API 608. Test per API 598.</i>	17,30	193,71
1	Construcción e instalación.	500,00	500,00
		<b>TOTAL</b>	<b>5800,66</b>

Realizado por: Macas Alex, 2021

### 3.7.2. Costos indirectos

**Tabla 9-4:** Costos de mano de obra.

Operario	Valor [\$]
Técnico mecánico	500
Técnico electricista	500
Otros	100
<b>TOTAL</b>	<b>1100</b>

Realizado por: Macas Alex, 2021

### 3.7.3. Costos totales

Los costos totales se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 10-3:** Costos totales.

Inversión	Valor [\$]
Costos de tuberías y accesorios	5800,66
Costos de mano de obra.	1100,00
Costos de imprevistos.	200,00
<b>TOTAL</b>	<b>7100,66</b>

Realizado por: Macas Alex, 2021

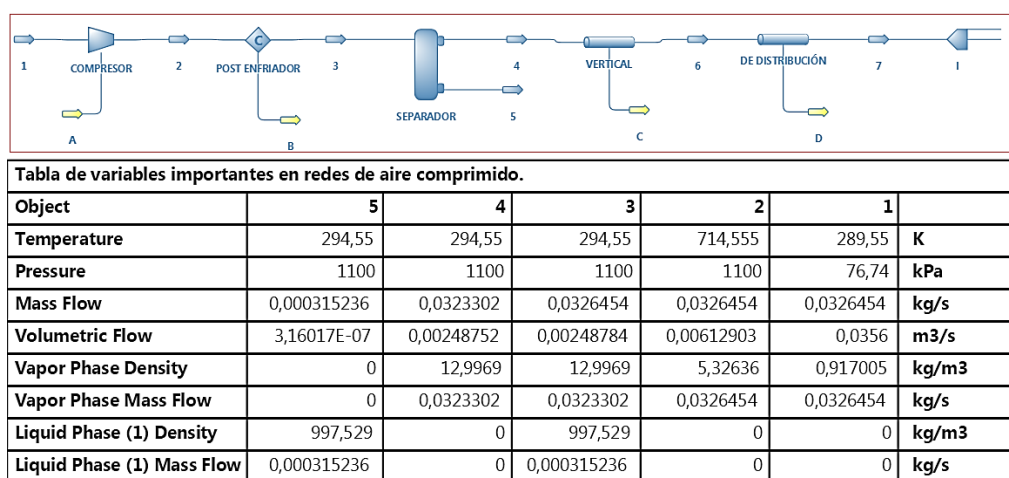
## CAPITULO IV.

### 4. VALIDACIÓN.DEL CÁLCULO REALIZADO

#### 4.1. Presentación de resultados por el simulador DWSIM

##### 4.1.1. Variables significativas en redes de aire comprimido

Los valores obtenidos de DWSIM se encuentran en el flujograma del simulador denominado “Tabla de variables importantes en redes de aire comprimido”. Además, cualquier otro dato necesario se puede encontrar en la configuración de cada estado.



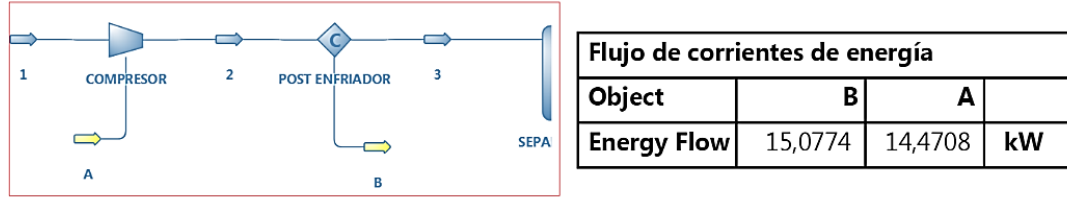
**Figura 1-4:** Captura de resultados sobre las principales propiedades de los estados iniciales en la simulación

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021

##### 4.1.2. Potencia real del compresor y calor de salida en el post enfriador.

Los Flujos de energía referentes al trabajo del compresor (estado A) y el calor de salida en el post enfriador (estado B) se presentan en la siguiente figura.



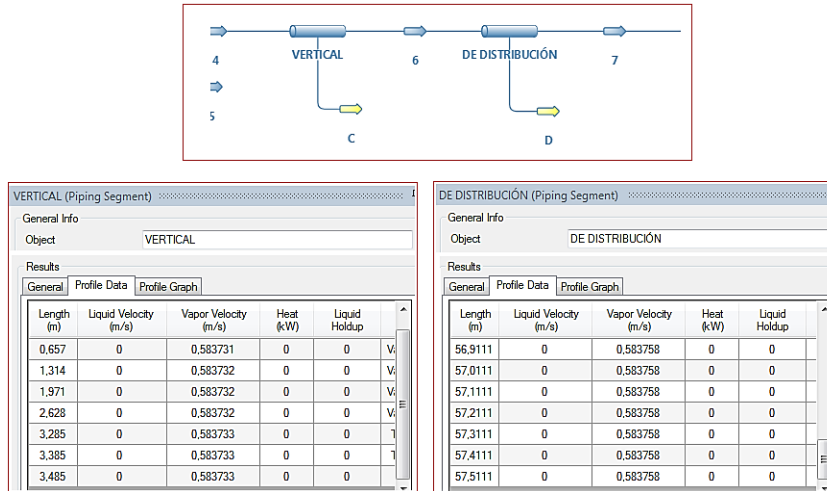
**Figura 2-4:** Captura de resultados del simulador DWSIM para el estado A y B.

**Fuente:** DWSIM

**Realizado por:** Macas Alex, 2021

#### 4.1.3. Velocidades reales en las tuberías.

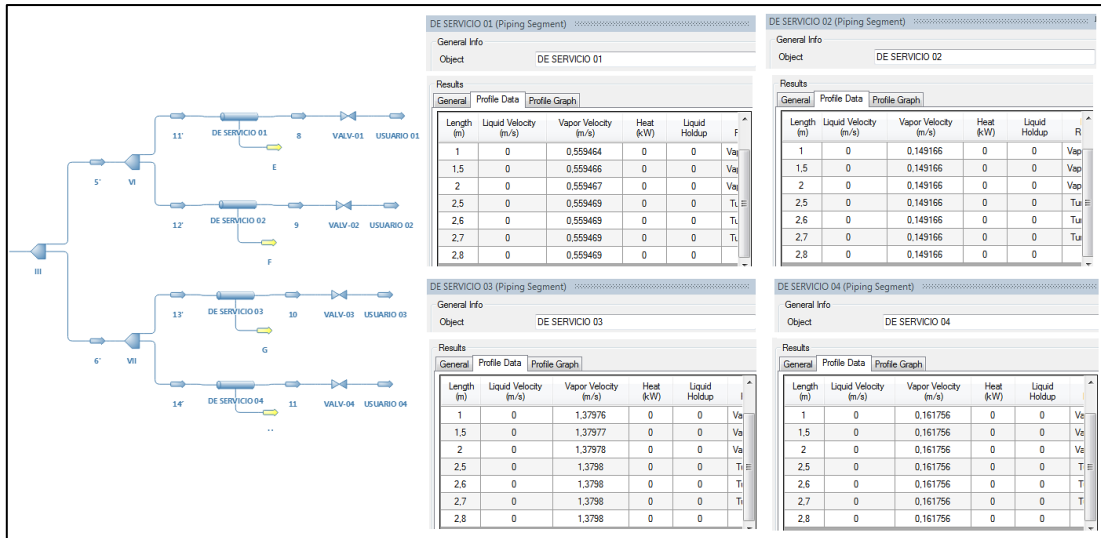
Las velocidades reales en el simulador se obtienen del promedio de la tabla de resultados presentados por cada operación unitaria, para lo cual se debe ingresar a las 14 tuberías simuladas.



**Figura 3-4:** Captura de las tablas de velocidades de fluido en las tuberías vertical y de distribución.

**Fuente:** DWSIM

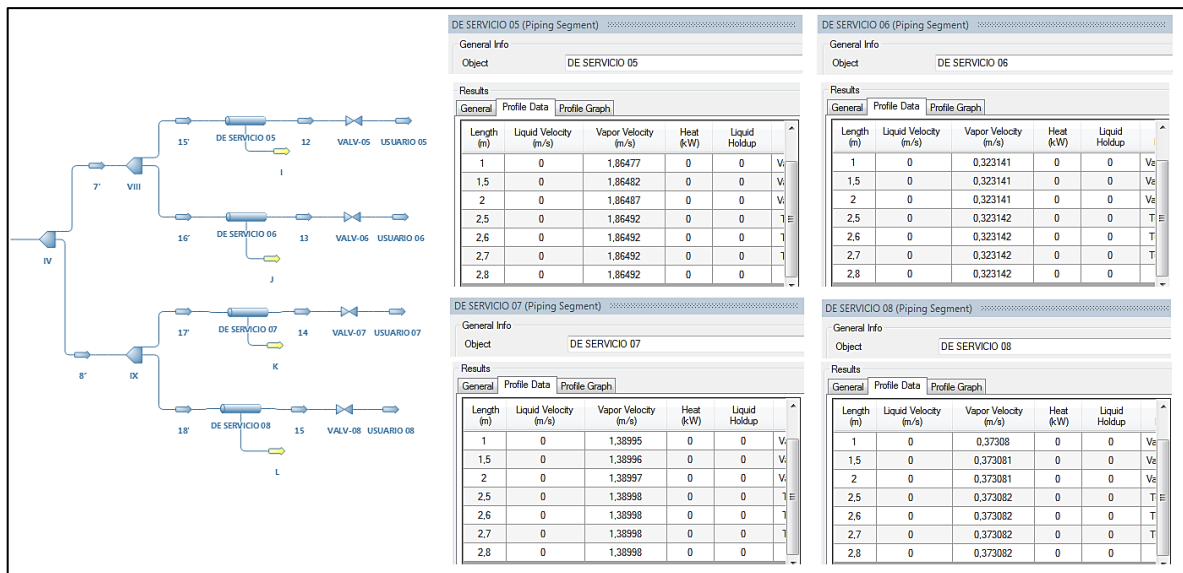
**Realizado por:** Macas Alex, 2021



**Figura 4-4:** Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 01-04.

Fuente: DWSIM

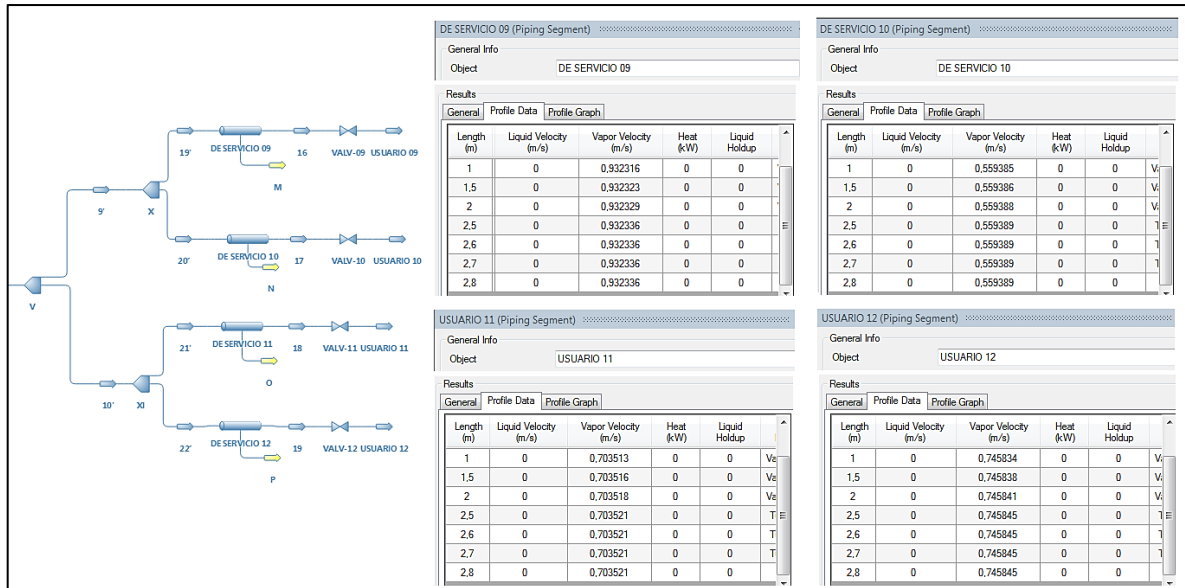
Realizado por: Macas Alex, 2021



**Figura 5-4:** Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 05-08.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021



