

# UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Práctica Dirigida sometida a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Química.

---

**Oportunidades de mejora en la formulación de materia prima, configuración de extrusión y sistema de enfriamiento para el aumento del rendimiento en la producción de tubería de PVC.**

---

**CÉSAR ALBERTO CHAVES ZELEDÓN**

*San José, Costa Rica,*  
2021




## TRIBUNAL EXAMINADOR


Práctica Dirigida sometida a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Química.


**Sustentante:**


\_\_\_\_\_  
César Alberto Chaves Zeledón


**Aprobado por:**

  
\_\_\_\_\_  
**Mag. Adolfo Ulate Brenes**  
Profesor - Presidente  
Universidad de Costa Rica

  
\_\_\_\_\_  
**Lic. Allan Mora Vindas**  
Profesor - Director del proyecto  
Universidad de Costa Rica

  
\_\_\_\_\_  
**Ing. Adriana Araya Díaz**  
Profesora - Lectora del proyecto  
Universidad de Costa Rica

  
\_\_\_\_\_  
**M.Sc. Randall Ramírez Loría**  
Profesor - Lector del proyecto  
Universidad de Costa Rica

  
\_\_\_\_\_  
**Lic. Daybis Stuar Tencio González**  
Profesor - Lector del invitado  
Universidad de Costa Rica

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San José,  
Costa Rica, 2021



## **DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL**

Cabe destacar que este proyecto cuenta con confidencialidad parcial según los requerimientos de la empresa que facilitó su realización, consistiendo en una protección frente a posibles competidores. De acuerdo con lo anterior, se hace saber que este documento se publica con una codificación de los datos y restricción de cierta información.



## **DEDICATORIA**

Dedico esta meta de mi carrera personal a mis padres que me han guiado y apoyado durante todo el proceso siendo un gran ejemplo de esfuerzo y perseverancia para conseguir cada día ser una mejor persona.





## AGRADECIMIENTOS

Primordialmente a Dios por brindarme salud y capacidad para superar exitosamente este y muchos retos. Seguido a mis padres, a mi atenta novia y a mi familia que me han apoyado con todo para conseguirlo.

En mi formación académica conocí y compartí con muchas personas que contribuyeron de diferentes maneras con el desarrollo de esta formación, a todos ellos les quiero expresar mis agradecimientos en esta sección de mi trabajo final aunque no pueda mencionarlos a todos uno por uno.

Paula Solano que me ha apoyado enormemente en la dirección de este proyecto, aportando su experiencia y conocimiento para conseguir un proyecto de alta calidad. Renato Murillo, su apoyo durante la carrera fue de bastante ayuda para seguir avanzando exitosamente, compartió bastante de su conocimiento y experiencia conmigo para permitirme aprender más de lo que era necesario. Adriana Araya y Allan Mora porque además de haber sido de mis profesores de alta calidad, aceptaron ser parte de mi comité asesor para que este proyecto avanzara de la mejor manera.

Un especial agradecimiento a todo el personal de Wavin que me apoyó, brindó una mano y tiempo para explicarme el proceso, procedimientos, y discutido las ideas que componen este proyecto. A la Escuela de Ingeniería Química, todos los profesores que ayudaron a construir mi razonamiento crítico para la toma de decisiones y generación de ideas innovadoras para mi desempeño profesional.

Sin menos importancia, finalizo agradeciendo a *Integración IQ*, con los que he compartido y aprendido mucho durante la carrera, siendo indudablemente indispensables para mi formación y a *Los Kaites* con los que he compartido muchos momentos que facilitaron aprender de la vida y estar presentes para contar con ellos en cualquier momento y poder explicarles cómo se controlan procesos. Y a *Puxa-Saco*, sin duda compartimos los mejores momentos universitarios.