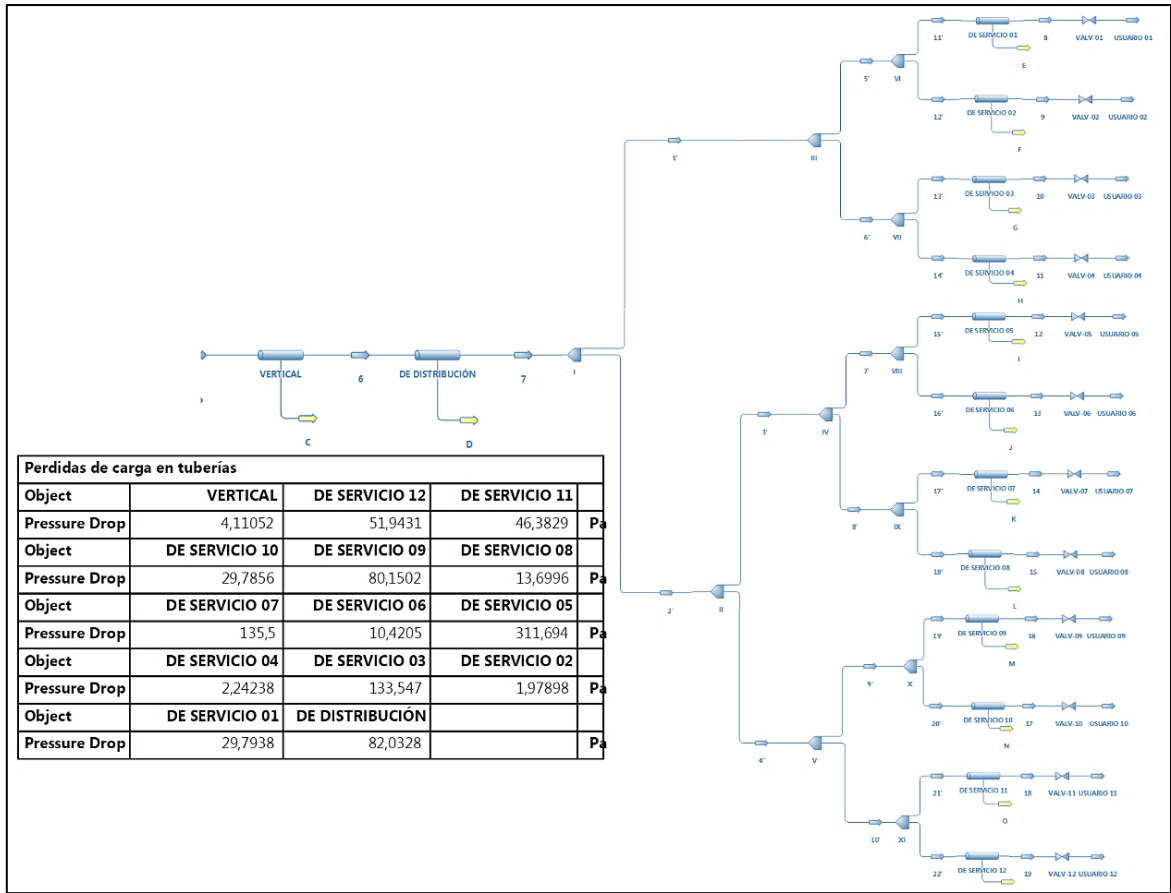
**Figura 6-4:** Captura de las tablas de velocidades de fluido, en las tuberías de servicio 09-12.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021

#### 4.1.4. Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga en el simulador se pueden obtener en la pestaña resultados generales de cada tubería simulada o resumida en la siguiente figura.



**Figura 7-4:** Captura de pérdidas de carga en tuberías

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021

#### 4.1.5. Presiones de salida.

Las presiones de salida, en el flujograma de la simulación se encuentran desde el estado de energía 8 hasta el 19, que son los estados ubicados luego de cada tubería de servicio.

Presiones de salida.				
Object	9	8	19	
Pressure	1099,91	1099,88	1099,86	kPa
Object	18	17	16	
Pressure	1099,87	1099,88	1099,83	kPa
Object	15	14	13	
Pressure	1099,9	1099,78	1099,9	kPa
Object	12	11	10	
Pressure	1099,6	1099,91	1099,78	kPa

**Figura 8-4:** Captura de presiones de salida a las tuberías de servicio.

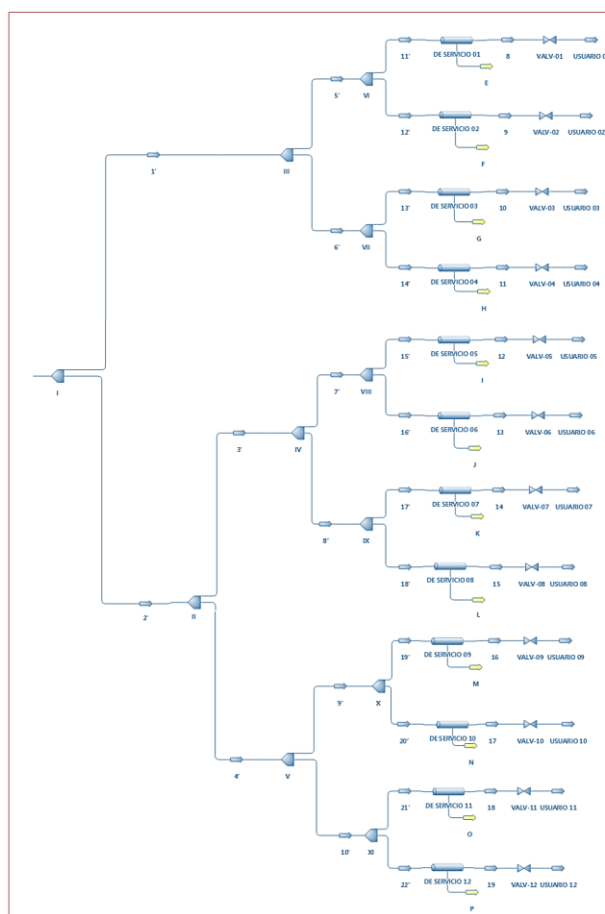
Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021



#### 4.1.6. Caudales reales y presiones de funcionamiento de los usuarios.

Para conocer los caudales reales que llegan a los usuarios luego de las tuberías de servicio se tiene en el flujograma de la simulación a “Propiedades de los usuarios antes de la válvula reguladora de presión” (Figura 9-4) y para saber la presión de funcionamiento se cuenta con “Propiedades de los usuarios” (Figura 10-4).



Propiedades de los usuarios antes de la válvula reguladora de presión						
Object	9	8	19	18	17	16
Temperature	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55
Pressure	1099,91	1099,88	1099,86	1099,87	1099,88	1099,83
Mass Flow	0,000365789	0,00137193	0,00182894	0,00172516	0,00137173	0,00228622
Volumetric Flow	2,81465E-05	0,000105569	0,000140738	0,000132752	0,000105554	0,000175931
Object	15	14	13	12	11	10
Temperature	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55
Pressure	1099,9	1099,78	1099,9	1099,6	1099,91	1099,78
Mass Flow	0,000914875	0,00838264	0,000792414	0,00457261	0,000396662	0,00832119
Volumetric Flow	7,0398E-05	0,0006451	6,09746E-05	0,000351949	3,05221E-05	0,00064037

**Figura 9-4:** Captura de las propiedades de los usuarios antes de la válvula reguladora de presión.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021

Como las presiones recomendadas por el fabricante en cada máquina son inferiores a las presiones de salida en las tuberías de servicio, entonces se justifica la instalación de válvulas reguladoras de presión. Cabe mencionar que cada usuario en la red de aire actual ya cuenta con su respectiva válvula reguladora en estado funcional e instalada.

Propiedades de los usuarios							
Object	USUARIO 12	USUARIO 11	USUARIO 10	USUARIO 09	USUARIO 08	USUARIO 07	
Temperature	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	K
Pressure	600	620,53	600	500	500	367,166	kPa
Mass Flow	0,00182894	0,00172516	0,00137173	0,00228622	0,000914875	0,00838264	kg/s
Volumetric Flow	0,000257988	0,000235298	0,000193495	0,00038699	0,000154861	0,00193228	m <sup>3</sup> /s
Object	USUARIO 06	USUARIO 05	USUARIO 04	USUARIO 03	USUARIO 02	USUARIO 01	
Temperature	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	294,55	K
Pressure	794,166	600	600	490	620,528	490,166	kPa
Mass Flow	0,000792414	0,00457261	0,000396662	0,00832119	0,000365789	0,00137193	kg/s
Volumetric Flow	8,44485E-05	0,000645007	5,59527E-05	0,00143728	4,98909E-05	0,000236886	m <sup>3</sup> /s

**Figura 10-4:** Captura de las propiedades de los usuarios.

Fuente: DWSIM

Realizado por: Macas Alex, 2021

## 4.2. Comparación de resultados.

### 4.2.1. Variables significativas.

Los resultados obtenidos por el simulador DWSIM y las hojas de cálculo se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 1-4:** Errores relativos en las variables significativas de las redes de aire comprimido.

VARIABLE	ESTADOS DE MATERIA EN EL SIMULADOR DWSIM	SIMBOLO EN LA HOJA DE CALCULO	UNIDAD	VALOR		ERRORES RELATIVOS [%]
				SIMULADOR DWSIM	HOJA DE CALCULO	
Caudal real de flujo de aire comprimido	3	Qr	m <sup>3</sup> /s	0,002488	0,002521	1,31
Densidad del aire a condiciones actuales	1	pact	kg/m <sup>3</sup>	0,9170	0,9354	1,97
Densidad del aire a condiciones reales	3	ρr	kg/m <sup>3</sup>	12,9969	13,1811	1,40
Flujo másico de aire húmedo	1	m'	kg/s	0,03265	0,03323	1,75
Trabajo real del compresor.	A	Wcr	KW	14,4708	14,6366	1,13
Calor de salida en el post enfriador	B	qs	KW	15,0774	14,4701	4,20
Flujo másico de aire seco	4	ma	kg/s	0,03233	0,03223	0,31
Flujo másico del condensado	5	mL	kg/s	0,0003152	0,0003135	0,54

Realizado por: Macas Alex, 2021

#### 4.2.2. Caudales de los usuarios

Los caudales reales de la simulación se obtienen de la Figura 9-4, para poder comparar a iguales condiciones. Los caudales reales de los usuarios se obtienen de la Tabla 2-3.

**Tabla 2-4:** Errores relativos en los caudales obtenidos del simulador DWSIM.

Usuarios	Estados del flujograma en DWSIM	Caudal real de los usuarios en el simulador DWSIM [m <sup>3</sup> /s]	Caudal real del simulador dividido para el factor de simultaneidad y de seguridad.	Caudal real de aire comprimido [m <sup>3</sup> /s]	ERROR RELATIVO [%]
1	8	0,0001056	0,000135	0,000137	1,43
2	9	0,0000281	0,000036	0,000037	2,88
3	10	0,0006404	0,000819	0,000831	1,45
4	11	3,052E-05	0,000039	0,000040	2,43
5	12	0,0003519	0,000450	0,000457	1,53
6	13	0,0000610	0,000078	0,000079	1,26
7	14	0,0006451	0,000825	0,000837	1,44
8	15	0,0000704	0,000090	0,000091	1,07
9	16	0,0001759	0,000225	0,000228	1,34
10	17	0,0001056	0,000135	0,000137	1,43
11	18	0,0001328	0,000170	0,000172	1,27
12	19	0,0001407	0,000180	0,000183	1,68

Realizado por: Macas Alex, 2021

#### 4.2.3. Velocidades de flujo y análisis de presiones.

Las velocidades reales de flujo de la simulación se obtienen desde la Figura 3-4 hasta la Figura 6-4, para ser comparadas con las velocidades calculadas manualmente y se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 3-4:** Errores relativos de las velocidades reales de flujo.

TUBERÍAS	Operaciones unitarias en DWSIM	Velocidad de flujo			ERRORES RELATIVOS [%]
		DWSIM	Hoja de cálculo		
		Valor [m/s]	Símbolo	Valor [m/s]	
Vertical	VERTICAL	0,5837	VrealA	0,5910	1,24
De distribución	DE DSTRIBUCIÓN	0,5838	VrealB	0,5910	1,22
De servicio-01	DE SERVICIO 01	0,5595	Vreal1	0,5678	1,46
De servicio-02	DE SERVICIO 02	0,1492	Vreal2	0,1514	1,45
De servicio-03	DE SERVICIO 03	1,3798	Vreal3	1,4007	1,49
De servicio-04	DE SERVICIO 04	0,1618	Vreal4	0,1640	1,34
De servicio-05	DE SERVICIO 05	1,8649	Vreal5	1,8928	1,47
De servicio-06	DE SERVICIO 06	0,3231	Vreal6	0,3281	1,52
De servicio-07	DE SERVICIO 07	1,3900	Vreal7	1,4110	1,49
De servicio-08	DE SERVICIO 08	0,3731	Vreal8	0,3786	1,45
De servicio-09	DE SERVICIO 09	0,9323	Vreal9	0,9464	1,49
De servicio-10	DE SERVICIO 10	0,5594	Vreal10	0,5678	1,48
De servicio-11	DE SERVICIO 11	0,7035	Vreal11	0,7142	1,50
De servicio-12	DE SERVICIO 12	0,7458	Vreal12	0,7571	1,49

Realizado por: Macas Alex, 2021

Por otro lado, para obtener las presiones de cada usuario en el simulador DWSIM se tiene la Figura 8-4, en unidades de [KPa] entregadas por defecto, si se desea en unidades diferentes basta con convertirlas o ingresar a cada estado en el simulador y visualizarlas en las unidades de su preferencia.

Para calcular manualmente las presiones de salida, se debe tener en cuenta que las caídas de presión en los elementos son insignificantes, a excepción de las tuberías. Para lo cual, se resta de la presión real del sistema, las pérdidas de carga de la tubería vertical, de distribución y de cada tubería de servicio (conseguidas de las hojas de cálculo realizadas). Obteniendo así, las presiones correspondientes de cada usuario antes de ingresar a las válvulas reguladoras de presión. Como ejemplo se explica a continuación para el usuario 1 y 2.

$$P_S = (P_r - \Delta P_A - \Delta P_B) - \Delta P_{DE\ SERVICIO} \quad (24)$$

Donde:

$P_S$  : Presión a la salida de la tubería de distribución de cada usuario.

$P_r$  : Presión real del sistema.

$\Delta P_A$  : Pérdida de presión en la tubería vertical.

$\Delta P_B$  : Pérdida de presión en la tubería de distribución.

$\Delta P_{DE\ SERVICIO}$  : Pérdida de presión en la tubería de servicio.

Entonces, para el Usuario 01 se tiene:

$$P_S = (P_r - \Delta P_A - \Delta P_B) - \Delta P_{DE\ SERVICIO}$$

$$P_{S_1} = [(1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0439] KPa$$

$$P_{S_1} = 1099,7886 KPa = 159,5111 psi$$

Para el usuario 02 se tiene:

$$P_{S_2} = [(1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0041] KPa$$

$$P_{S_2} = 1099,8284 KPa = 159,5169 psi$$

De esta manera se obtienen las presiones a la salida de las tuberías de servicio para todos los usuarios, que se muestra en la Tabla 4-4, en [psi].

**Tabla 4-4:** Errores relativos de las presiones a la salida de las tuberías de servicio en cada usuario.

Usuarios	Estados de materia en DWSIM	Presiones de salida			ERRORES RELATIVOS [%]
		DWSIM	Hoja de cálculo		
		Valor [psi]	Símbolo	Valor [psi]	
01	8	159,525	Ps1	159,5111	0,01
02	9	159,529	Ps2	159,5169	0,01
03	10	159,510	Ps3	159,4914	0,01
04	11	159,529	Ps4	159,5168	0,01
05	12	159,484	Ps5	159,4553	0,02
06	13	159,528	Ps6	159,5152	0,01
07	14	159,510	Ps7	159,4911	0,01
08	15	159,527	Ps8	159,5145	0,01
09	16	159,518	Ps9	159,5010	0,01
10	17	159,525	Ps10	159,5111	0,01
11	18	159,523	Ps11	159,5078	0,01
12	19	159,522	Ps12	159,5066	0,01

Realizado por: Macas Alex, 2021

### 4.3. Diagrama de tuberías e instrumentos (P&ID) del diseño planteado.

El diseño del diagrama P&ID para el nuevo diseño de la red de aire comprimido se muestra en el ANEXO B.

### 4.4. Interpretación de resultados

En el presente trabajo se validó el diseño de una red de aire comprimido empleada en la fábrica de calzado localizada en Guano, provincia de Chimborazo con una altitud de 2280 m.s.n.m. una temperatura máxima de 16,4 °C y una humedad relativa del 72%

La calidad de aire se seleccionó bajo la Norma ISO 8573-1:2010, donde se estableció que su calidad sería menor a la solicitadas por el sector alimenticio o clínicas acordando una calidad ISO 8573-1 [3,4,3] recomendado por Hesse S. para maquinaria con cilindros neumáticos. Por lo cual se validó el uso del filtro DD 65 presente en el *stock* de la empresa junto a un secador frigorífico que proveen dicha calidad de aire.

De los resultados de la simulación del sistema, con DWSIM y los obtenidos manualmente (hojas de cálculo) en base a los cálculos de ingeniería se presentan en la Tabla 1-4, hasta Tabla 4-4.

Como se puede ver en la Tabla 1-4, el caudal real junto a la densidad a condiciones actuales y reales del aire comprimido encontrados mediante la ley general del estado gaseoso se pueden considerar iguales en ambos casos (manualmente y en el simulador), debido a que presentan un error relativo menor al 2 %, dichos valores se convierten en datos iniciales para determinar el flujo másico del aire húmedo ( $\dot{m}' = 0,03323$  [kg/s]), la potencia real del compresor ( $W_{c_r} = 14,6366$  [KW]), y el calor de salida del post enfriador ( $q_s = 14,4701$  [KW]).

Establecido el caudal estándar demandado por los usuarios ( $Q_{std} = 0,0276$  [ $\frac{m^3}{s}$ ]), se consideró el factor de simultaneidad y del margen de seguridad (15%) se determinó que el compresor que dispone la fábrica (BALMA NS59S/500 T 7.5 LT) es adecuado para el diseño planteado valorado por los criterios de aire libre suministrado y la presión entregada. Con el flujo másico del aire comprimido se validó el secador frigorífico KAESER TA 8. Además, se encontró la masa del líquido condensado ( $m_L = 0,000314$  [ $\frac{kg}{s}$ ]) a través del balance de materia en el sistema.

Para establecer los diámetros más apropiados de las tuberías fue prudente comenzar calculando diámetros iniciales en función de la longitud de tubería, caudal FAD, presión inicial y sobre todo las

pérdidas de carga máximas aceptables en el sistema. Prosiguiendo con el cálculo de las velocidades reales, donde interviene el caudal comprimido del aire y el diámetro seleccionado, teniendo como condición que deben ser menores a las velocidades recomendadas. Al comparar las velocidades reales del fluido calculadas con las obtenidas por el simulador se obtuvo un error relativo máximo del 1,52 %, interpretándolos como valores correctos.

Obteniendo las velocidades reales se prosiguió con el número de Reynolds, lo cual es dependiente del diámetro interno, las propiedades físicas del fluido y su velocidad, para continuar con el cálculo del factor de fricción en donde interviene la rugosidad del material.

Los accesorios interconectados en las redes de aire comprimido provocan caídas de presión que son interpretadas en longitudes equivalentes para ser adicionadas a las longitudes de los diferentes grupos de tubería que, junto a la densidad de operación, la velocidad real, el factor de fricción y el diámetro interno, se utilizaron en el cálculo de las pérdidas de carga o presión.

Las pérdidas de presión de las hojas de cálculo se obtuvieron a través del factor de fricción de Swamee–Jain y la ecuación de Moody. Si al obtener pérdidas de carga menores o iguales a las asumidas inicialmente, además de que las velocidades reales del fluido eran menores a las recomendadas, con la cédula de tubería que se aconsejaba para el uso en la industria del aire comprimido, se interpretaba como apropiado su diámetro, en caso contrario, se iteró hasta conseguirlo. Consiguiendo así, diámetros de 3" SCH-80 para la tubería vertical y de distribución, mientras que, para las tuberías de servicio, se seleccionaron de ¾" SCH-160 y 1" SCH-80.

Al comparar las presiones de salida (entregadas por el simulado y hojas de cálculo) se obtuvo un error relativo máximo del 0,02 %, denotando que la simulación realizada es óptima.



## CONCLUSIONES.

Se estudió las características de la red actual de aire comprimido de la empresa OFAHER donde se observó que presenta una disposición tipo abierta sin inclinación ni purgas, carece de secador de aire y utiliza tuberías de ½” las mínimas recomendadas para la distribución de aire comprimido. Además, la conexión entre las tuberías de distribución y de servicio son bajantes directas sin presencia de “cuellos de cisne” lo que provocaría el ingreso de condensados de agua a los usuarios.

Se realizó el levantamiento isométrico de la red actual de aire comprimido en la fábrica, donde se identificó a doce usuarios. Ubicados cinco en las zonas de montaje, cuatro en la zona de cortado, un usuario situado entre ambas zonas y dos herramientas neumáticas. También se obtuvo las distancias entre el área del compresor y los consumidores para establecer las longitudes de tubería.

La información de los usuarios neumáticos se recopiló, previamente conociendo las condiciones ambientales de la localidad para establecer los datos del caudal de aire a condiciones actuales de 35,52 [l/s] y 2,52 [l/s] de aire comprimido, junto a una presión de 1100 [KPa] entregado por el compresor.

Se diseñó la nueva red de aire comprimido para la empresa OFAHER, en la cual, se seleccionó la calidad de aire ISO 8573-1 [3,4,3] deducido por la norma ISO 8573-1:2010. Además, se decidió por una distribución neumática entrelazada o mixta, conformada por dos anillos que atraviesan toda la fábrica, elegida por ser la más adecuada con respecto al saneamiento del sistema. Bajo la guía del Manual de aire comprimido ATLAS COPCO y la especificación “H”ANSI 150 # se establecieron los diámetros de tuberías más apropiados, junto a sus accesorios.

Se realizó la simulación de la red de aire comprimido, en el simulador DWSIM, donde los datos necesarios fueron las fracciones molares de la mezcla (aire seco - vapor de agua) 98,23% y 1,77% respectivamente, con la temperatura máxima del entorno, la presión ambiental (16,4 [°C] y 76,74 [KPa]) y el caudal evaluado a las condiciones actuales del sistema. Los estados finales deseados fueron los caudales de aire comprimido solicitados por los 12 usuarios a las presiones absolutas de funcionamiento, en las cuales se obtuvo errores relativos menores al 1% en comparación con el cálculo manual, concluyendo que la simulación en DWSIM es válida.

Los datos obtenidos del cálculo manual comparados con la simulación no difieren en más del 4,2% de error. Entre las variables significativas se encuentra el caudal real de flujo (0,002521 [m<sup>3</sup>/s]), densidad del aire a condiciones actuales y reales (0,9354 [kg/m<sup>3</sup>] y 13,1811 [kg/m<sup>3</sup>]), flujo másico del aire húmedo y seco (0,3323 [kg/s] y 0,03223 [kg/s]), trabajo real del compresor (14,6366 [KW]),

flujo másico del líquido condensado (0,0003135 [kg/s]) y el calor de salida en el post enfriador (14,4701 [KW]) en el cual se presenta el máximo error porcentual de 4,2%. Por otro lado, los caudales de los usuarios presentan un error relativo máximo del 2,88%; las velocidades reales de flujo tienen un error relativo máximo de 1,52% y en las presiones a la salida de las tuberías hay un error del 0,02%. Interpretando al simulador DWSIM como apto para la simulación de redes de aire comprimido.

Se realizó los planos de la nueva red de aire comprimido entre ellos el P&ID, por lo cual, se enlistó los equipos bajo la biblioteca de Petroamazonas EP. *Piping and Instrument Symbolology* para describir el proceso de la central generadora de aire comprimido de la red diseñada.

Los costos directos e indirectos del proyecto fueron calculados bajo precios nacionales y mano de obra calificada, finiquitando que para su construcción se requiere una inversión de \$ 7100,66.

## **REOMENDACIONES.**

Para el levantamiento de información de los usuarios de aire comprimido se debe tener en cuenta que la mayoría de los datos vienen en caudales estándar y caudales normales, los cuales hay que saber diferencia y entender a qué condiciones fueron medidas, para obtener un valor correcto en los caudales reales a condiciones de operación.

Para agilizar la toma de datos para futuras correcciones de la red de aire comprimido se recomienda a la empresa tener un código de colores para las tuberías que a nivel nacional están bajo la norma NTE INEN 440:1984 y así tener una tabulación de información más diligente.

El simulador DWSIM al ser de código abierto posee múltiples plataformas de información para su uso, donde una simulación válida depende en su mayoría del modelo termodinámico preseleccionado, y que no se recomienda comparar entalpías del simulador con las de tablas existentes ya que maneja sus propias ecuaciones de estado para obtener resultados veraces, pero con distinto procesamiento de datos.

Se recomienda que las tuberías de servicio se deriven de la de distribución desde la parte superior con el uso de “cuellos de cisne” para evitar el ingreso de agua condensada a los usuarios y que la red sea diseñada con un 15% de margen de seguridad para futuras expansiones de la red.

## **GLOSARIO.**

**Disolución:** Mezcla que resulta de disolver una sustancia sólida en un líquido (Real Academia Española 2021a)

**Entalpía:** Magnitud termodinámica de un cuerpo, igual a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior (Real Academia Española 2021b)

**Entropía:** Magnitud termodinámica que mide la parte de la energía no utilizable para realizar trabajo y que se expresa como el cociente entre el calor cedido por un cuerpo y su temperatura absoluta (Real Academia Española 2021c)

**Movimiento browniano:** Movimiento aleatorio de las partículas en un fluido, como resultado de chocar con las moléculas de dicho fluido (Concepto Definición 2021)

**PH Flash:** Rutina de código en lenguaje de programación.

**Scripting:** Lenguaje de programación que ejecuta diversas funciones en el interior de un programa de computador (7Gaus 2021)

## BIBLIOGRAFIA.

7GRAUS. *Significado de Script* [blog]. [Consulta: 31 de julio del 2021]. Disponible en: <https://www.significados.com/script/>.