## RESUMEN

En este documento se presenta una evaluación de oportunidades de mejora basadas en la Efectividad Global de los Equipos (OEE) y los costos de transformación como indicadores de desempeño de la empresa Amanco/Wavin, Heredia para el año 2020. Los valores de la OEE se concentraron en valores de 75 % a 85 % demostrando contar con una calidad aceptable que se puede mejorar. La OEE era mayormente afectada por la producción del producto Presión Blanco en la línea TS-108 debido a problemas presentados en la conformidad del producto terminado asociado a la mala apariencia interna del producto. Se identificó que entre las principales causas de la mala apariencia interna del producto se debe a exceso de esfuerzos cortantes durante el procesamiento, por lo tanto, se evaluó la formulación del producto y el cabezal de extrusión para disminuir los esfuerzos del material para lograr mejores resultados. Se consiguió por medio de un diseño de experimentos que la cera parafínica, el estearato de calcio y carbonato de calcio, estos dos últimos en interacción, tienen una influencia significativa en la variación de la respuesta reológica conseguida con un reómetro Brabender. Con los aditivos críticos identificados se obtuvo una nueva fórmula para conseguir un comportamiento reológico similar de la mezcla de referencia comparando sus esfuerzos de momento de torsión en un reómetro Brabender. Se obtuvieron diferencias entre el diseño del cabezal de extrusión actual con el diseño teórico recomendado, por lo que se realizaron modificaciones al dado y pin del cabezal, consiguiendo una mejora en la cantidad de producto defectuoso del 100 %.

Por otro lado, los costos de transformación muestran una concentración de costos en el consumo energético de la planta, con un 32 % representado por el sistema de obtención de agua helada para el enfriamiento de los productos. Mediante balances de masa y energía se obtuvo una eficiencia en la transferencia de energía de 30 % debido al desaprovechamiento de la capacidad frigorífica del agua helada en el sistema de enfriamiento, por lo que se aumentó el tiempo de retención del producto con el agua helada y aumentó el número de Reynolds para asegurar flujos turbulentos del agua para conseguir aumentar la eficiencia a un 83 %.



# Índice

	<i>Página</i>
<b>TRIBUNAL EXAMINADOR</b>	<b>I</b>
<b>DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: Competitividad y Productividad</b>	<b>3</b>
1.1 Competitividad . . . . .	3
1.2 Productividad . . . . .	4
1.3 Medición del desempeño . . . . .	4
1.4 Medición del desempeño de gestión . . . . .	5
1.4.1 Rotación de cuentas por cobrar . . . . .	5
1.4.2 Rotación de inventario . . . . .	5
1.4.3 Rotación de activos . . . . .	6
1.4.4 Costo de inventario . . . . .	6
1.4.5 Costo de transformación . . . . .	6
1.4.6 Margen de beneficio . . . . .	6
1.4.7 Retorno sobre la inversión (ROI) . . . . .	7
1.5 Medición del desempeño operativo . . . . .	7
1.5.1 Productividad . . . . .	8
1.5.2 Efectividad global de equipos (OEE) . . . . .	8
1.6 Herramientas de gestión de la cadena de suministro . . . . .	11
1.7 Reconocimiento del estado actual del desempeño de la empresa Aman- co Wavin 2020 . . . . .	14

1.7.1	Medición del desempeño de Amanco-Wavin . . . . .	14
1.7.2	Medición del desempeño operacional en el periodo de enero a setiembre 2020 . . . . .	17
1.7.3	Medición del desempeño de la gestión de los recursos en el periodo de enero a setiembre 2020 . . . . .	20
1.7.4	Declaración de problema . . . . .	23
1.7.5	Producto Presión Blanco . . . . .	24
1.7.6	Determinación de causa raíz . . . . .	26
<b>CAPÍTULO 2: Proceso de transformación de PVC</b>		<b>29</b>
2.1	Tubería PVC . . . . .	29
2.2	Materia Prima . . . . .	30
2.3	Formulación . . . . .	31
2.3.1	Policloruro de Vinilo (PVC) . . . . .	31
2.3.2	Clasificación de los aditivos de PVC . . . . .	32
2.4	Extrusión . . . . .	35
2.4.1	Reología . . . . .	36
2.4.2	Reómetro de momento de torsión Brabender . . . . .	37
2.4.3	Plastificación . . . . .	39
2.4.4	Perfil de momento de torsión y temperatura de plastógrafo . . . . .	39
2.5	Diseño de Experimentos (DOE) . . . . .	42
2.6	Metodología de superficie de respuesta (MSR) . . . . .	43
2.6.1	Región de operabilidad y experimental . . . . .	43
2.6.2	Modelo . . . . .	45
2.7	Diseños factoriales . . . . .	46
2.7.1	Efecto principal y de interacción . . . . .	46
2.7.2	Representación de los efectos principales y de interacción . . . . .	47
2.8	Diseños factoriales fraccionados . . . . .	48
2.8.1	Efectos generadores . . . . .	48
2.8.2	Concepto de resolución . . . . .	48
2.8.3	Placket-Burman . . . . .	49