ATARÉS HUERTA, Lorena. *La ley de Raoult* [blog]. España: Universidad Politécnica de Valencia [Consulta: 9 de julio del 2021]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68313/Atar%C3%A9s%20-%20La%20ley%20de%20Raoult.pdf?sequence=1>.

ATLAS COPCO AIRPOWER NV, *Manual de aire comprimido* [en línea]. Bélgica: Atlas Copco Airpower NV, 2011. [Consulta: 12 de febrero del 2019]. ISBN 9789081535809. Disponible en: <https://atlascopeargentina.com/wp-content/uploads/2018/04/Manual-de-Aire-Comprimido-7°-Edición-Español.pdf>

ATLAS COPCO AIRPOWER NV, *Filtros de aire comprimido* [en línea]. Bélgica: Atlas Copco Airpower NV, 2019. [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: [https://www.atlascope.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/air-dryers/compressed-air-filters/Filters\\_antwerp\\_leaflet\\_ES\\_2935493244.pdf](https://www.atlascope.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/air-dryers/compressed-air-filters/Filters_antwerp_leaflet_ES_2935493244.pdf)

BALMA. *Compresseurs d'air à pistons Catálogo* [en línea]. Italia: MultiAir Italia, 2017. [Consulta: 12 marzo 2021]. Disponible en: <http://www.compressoridelloro.com/pdf/pistoni.pdf>

BAYAS URQUIZO, Emilio Israel. (2016). *Reingeniería del sistema de aire comprimido, utilizado para la fabricación y reparación de carrocerías en la Empresa Manser* (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2016. pp. 8-37. [Consulta: 6 de mayo 2019]. Disponible en: <http://dspace.espe.edu.ec/handle/123456789/6195>

CARNICER ROYO, E. *Aire comprimido*. 2ª Ed. Madrid- España: Paraninfo, 1994, pp. 83-214.

CENGEL, Yunus; & BOLES, Michael. *Termodinámica*. 6ª Ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2009, pp. 914-915.

CHUQUÍN VASCO, Juan; et al. *Lectura e interpretación de planos para la industria petrolera*. Guayaquil-Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador, 2019. ISBN 978-9942-802-11-8, pp. 28- 47.

CONCEPTO DEFINICIÓN. *Movimiento Browniano* [blog]. 2021. [Consulta: 31 julio 2021]. Disponible en: <https://conceptodefinicion.de/movimiento-browniano/>.

CONSEJO MUNICIPAL DEL GAD GUANO. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Guano*. Guano-Ecuador: Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Guano, 2015, pp. 67-68.

DWSIM. *Acerca de DWSIM - El simulador de procesos químicos de código abierto* [blog]. 2020. [Consulta: 18 noviembre 2020]. Disponible en: <https://dwsim.inforside.com.br/new/index.php/about/>.

GARCÍA LÓPEZ, Antonio. *Proyecto Básico de Ejecución de la Edificación y Nuevas Instalaciones de REPUESTALIA S.L.* (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Universidad de Sevilla, E.T.S. Ingenieros Industriales. Sevilla-España. 2011. pp. 364-365. [Consulta: 21 febrero 2021]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4910/>.

GARDNER DENVER INC. “ Quick-Lock Tubing Flow Rates”. *Quick-Lock Tubing* (2013), ( United State of America) p. 7.

HESSE, Stefan. *Aire comprimido, fuente de energía*. Alemania: Festo AG & Co. 2002. pp. 37-65.

NTE INEN 440:1984. *Colores de identificación de tuberías*.

KAESER COMPRESORES. *Técnica de aire comprimido*. Zaragoza-España: Kaeser Compresores, S.L. 2010, pp. 4-43.

KAESER COMPRESORES. *Secadores frigoríficos de bajo consumo*. Zaragoza- España: Kaeser Compresores, S.L. 2011, pp. 18-19.

MEDEIROS, Daniel. “Unit Operation Models”. *DWSIM-Open Source Chemical Process Simulator User Guide*, vol. 6 (2020). (Brasil) pp. 68-88.

PARKER HANNIFIN CORPORATION. *Introducción a las normas ISO de calidad del aire*. [en línea]. Inglaterra: Domnick Hunter Industrial Division, 2015. [Consulta: 7 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.oga.com.co/ogaen/wp-content/uploads/2015/08/ANEXO-1-CALIDAD-DE-AIRE-NORMA-ISO.pdf>.

RAMÍREZ ZAMORA, Dumas. Rediseño de red de distribución de aire comprimido en Planta Geotérmica Pailas I. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería electromecánica. Costa Rica. 2018. pp. 28-75. [Consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2238/10052>.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Disolución* | *Definición* | *Diccionario de la lengua española* | RAE - ASALE. [blog]. 2021a [Consulta: 31 julio 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/disoluci%C3%B3n?m=form>.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Entalpía* | *Definición* | *Diccionario de la lengua española* | RAE - ASALE. [blog]. 2021b [Consulta: 31 julio 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/entalp%C3%ADa?m=form>.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. *Entropía* | *Definición* | *Diccionario de la lengua española* | RAE - ASALE. [blog]. 2021c [Consulta: 31 julio 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/entrop%C3%ADa?m=form>.

SÁNCHEZ CARRIÓN, E. Diseño de un sistema de distribución de aire comprimido para una máquina envasadora de líquido en la empresa SIRCARSA. (Trabajo de titulación). (Pregrado). [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2012. pp.45-50. [Consulta: 8 julio 2021]. Disponible en: <http://dspace.epoch.edu.ec/handle/123456789/2354>.

**ANEXOS.**

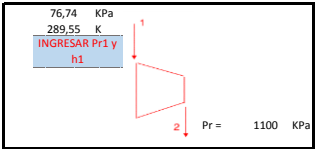
**ANEXO A:**



NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TITULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

DATOS DE DISEÑO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Caudal Estándar	Qstd	m³/s   l/s	0,0276   28
Presión Estándar (ISO 1217)	Pstd	KPa   bar   psi	100   1   14,5038
Presión atmosférica a la altura de operación	Pact	KPa   bar   psi	76,74   0,7674   11,130
Presión real de Operación	Pr	KPa   bar   psi	1100   11   159,542
Temperatura Estándar (ISO 1217)	*Tstd	°C   K   °R	20   293,15   527,67
Temperatura a condiciones actuales	*Tact	°C   K   °R	16,4   289,55   521,19
Temperatura real de operación a la descarga	*Tr	°C   K   °R	21,4   294,55   530,19
Densidad estándar	pstd	kg/m³	1,204
Eficiencia adiabática del compresor	η	%	75
Viscosidad Dinámica a la temperatura de operación	μ	N.s/m²	1,82E-05
Rugosidad	ε	mm	0,15
Longitud de tubería vertical	LA	m	3,285
Longitud de tubería de distribución	LB	m	55,2111
Longitud de tubería de servicio	LC	m	2,5

CÁLCULOS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DEL CAUDAL A CONDICIONES ACTUALES</b> $Q_{act} = \frac{P_{std} \cdot Q_{std} \cdot T_{act}}{P_{act} \cdot T_{std}}$ $Q_{act} = (100 \cdot 0,0276 \cdot 289,55) / (293,15 \cdot 76,74)$	Qact	m³/s   l/s	0,0355   35,5239
<b>• CALCULO DEL CAUDAL REAL DE FLUJO COMPRIMIDO</b> $Q_r = \frac{P_{act} \cdot Q_{act} \cdot T_r}{T_{act} \cdot P_r}$ $Q_r = (76,74 \cdot 0,0355 \cdot 294,55) / (289,55 \cdot 1100)$	Qr	m³/s   l/s	0,002521   2,5211
<b>• CALCULO DE LA DENSIDAD A LA PRESION Y TEMPERATURA ACTUAL</b> $\rho_{act} = \frac{P_{act} \cdot \rho_{std} \cdot T_{std}}{P_{std} \cdot T_{act}}$ $\rho_{act} = (76,74 \cdot 1,204 \cdot 293,15) / (100 \cdot 289,55)$	pact	kg/m³	0,9354
<b>• CALCULO DE LA DENSIDAD A LA PRESION Y TEMPERATURA DE OPERACIÓN</b> $\rho_r = \frac{P_r \cdot \rho_{act} \cdot T_{act}}{T_r \cdot P_{act}}$ $\rho_r = (1100 \cdot 0,9354 \cdot 289,55) / (294,55 \cdot 76,74)$	pr	kg/m³	13,1811
<b>• CALCULO DEL FLUJO MÁSSICO</b> $m' = \rho_{act} \cdot Q_{act}$ $m' = 0,9354 \cdot 0,0355$	m'	kg/s	0,0332

CÁLCULOS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DE LA POTENCIA REAL DEL COMPRESOR</b>  $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ $r_p = 1100 / 76,74$ $Pr_2 = r_p \cdot Pr_1$ $Pr_2 = 14,3341 \cdot 1,2246$ $W_{cs} = m'(h_{2s} - h_1)$ $W_{cs} = 0,0332 \cdot (620,0516 - 289,7082)$ $W_{cr} = \frac{W_{cs}}{\eta}$ $W_{cr} = 10,9774 / (75 \cdot 0,01)$ $h_2 = \frac{W_{cr}}{m'} + h_1$ $h_2 = (14,6366 / 0,0332) + 289,7082$	rp	-	14,3341
	Pr1	-	1,2246
	h1	kJ/Kg	289,7082
	Pr2	-	17,5536
	T2s	K	612,3925
	h2s	kJ/Kg	620,0516
	Wcs	KW   Hp	10,9774   14,7210
	Wcr	KW   Hp	14,6366   19,6280
	h2	kJ/Kg	730,1661
<b>• CALCULO DEL CALOR DE SALIDA EN EL POST ENFRIADOR</b> $q_s = m' \cdot (h_1 - h_2)$ $q_s = 0,0332 \cdot (730,1661 - 294,7191)$	h3	kJ/Kg	294,7191
	qs	KW	14,4701

NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TÍTULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DEL CONDENSADO</b>				
INSERTAR PRESION DE SATURACIÓN @ 16,4 °C				
		Ps_in	KPa	1,8831
		φ	%	72
		Ra	Kpa* m³/kg * K	0,287
		Rv	Kpa* m³/kg * K	0,4615
		Pv_in	KPa	1,3558
		Pa_in	KPa	75,38
		ω_in	kg vapor / kg aire	0,0112
		Va_in	m³/kg aire	1,1024
		Vv_in	m³/kg vapor	98,5574
		ma	kg aire / s	0,032225
		mv_in	kg vapor / s	0,000361
		Ps_out	KPa	2,5718
		Pv_out	KPa	2,5718
		ω_out	kg vapor / kg aire	0,0015
		mv_out	kg vapor / s	0,000047
		mL	kg H2O / s	0,000314

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR		
<b>• CALCULO DE DIÁMETROS DE TUBERÍA</b>						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vertical</li> <li>De distribución</li> <li>De servicio</li> </ul>	$d_A = ((450 * (35,5239^{1,85} * 3,285) / (0,7674 * 0,02))^{1/5})$ $d_B = ((450 * (35,5239^{1,85} * 55,2111) / (0,7674 * 0,05))^{1/5})$ $d_1 = ((450 * (1,9306^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_2 = ((450 * (0,5148^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_3 = ((450 * (11,7126^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_4 = ((450 * (0,5577^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_5 = ((450 * (6,4355^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_6 = ((450 * (1,1155^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_7 = ((450 * (11,7984^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_8 = ((450 * (1,2871^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_9 = ((450 * (3,2177^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_{10} = ((450 * (1,9306^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_{11} = ((450 * (2,4283^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$ $d_{12} = ((450 * (2,5742^{1,85} * 2,5) / (0,7674 * 0,03))^{1/5})$	<b>dA</b> <b>dB</b> <b>d1</b> <b>d2</b> <b>d3</b> <b>d4</b> <b>d5</b> <b>d6</b> <b>d7</b> <b>d8</b> <b>d9</b> <b>d10</b> <b>d11</b> <b>d12</b>	mm mm mm mm mm mm mm mm mm mm mm mm mm mm	in in in in in in in in in in in in in in	37,1905 54,4430 11,0538 6,7783 21,5379 6,9820 17,2575 9,0232 21,5962 9,5139 13,3535 11,0538 12,0328 12,2953	1,4642 2,1434 0,4352 0,2669 0,8479 0,2749 0,6794 0,3552 0,8502 0,3746 0,5257 0,4352 0,4737 0,4841

Grupo de tuberías	Verticales	De distribución	De servicio	Total
Δp admisibles (bar)	0,02	0,05	0,03	0,1

$$d = \sqrt[5]{450 \times \frac{Q^{1,85} \times L}{P_{act} \times \Delta p}}$$

Donde:  
d : Diámetro interno de tubería [mm]  
Δp : Caída de presión [bar]  
Q : Caudal de aire, FAD [l/s]  
L : longitud de tubería [m]  
P<sub>act</sub> : Presión absoluta inicial [bar(a)]

NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TITULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

•CALCULO DE LONGITUDES EQUIVALENTES POR ACCESORIOS

Seleccione el diámetro del grupo de tuberías		Valor	Válvula de bola totalmente abierta	Válvula de diafragma totalmente abierta	Válvula angular totalmente abierta	Válvula de globo	Válvula antirretorno de clapeta	Codo R = 2d	Codo R = d	Angulo 90°	Te, salida en línea	Te, salida angular	Reductor	
• TUBERÍA VERTICAL		Valor	14,7	4,2	11	22,1	5,9	0,9	1,2	4,2	1,5	4,4	1,8	
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 73,7 \text{ mm}$		Número de accesorios	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
• TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN		Valor	14,7	4,2	11	22,1	5,9	0,9	1,2	4,2	1,5	4,4	1,8	
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 73,7 \text{ mm}$		Número de accesorios	6	0	0	0	0	0	4	0	12	1	0	
• TUBERÍA DE SERVICIO		Número de accesorios	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$		Valores	3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	1
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	2
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 24,3 \text{ mm}$			4,9	1,5	3,9	7,3	1,9	0,3	0,4	1,5	0,3	1,5	0,5	3
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	4
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	5
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	6
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 24,3 \text{ mm}$			4,9	1,5	3,9	7,3	1,9	0,3	0,4	1,5	0,3	1,5	0,5	7
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	8
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	9
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	10
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	11
LONGITUDES EQUIVALENTES @ $\Phi_{int} = 15,5 \text{ mm}$			3,1	0,9	2,7	4,7	1,2	0,2	0,3	0,9	0,2	0,9	0,4	12

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD		VALOR	
• Tubería vertical	$LeqA = 1 \cdot 14,7 + 0 \cdot 4,2 + 0 \cdot 11 + 0 \cdot 22,1 + 0 \cdot 5,9 + 0 \cdot 0,9 + 1 \cdot 1,2 + 0 \cdot 4,2 + 0 \cdot 1,5 + 0 \cdot 4,4 + 0 \cdot 1,8$	LeqA	m	ft	15,9	52,1654
• Tubería de distribución	$LeqB = 6 \cdot 14,7 + 0 \cdot 4,2 + 0 \cdot 11 + 0 \cdot 22,1 + 0 \cdot 5,9 + 0 \cdot 0,9 + 4 \cdot 1,2 + 0 \cdot 4,2 + 12 \cdot 1,5 + 1 \cdot 4,4 + 0 \cdot 1,8$	LeqB	m	ft	115,4	378,6089
• Tubería de servicio	$Leq1 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq1	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq2 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq2	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq3 = 1 \cdot 4,9 + 0 \cdot 1,5 + 0 \cdot 3,9 + 0 \cdot 7,3 + 0 \cdot 1,9 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,4 + 0 \cdot 1,5 + 0 \cdot 0,3 + 1 \cdot 1,5 + 1 \cdot 0,5$	Leq3	m	ft	6,9	22,6378
	$Leq4 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq4	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq5 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq5	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq6 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq6	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq7 = 1 \cdot 4,9 + 0 \cdot 1,5 + 0 \cdot 3,9 + 0 \cdot 7,3 + 0 \cdot 1,9 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,4 + 0 \cdot 1,5 + 0 \cdot 0,3 + 1 \cdot 1,5 + 1 \cdot 0,5$	Leq7	m	ft	6,9	22,6378
	$Leq8 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq8	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq9 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq9	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq10 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq10	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq11 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq11	m	ft	4,4	14,4357
	$Leq12 = 1 \cdot 3,1 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 2,7 + 0 \cdot 4,7 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,2 + 0 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,9 + 0 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0,4$	Leq12	m	ft	4,4	14,4357

NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TITULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DE LA VELOCIDAD REAL EN TUBERÍAS</b>				
• VERTICAL	$V_{real} = \frac{4 \cdot Q_{real}}{\pi \cdot \phi_{int}^2}$			
( 8 m/s velocidad máxima recomendada )	$V_{realA} = (4 \cdot 0,0025) / (\pi \cdot 0,0737^2)$	VrealA	m/s	0,5910
				Diámetro correcto
• DE DISTRIBUCIÓN	$V_{real} = \frac{4 \cdot Q_{real}}{\pi \cdot \phi_{int}^2}$			
( 8 m/s velocidad máxima recomendada )	$V_{realB} = (4 \cdot 0,0025) / (\pi \cdot 0,0737^2)$	VrealB	m/s	0,5910
				Diámetro correcto
• DE SERVICIO	$V_{real} = \frac{4 \cdot Q_{real}}{\pi \cdot \phi_{int}^2}$			
( 15 m/s velocidad máxima recomendada )	1 $V_{real1} = (4 \cdot 0,000137 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal1	m/s	0,5678
	2 $V_{real2} = (4 \cdot 0,000037 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal2	m/s	0,1514
	3 $V_{real3} = (4 \cdot 0,000831 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0243078^2)$	Vreal3	m/s	1,4007
	4 $V_{real4} = (4 \cdot 0,00004 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal4	m/s	0,1640
solo caudal compr (m3/S) de maquinas	5 $V_{real5} = (4 \cdot 0,000457 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal5	m/s	1,8928
	6 $V_{real6} = (4 \cdot 0,000079 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal6	m/s	0,3281
. (García Antonio, 2011, p. 365)	7 $V_{real7} = (4 \cdot 0,000837 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0243078^2)$	Vreal7	m/s	1,4110
	8 $V_{real8} = (4 \cdot 0,000091 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal8	m/s	0,3786
	9 $V_{real9} = (4 \cdot 0,000228 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal9	m/s	0,9464
	10 $V_{real10} = (4 \cdot 0,000137 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal10	m/s	0,5678
	11 $V_{real11} = (4 \cdot 0,000172 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal11	m/s	0,7142
	12 $V_{real12} = (4 \cdot 0,000183 \cdot 0,68 \cdot 1,15) / (\pi \cdot 0,0155^2)$	Vreal12	m/s	0,7571
				Diámetro correcto

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DEL NUMERO DE REYNOLDS</b>				
• VERTICAL	$Re = \frac{\phi_{int} \cdot V_{real} \cdot \rho_{ope}}{\mu}$			
	$ReA = (0,0737 \cdot 0,591 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	ReA	-	31595
• DE DISTRIBUCIÓN	$ReB = (0,0737 \cdot 0,591 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	ReB	-	31595
• DE SERVICIO	1 $Re1 = (0,0155 \cdot 0,5678 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re1	-	6385
	2 $Re2 = (0,0155 \cdot 0,1514 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re2	-	1703
	3 $Re3 = (0,0243078 \cdot 1,4007 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re3	-	24699
	4 $Re4 = (0,0155 \cdot 0,164 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re4	-	1844
	5 $Re5 = (0,0155 \cdot 1,8928 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re5	-	21283

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
	$Re = \frac{\phi_{int} \cdot V_{real} \cdot \rho_{ope}}{\mu}$			
	6 $Re6 = (0,0155 \cdot 0,3281 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re6	-	3689
	7 $Re7 = (0,0243078 \cdot 1,411 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re7	-	24880
	8 $Re8 = (0,0155 \cdot 0,3786 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re8	-	4257
	9 $Re9 = (0,0155 \cdot 0,9464 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re9	-	10641
	10 $Re10 = (0,0155 \cdot 0,5678 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re10	-	6385
	11 $Re11 = (0,0155 \cdot 0,7142 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re11	-	8031
	12 $Re12 = (0,0155 \cdot 0,7571 \cdot 13,1811) / 0,00001817$	Re12	-	8513

NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TITULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN</b>				
• VERTICAL	$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{e}{3,7 \times D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$	fA	-	0,0283
• DE DISTRIBUCIÓN	fB = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 73,7) + (5,74/31595*0,9)))^2)	fB	-	0,0283
• DE SERVICIO	1 f1 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/6385*0,9)))^2)	f1	-	0,0464
	2 f2 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/1703*0,9)))^2)	f2	-	0,0617
	3 f3 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 24,3078) + (5,74/24699*0,9)))^2)	f3	-	0,0359
	4 f4 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/1844*0,9)))^2)	f4	-	0,0603
	5 f5 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/21283*0,9)))^2)	f5	-	0,0408
	6 f6 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/3689*0,9)))^2)	f6	-	0,0511
	7 f7 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 24,3078) + (5,74/24880*0,9)))^2)	f7	-	0,0359
	8 f8 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/4257*0,9)))^2)	f8	-	0,0497
	9 f9 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/10641*0,9)))^2)	f9	-	0,0434
	10 f10 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/6385*0,9)))^2)	f10	-	0,0464
	11 f11 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/8031*0,9)))^2)	f11	-	0,0449
	12 f12 = 1,325 / ((LN((0,15/3,7 * 15,5) + (5,74/8513*0,9)))^2)	f12	-	0,0446

CALCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
<b>• CALCULO DE LA PERDIDA DE PRESION</b>				
• VERTICAL	$\Delta P = \frac{f \cdot L \cdot V_{real}^2 \cdot \rho_{ope}}{2 \cdot \phi_{int} \cdot 1000}$	ΔPA	KPa bar psi	0,0169 0,0002 0,0025
• DE DISTRIBUCIÓN	ΔPB = (0,0283 * (55,2111 + 115,4) * (0,591^2) * 13,1811) / (2 * 0,0737 * 1000)	ΔPB	KPa bar psi	0,1506 0,0015 0,0218
• DE SERVICIO	1 ΔP1 = (0,0464 * (2,5 + 4,4) * (0,5678^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP1	KPa bar psi	0,0439 0,0004 0,0064
	2 ΔP2 = (0,0617 * (2,5 + 4,4) * (0,1514^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP2	KPa bar psi	0,0041 0,0000 0,0006
	3 ΔP3 = (0,0359 * (2,5 + 6,9) * (1,4007^2) * 13,1811) / (2 * 0,0243078 * 1000)	ΔP3	KPa bar psi	0,1797 0,0018 0,0261
	4 ΔP4 = (0,0603 * (2,5 + 4,4) * (0,164^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP4	KPa bar psi	0,0048 0,0000 0,0007
	5 ΔP5 = (0,0408 * (2,5 + 4,4) * (1,8928^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP5	KPa bar psi	0,4287 0,0043 0,0622
	6 ΔP6 = (0,0511 * (2,5 + 4,4) * (0,3281^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP6	KPa bar psi	0,0161 0,0002 0,0023
	7 ΔP7 = (0,0359 * (2,5 + 6,9) * (1,411^2) * 13,1811) / (2 * 0,0243078 * 1000)	ΔP7	KPa bar psi	0,1822 0,0018 0,0264
	8 ΔP8 = (0,0497 * (2,5 + 4,4) * (0,3786^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP8	KPa bar psi	0,0209 0,0002 0,0030
	9 ΔP9 = (0,0434 * (2,5 + 4,4) * (0,9464^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP9	KPa bar psi	0,1140 0,0011 0,0165
	10 ΔP10 = (0,0464 * (2,5 + 4,4) * (0,5678^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP10	KPa bar psi	0,0439 0,0004 0,0064
	11 ΔP11 = (0,0449 * (2,5 + 4,4) * (0,7142^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP11	KPa bar psi	0,0672 0,0007 0,0097
	12 ΔP12 = (0,0446 * (2,5 + 4,4) * (0,7571^2) * 13,1811) / (2 * 0,0155 * 1000)	ΔP12	KPa bar psi	0,0749 0,0007 0,0109

NOMBRE:	ALEX EDUARDO MACAS RIVERA	FECHA:	04/02/2021
TÍTULO:	VALIDACIÓN DEL CÁLCULO DE UNA RED DE AIRE COMPRIMIDO, MEDIANTE EL SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO DWSIM Y HOJAS DE CÁLCULO.	TUTOR:	ING. JUAN CHUQUIN
		MIEMBRO:	ING. EDWIN POZO

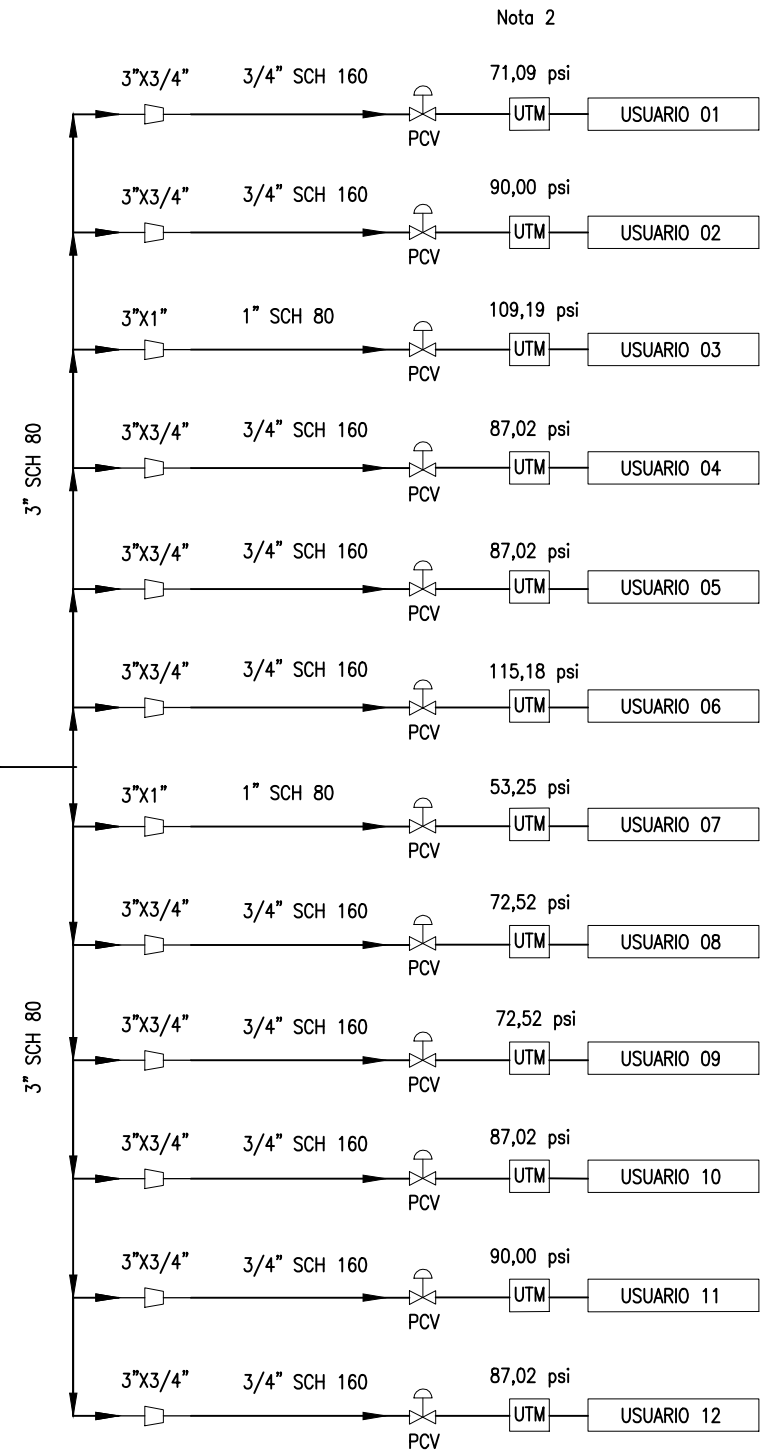
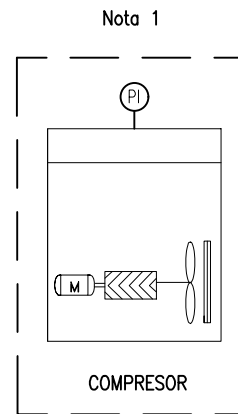
CÁLCULOS		SÍMBOLO	UNIDAD			VALOR		
<p>• PRESIONES A LA SALIDA DE LA TUBERIAS DE DISTRIBUCIÓN</p> $P_{Si} = (P_i - \Delta P_A - \Delta P_B) - \Delta P_{DE\ SERVICIO_i}$								
1	$P_{s1} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0439$	Ps1	KPa	bar	psi	1099,7886	10,9979	159,5111
2	$P_{s2} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0041$	Ps2	KPa	bar	psi	1099,8284	10,9983	159,5169
3	$P_{s3} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,1797$	Ps3	KPa	bar	psi	1099,6528	10,9965	159,4914
4	$P_{s4} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0048$	Ps4	KPa	bar	psi	1099,8277	10,9983	159,5168
5	$P_{s5} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,4287$	Ps5	KPa	bar	psi	1099,4038	10,9940	159,4553
6	$P_{s6} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0161$	Ps6	KPa	bar	psi	1099,8164	10,9982	159,5152
7	$P_{s7} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,1822$	Ps7	KPa	bar	psi	1099,6503	10,9965	159,4911
8	$P_{s8} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0209$	Ps8	KPa	bar	psi	1099,8116	10,9981	159,5145
9	$P_{s9} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,114$	Ps9	KPa	bar	psi	1099,7185	10,9972	159,5010
10	$P_{s10} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0439$	Ps10	KPa	bar	psi	1099,7886	10,9979	159,5111
11	$P_{s11} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0672$	Ps11	KPa	bar	psi	1099,7653	10,9977	159,5078
12	$P_{s12} = (1100 - 0,0169 - 0,1506) - 0,0749$	Ps12	KPa	bar	psi	1099,7576	10,9976	159,5066



**ANEXO B:**



EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Compresor	BALMA NS59S/500, 7.5 HP, 400 V, 50 Hz, 160 PSI.
Secador	KAESER TA 8, 0.29 KW, 230 V, 50 Hz, 0.85 m <sup>3</sup> /min.
Recibidor	500 LT/AIR
Manómetro	0-300 PSI.
Filtro	65 l/s, 102 PSIG.
Válvulas de bola	1440 PSI@100°F, SS body (ASTM-A351 Gr CF8M or ASTM-A182 F316), 316 SS ball and stem, filled Teflon seats, threaded ends per ASME B1.20.1, reduce port, lever operated. Fire safe. Design per API 608- Test per API 598
Válvulas de control de presión (PCV)	Presión de salida, la indicada.
Usuario 01	Prensa IRONFOX AS 1800, 71.09 PSI, 1.93 L/s.
Usuario 02	Grapadora AIRPRESS modelo XMGD8025, 90 PSI, 0.51 L/s.
Usuario 03	Rayadora de contorno de suelas, 109.19 PSI, 11.71 L/s.
Usuario 04	Máquina para aplicar topes termoadheribles, modelo V, 87.02 PSI, 0.56 L/s.
Usuario 05	Moldeadora de talones marca Norba N89CF, 87.02 PSI, 6.44 L/s.
Usuario 06	Planchadora de cañas de bota marca DISA, 115.18 PSI, 1.12 L/s.
Usuario 07	Máquina de empiolar ADLER, 53.25 PSI, 11.8 L/s.
Usuario 08	Repujadora, 72.52 PSI, 1.29 L/s.
Usuario 09	Máquina de rayar costura y colocar cinta marca FRA-COR, 72.52 PSI, 3.22 L/s.
Usuario 10	Horno Reactivador, 87.02 PSI, 1.93 L/s.
Usuario 11	Pulidor esmeril Neumático, 90 PSI, 2.43 L/s.
Usuario 12	Pistolas Sopladoras de aire, 87.02 PSI, 2.57 L/s.



				TOLERANCIA	PESO	MATERIAL		
				FECHA	NOMBRE	DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO E INSTRUMENTOS TÍTULO		
				DIB.	DIBUJO			ESCALA
				REV.	REVISO			NO A ESCALA
				APRO.	APROBO	01 NUMERO		
				FIRMA				MDR
				EDIC.	MODIFI.	FECHA	NOMBRE	SUSTITUCION

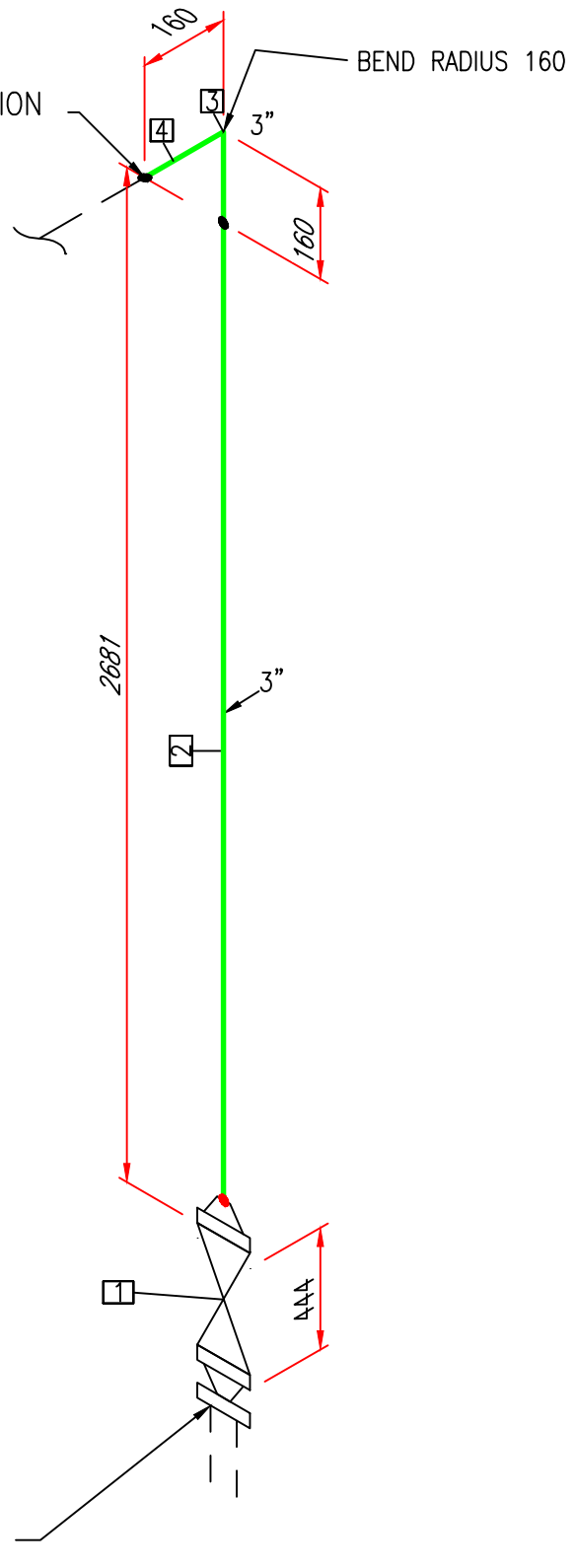
NOTAS GENERALES

- Notas:
- El compresor viene con manómetro instalado de fábrica.
  - Cada usuario viene equipado con su propia unidad de mantenimiento de aire comprimido.

**ANEXO C:**

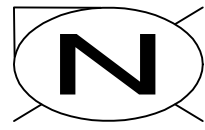


CONT'D ON  
 TUBERIA DE DISTRIBUCION  
 W 70  
 N 4468  
 EL +3285



BILL OF MATERIALS			
ID	QTY	ND	DESCRIPTION
1	1	3"	BALL VALVE, CA1-2S
2	2.7m	3"	PIPE, SCH 80, THD, ASTM-A53 GR B, GALV
3	1	3"	ELBOW, THD, ASTM-A105, GALV
4	0.2m	3"	PIPE, SCH 80, THD, ASTM-A53 GR B, GALV

				TOLERANCIA	PESO	MATERIAL		
				FECHA	NOMBRE			
				DIB.	DIBUJO	TUBERIA VERTICAL TITULO		ESCALA
				REV.	REVISO			NO A ESCALA
				APRO.	APROBO			
				FIRMA		01 NUMERO		MDR
						SUSTITUCION		
EDIC.	MODIFI.	FECHA	NOMBRE					



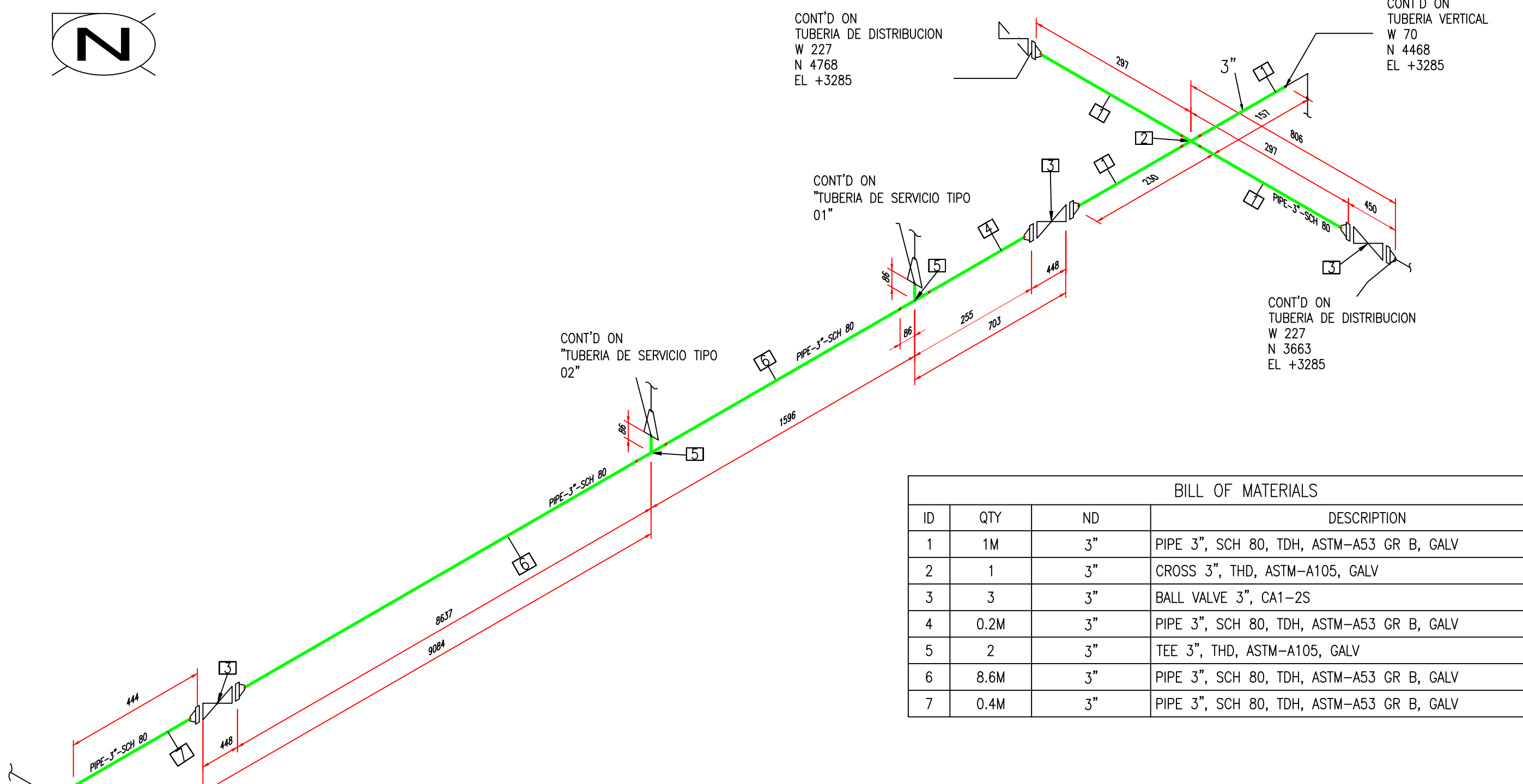
CONT'D ON  
TUBERIA DE DISTRIBUCION  
W 227  
N 4768  
EL +3285

CONT'D ON  
TUBERIA VERTICAL  
W 70  
N 4468  
EL +3285

CONT'D ON  
"TUBERIA DE SERVICIO TIPO  
01"

CONT'D ON  
"TUBERIA DE SERVICIO TIPO  
02"

CONT'D ON  
TUBERIA DE DISTRIBUCION  
W 227  
N 3663  
EL +3285

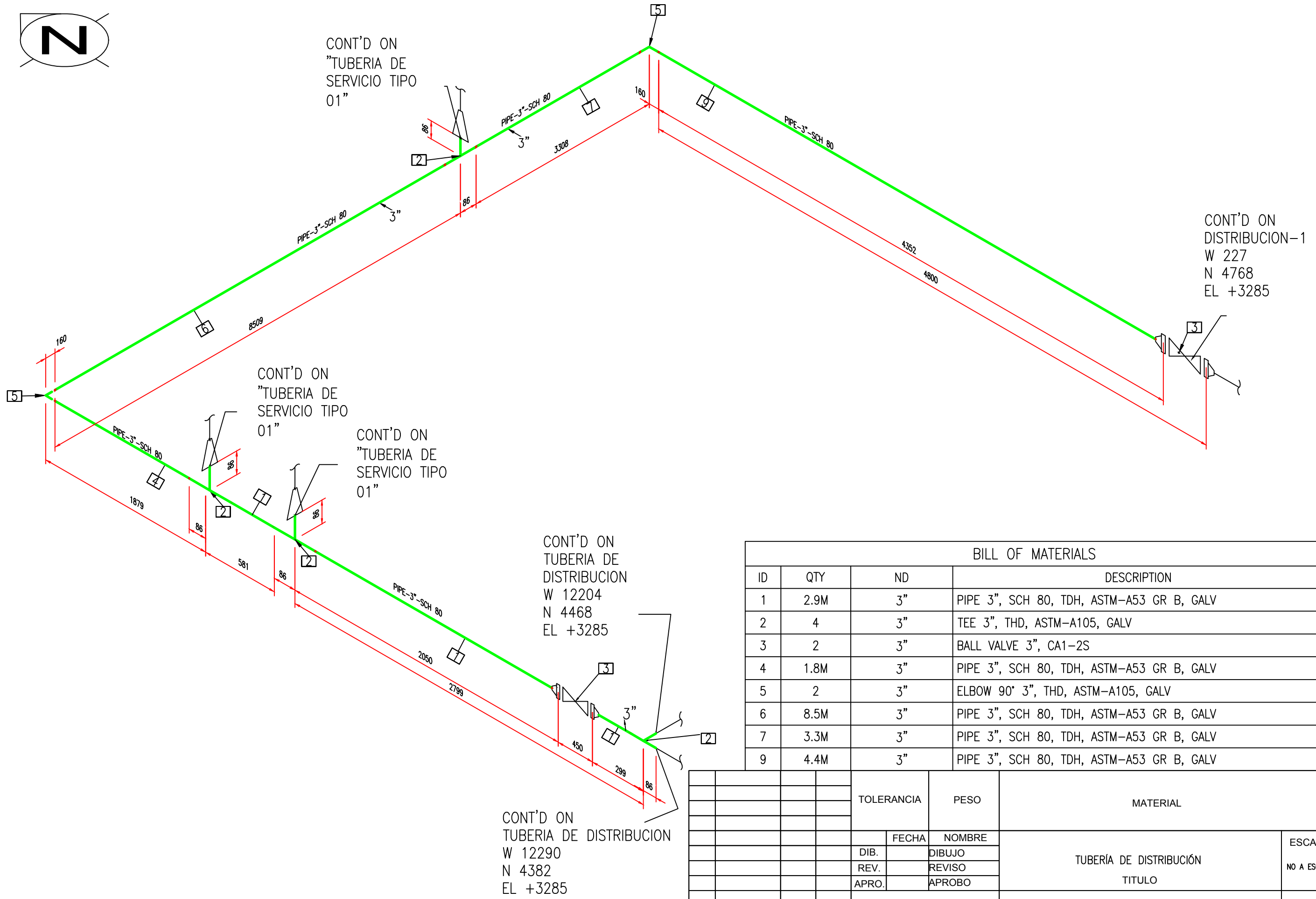


BILL OF MATERIALS			
ID	QTY	ND	DESCRIPTION
1	1M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
2	1	3"	CROSS 3", THD, ASTM-A105, GALV
3	3	3"	BALL VALVE 3", CA1-2S
4	0.2M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
5	2	3"	TEE 3", THD, ASTM-A105, GALV
6	8.6M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
7	0.4M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV

CONT'D ON  
TUBERIA DE DISTRIBUCION  
W 12204  
N 4468  
EL +3285

				TOLERANCIA	PESO	MATERIAL	
				FECHA	NOMBRE		
				DIB.	DIBUJO	TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN TITULO	ESCALA
				REV.	REVISO		NO A ESCALA
				APRO.	APROBO		
				FIRMA		02 NUMERO	MDR
EDIC.	MODIFI.	FECHA	NOMBRE			SUSTITUCION	



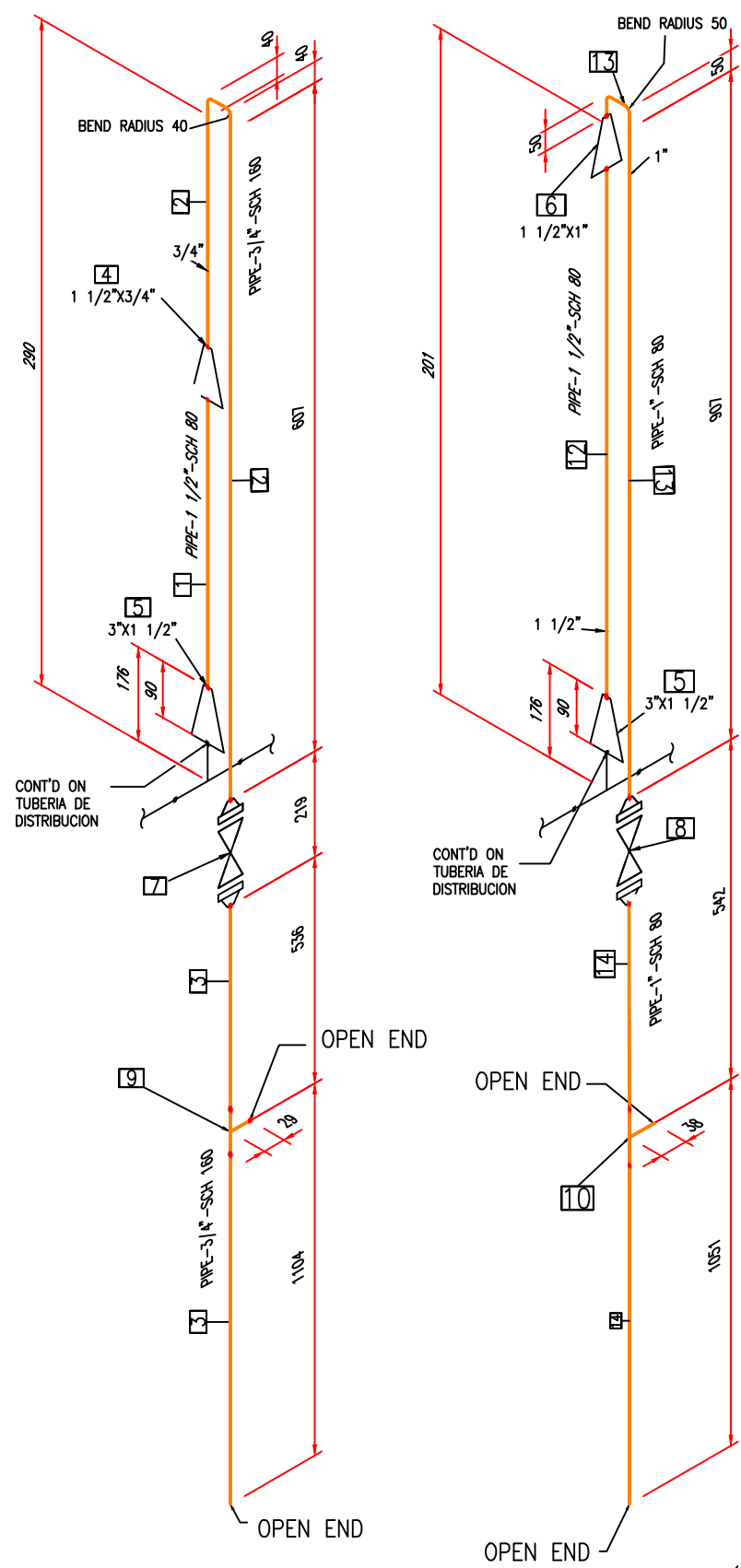


BILL OF MATERIALS

ID	QTY	ND	DESCRIPTION
1	2.9M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
2	4	3"	TEE 3", THD, ASTM-A105, GALV
3	2	3"	BALL VALVE 3", CA1-2S
4	1.8M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
5	2	3"	ELBOW 90° 3", THD, ASTM-A105, GALV
6	8.5M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
7	3.3M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
9	4.4M	3"	PIPE 3", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV

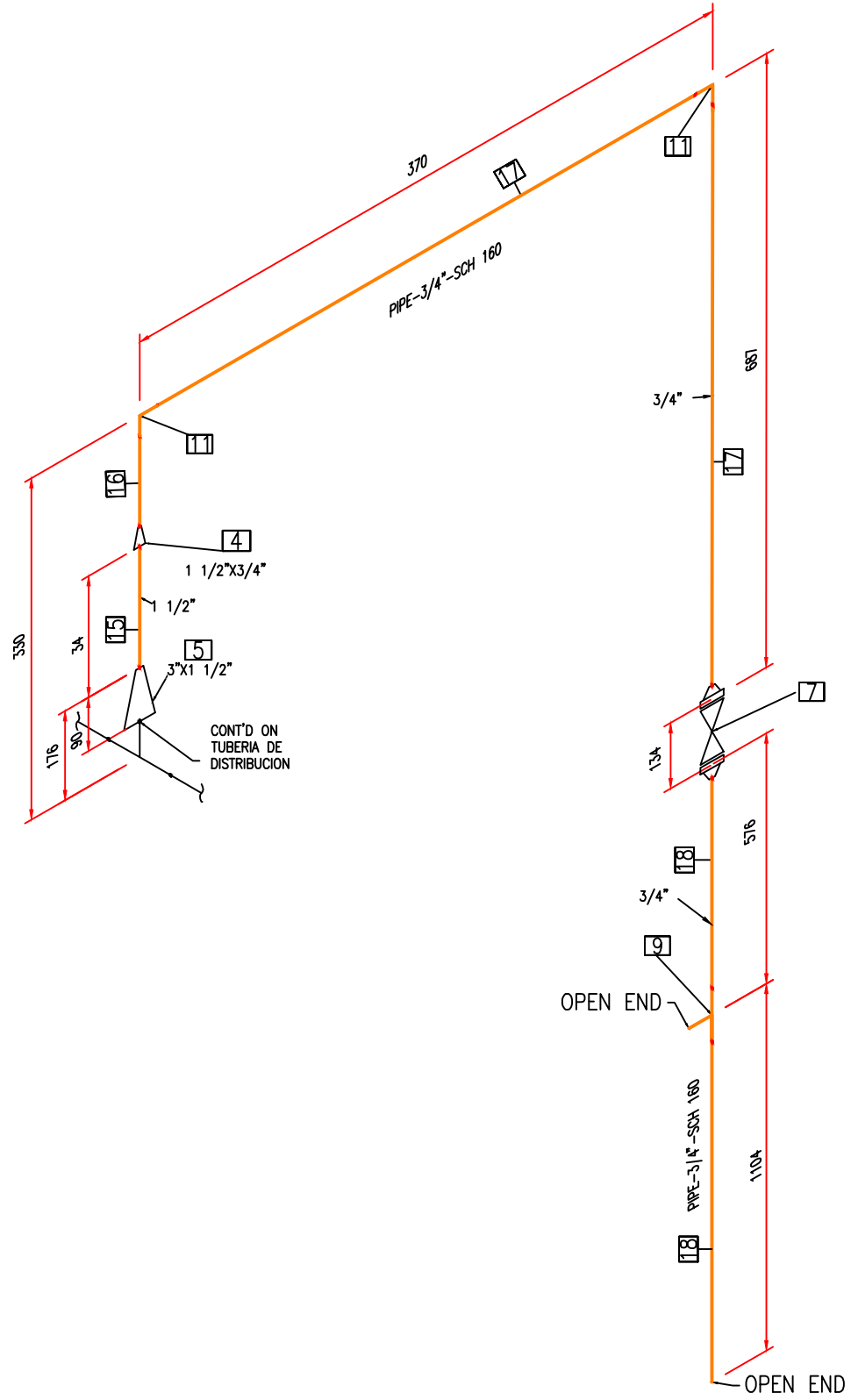
				TOLERANCIA	PESO	MATERIAL		
				FECHA	NOMBRE	TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN TITULO		ESCALA
				DIB.	DIBUJO			NO A ESCALA
				REV.	REVISO			
				APRO.	APROBO	04 NUMERO		MDR
				FIRMA		SUSTITUCION		
EDIC.	MODIFI.	FECHA	NOMBRE					

CONT'D ON  
TUBERIA DE DISTRIBUCION  
W 12290  
N 4382  
EL +3285



TUBERÍA DE SERVICIO TIPO 01

TUBERÍA DE SERVICIO TIPO 02



TUBERÍA DE SERVICIO TIPO 03

BILL OF MATERIALS

ID	QTY	ND	DESCRIPTION
1	0.1M	1 1/2"	PIPE 1 1/2", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
2	0.7M	3/4"	PIPE 3/4", SCH 160, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
3	1.7M	3/4"	PIPE 3/4", SCH 160, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
4	2	1 1/2"x3/4"	REDUCER CONC. 1 1/2"x3/4" THD, ASTM-A105, GALV
5	3	3"x1 1/2"	REDUCER CONC. 3"x1 1/2" THD, ASTM-A105, GALV
6	1	1 1/2"x1"	REDUCER CONC. 1 1/2"x1" THD, ASTM-A105, GALV
7	2	3/4"	BALL VALVE 3/4", CA1-2S
8	1	1"	BALL VALVE 1", CA1-2S
9	2	3/4"	TEE 3/4", THD, ASTM-A105, GALV
10	1	1"	TEE 1", THD, ASTM-A105, GALV
11	2	3/4"	ELBOW 90° 3/4", THD, ASTM-A105, GALV
12	0.1M	1 1/2"	PIPE 1 1/2", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
13	1.1M	1"	PIPE 1", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
14	1.6M	1"	PIPE 1", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
15	0.1M	1 1/2"	PIPE 1 1/2", SCH 80, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
16	0.1M	3/4"	PIPE 3/4", SCH 160, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
17	1.1M	3/4"	PIPE 3/4", SCH 160, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV
18	1.7M	3/4"	PIPE 3/4", SCH 160, TDH, ASTM-A53 GR B, GALV

				TOLERANCIA	PESO	MATERIAL	
				FECHA	NOMBRE		
				DIB.	DIBUJO	TUBERÍA DE SERVICIO	
				REV.	REVISO	TITULO	
				APRO.	APROBO		
				FIRMA		05 NUMERO	
						MDR	
EDIC.	MODIFI.	FECHA	NOMBRE			SUSTITUCION	

**ANEXO D:**



Objet	VERTICAL	DE SERVICIO 12	DE SERVICIO 11
Pressure Drop	4.11052	5.9411	46.3029
Objet	DE SERVICIO 10	DE SERVICIO 09	DE SERVICIO 08
Pressure Drop	29.7856	80.1502	13.6996
Objet	DE SERVICIO 07	DE SERVICIO 06	DE SERVICIO 05
Pressure Drop	135.5	10.4203	311.694
Objet	DE SERVICIO 04	DE SERVICIO 03	DE SERVICIO 02
Pressure Drop	2.24238	133.347	1.97898
Objet	DE SERVICIO 01	DE DISTRIBUCION	
Pressure Drop	29.7838	82.0328	

Objet	B	A
Energy Flow	15.0774	14.4708

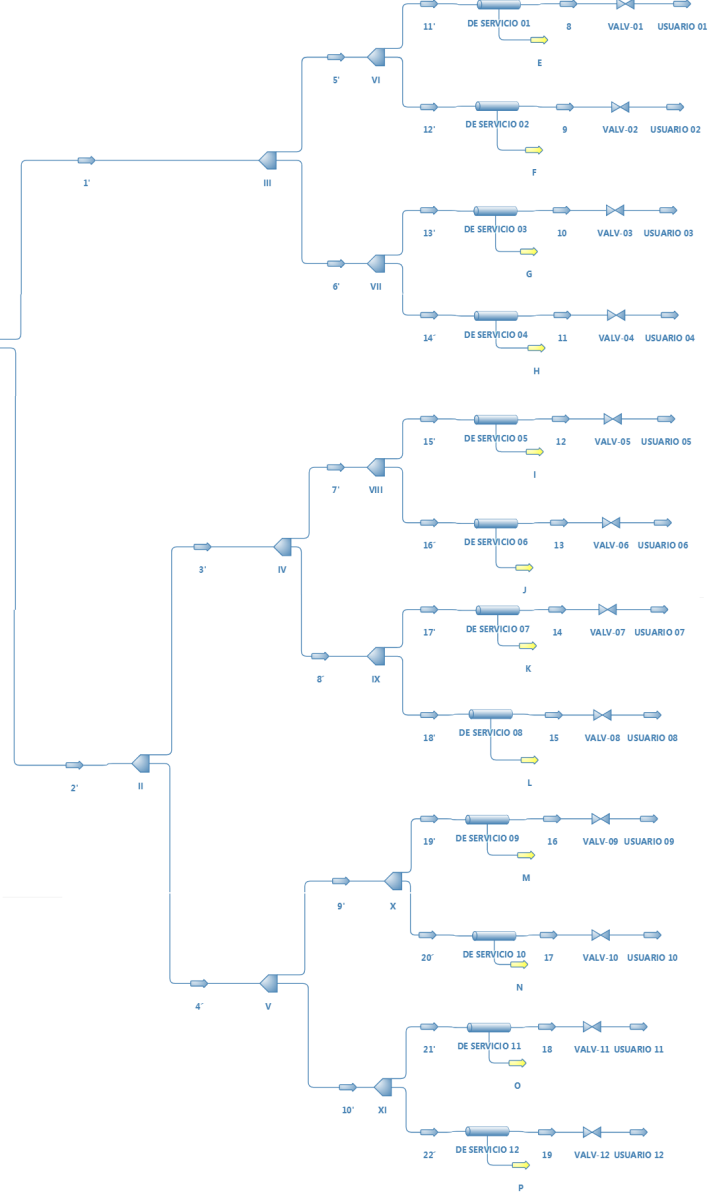
Objet	5	4	3	2	1
Temperature	294.55	294.55	294.55	714.555	289.55
Pressure	1100	1100	1100	1100	76.74
Mass Flow	0.000315236	0.0323302	0.0326454	0.0326454	0.0326454
Volumetric Flow	3.16017E-07	0.00248752	0.00248784	0.00612903	0.0356
Vapor Phase Density	0	12.9969	12.9969	5.32636	0.917005
Vapor Phase Mass Flow	0	0.0323302	0.0323302	0.0326454	0.0326454
Liquid Phase (L) Density	997.529	0	997.529	0	0
Liquid Phase (L) Mass Flow	0.000315236	0	0.000315236	0	0



Objet	9	8	19
Pressure	1099.91	1099.88	1099.86
Objet	18	17	16
Pressure	1099.87	1099.88	1099.83
Objet	15	14	13
Pressure	1099.9	1099.78	1099.9
Objet	12	11	10
Pressure	1099.6	1099.91	1099.78

Objet	USUARIO 12	USUARIO 11	USUARIO 10	USUARIO 09	USUARIO 08	USUARIO 07
Temperature	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55
Pressure	600	620.53	600	500	500	367.166
Mass Flow	0.00182894	0.00172516	0.00137173	0.00228622	0.000914875	0.00838264
Volumetric Flow	0.000257988	0.000235298	0.000193495	0.00038699	0.000154861	0.00193228
Objet	USUARIO 06	USUARIO 05	USUARIO 04	USUARIO 03	USUARIO 02	USUARIO 01
Temperature	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55
Pressure	794.166	600	600	490	620.528	490.166
Mass Flow	0.000792414	0.00457261	0.000396662	0.00832119	0.000365789	0.00137193
Volumetric Flow	8.44485E-05	0.000645007	5.59527E-05	0.00143728	4.98909E-05	0.000236886

Objet	9	8	19	18	17	16
Temperature	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55
Pressure	1099.91	1099.88	1099.86	1099.87	1099.88	1099.83
Mass Flow	0.000365789	0.00137193	0.00182894	0.00172516	0.00137173	0.00228622
Volumetric Flow	2.81465E-05	0.000105569	0.000140738	0.000132752	0.000105554	0.000175931
Objet	15	14	13	12	11	10
Temperature	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55	294.55
Pressure	1099.9	1099.78	1099.9	1099.6	1099.91	1099.78
Mass Flow	0.000914875	0.00838264	0.000792414	0.00457261	0.000396662	0.00832119
Volumetric Flow	7.0398E-05	0.0006451	6.09746E-05	0.000351949	3.05221E-05	0.00064037



## **ANEXO E:**



# PROFORMA 2021-0950

Ruc: 0691741710001

masventas.ferreteria@gmail.com

Matriz: Venezuela 18-58 y Juan de Velasco - Tall 032945269 - Riobamba

Obligado a llevar Contabilidad

Cliente: OFAHER FACTORY  
RUC: 0703170746001

Fecha: 05/07/2021

Fono: 0979342188

Dirección: AV 20 DE DICIEMBRE FRENTE AL CAMPAMENTO CRUZ ROJA

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (US\$)	PRECIO TOTAL (US\$)
1	Tubería 3" SCH 80 THD ASTM-A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	9	u	230,16	2.071,44
2	Tubería 1 1/2" SCH 80 THD ASTM-A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	1	u	82,32	82,32
3	Tubería 1" SCH 80 THD ASTM-A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	1	u	43,68	43,68
4	Tubería 3/4" SCH 160 THD ASTM-A53 GR B, GALV x L = 6000 mm	5	u	29,40	147,00
5	Codo 90° 3" THD ASTM-A105, GALV	5	u	18,69	93,45
6	Codo 90° 3/4" THD ASTM-A105, GALV	2	u	0,87	1,75
7	Cruz 3" THD ASTM-A105, GALV	1	u	35,20	35,20
8	Tee 3" THD ASTM-A105, GALV	13	u	22,08	286,98
9	Tee 1" THD ASTM-A105, GALV	2	u	2,36	4,72
10	Tee 1/2" THD ASTM-A105, GALV	10	u	1,20	12,01
11	Reductor 3" x 1 1/2" THD, ASTM-A105, GALV	12	u	8,22	98,68
12	Reductor 1-1/2" x 1" THD, ASTM-A105, GALV	2	u	3,14	6,28
13	Reductor 1-1/2" x 3/4" THD, ASTM-A105, GALV	10	u	3,14	31,42
14	Válvula de bola 3" THD, ASTM-A351, API 608.	7	u	229,02	1.603,12
15	Válvula de bola 1" THD, ASTM-A351, API 608.	2	u	20,87	41,73
16	Válvula de bola 3/4" THD, ASTM-A351, API 608.	10	u	17,30	172,96
				<b>SUBTOTAL</b>	<b>4.732,74</b>
				<b>Gravado IVA 0%</b>	
				<b>Gravado IVA 12%</b>	<b>4.732,74</b>
				<b>Importe del IVA</b>	<b>567,93</b>
				<b>TOTAL</b>	<b>5.300,68</b>

FORMA DE PAGO: CONTADO

LUGAR ENTREGA: AV.20 DE DICIEMBRE FRENTE AL CAMPAMENTO CRUZ ROJA

VALIDEZ OFERTA: 15 días

Atentamente,  
FERKONSA S.A

Empresa ecuatoriana