2.8.4	Diseños factoriales con punto al centro . . . . .	49
2.9	Función de Deseabilidad . . . . .	49
2.9.1	Deseabilidad individual: . . . . .	50
2.9.2	Deseabilidad compuesta: . . . . .	51
2.10	Cribado de los aditivos de formulación para producto Presión Blanco	52
2.11	Optimización de Fórmula Presión Blanco . . . . .	58
<b>CAPÍTULO III: Sistemas de Enfriamiento Industrial</b>		<b>63</b>
3.1	Formas de energía térmica . . . . .	64
3.2	Mecanismos de transferencia de calor . . . . .	65
3.2.1	Transferencia por conducción . . . . .	65
3.2.2	Transferencia por convección . . . . .	67
3.2.3	Transferencia por radiación . . . . .	73
3.2.4	Resistencia térmica . . . . .	73
3.3	Unidades de Enfriamiento ( <i>Chillers</i> ) . . . . .	75
3.3.1	Capacidad frigorífica ( $C_f$ ) . . . . .	76
3.3.2	Cantidad de agua helada requerida . . . . .	76
3.4	Eficiencia del sistema de refrigeración de Amanco-Wavin . . . . .	76
3.4.1	Capacidad frigorífica necesaria . . . . .	78
3.4.2	Capacidad frigorífica aprovechada . . . . .	80
3.4.3	Aprovechamiento de la capacidad frigorífica . . . . .	85
3.4.4	Circuito de enfriamiento en TS-108. . . . .	88
<b>CAPÍTULO IV: Cabezal de Extrusión</b>		<b>91</b>
4.1	Cabezal patas de araña . . . . .	91
4.1.1	Pin del cabezal . . . . .	92
4.1.2	Dado del cabezal . . . . .	93
4.1.3	Patas de araña . . . . .	93
4.2	Diseño de cabezal . . . . .	94
4.2.1	Productos . . . . .	94
4.2.2	Espesor de pared . . . . .	96
4.2.3	Propiedades del Material . . . . .	96

4.2.4	Equipo disponible . . . . .	97
4.3	Diseño ideal de cabezal para el producto Presión Blanco . . . . .	98
4.3.1	Balance de relación de reducción (DRB) . . . . .	99
4.3.2	Relación de reducción (DDR) . . . . .	100
4.3.3	<i>Die land</i> o planchado . . . . .	101
4.3.4	Sección de convergencia . . . . .	102
4.4	Dimensionamiento de cabezal actual para el producto Presión Blanco en Amanco/Wavin . . . . .	103
4.5	Modificación de cabezal actual . . . . .	104
4.6	Instalación Nuevo Cabezal . . . . .	105
4.7	Análisis costo-beneficio de modificar cabezal . . . . .	106
<b>CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES</b>		<b>109</b>
4.1	CONCLUSIONES . . . . .	109
4.2	RECOMENDACIONES . . . . .	110
<b>NOMENCLATURA</b>		<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>115</b>
<b>APÉNDICES</b>		<b>121</b>
A	Datos experimentales . . . . .	121
B	Datos Intermedios . . . . .	158
C	Muestra de cálculo . . . . .	173
<b>ANEXOS</b>		<b>185</b>
A	Procedimiento experimental para el desarrollo de fórmula en plastó- grafo Brabender . . . . .	185
B	Procedimiento de ensayo de momento de torsión y temperatura en plastógrafo Brabender . . . . .	186





## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.1</b>	Clasificación de la excelencia de los procesos de acuerdo con el valor de la OEE. . . . .	11
<b>Cuadro 1.2</b>	Características del Producto Presión Blanco. . . . .	25
<b>Cuadro 1.3</b>	Composición del producto Presión Blanco en la empresa. . .	25
<b>Cuadro 2.4</b>	Clasificación de la excelencia de los procesos de acuerdo con el valor de la OEE. . . . .	54
<b>Cuadro 2.5</b>	Niveles del diseño de experimentos. . . . .	54
<b>Cuadro 2.6</b>	Parámetros de la función deseabilidad. . . . .	59
<b>Cuadro 2.7</b>	Niveles del diseño de experimentos y aditivos fijos. . . . .	59
<b>Cuadro 3.8</b>	Cambio de energía interna de los productos de extrusión y capacidad frigorífica del sistema de enfriamiento requerido. . . . .	79
<b>Cuadro 3.9</b>	Aprovechamiento de la capacidad frigorífica de la planta. . .	85
<b>Cuadro 3.10</b>	Accesorios utilizados para el circuito de recirculación en el equipo TS-108. . . . .	89
<b>Cuadro 4.11</b>	Resumen de información requerida para diseño de cabezal. .	99
<b>Cuadro 4.12</b>	Dimensiones de dado y pin para procesamiento del producto Presión Blanco. . . . .	101
<b>Cuadro 4.13</b>	Dimensiones de dado y pin para procesamiento del producto Presión Blanco. . . . .	105
<b>Cuadro A.1</b>	Proporción mensual del costo de transformación. . . . .	121
<b>Cuadro A.2</b>	Consumo energético de las principales áreas de la empresa. .	121
<b>Cuadro A.3</b>	Producción promedio mensual de perfiles en extrusión. . . .	121
<b>Cuadro A.4</b>	Porcentaje de desperdicio en los principales productos de extrusión. . . . .	121
<b>Cuadro A.5</b>	Valores obtenidos de producción conforme para cada equipo.	122
<b>Cuadro A.6</b>	Valores obtenidos de producción no conforme para cada equipo. . . . .	123
<b>Cuadro A.7</b>	Valores obtenidos de tiempo trabajado para cada línea. . . .	124

<b>Cuadro A.8</b> Valores obtenidos de tiempo disponible para trabajar para cada línea. . . . .	125
<b>Cuadro A.9</b> Valores obtenidos de rendimiento estándar de producción para cada equipo. . . . .	126
<b>Cuadro A.10</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	127
<b>Cuadro A.11</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	128
<b>Cuadro A.12</b> Datos de corridas 1 a 5 obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	129
<b>Cuadro A.13</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	130
<b>Cuadro A.14</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	131
<b>Cuadro A.15</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	131
<b>Cuadro A.16</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	132
<b>Cuadro A.17</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	133
<b>Cuadro A.18</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	134
<b>Cuadro A.19</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	135
<b>Cuadro A.20</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	136
<b>Cuadro A.21</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	137
<b>Cuadro A.22</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	138

<b>Cuadro A.23</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	139
<b>Cuadro A.24</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	140
<b>Cuadro A.25</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	140
<b>Cuadro A.26</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	141
<b>Cuadro A.27</b> Datos de corridas 1 a 5 obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	142
<b>Cuadro A.28</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	143
<b>Cuadro A.29</b> Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	144
<b>Cuadro A.30</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	145
<b>Cuadro A.31</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	146
<b>Cuadro A.32</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	147
<b>Cuadro A.33</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	148
<b>Cuadro A.34</b> Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación). . . . .	149
<b>Cuadro A.35</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER. . . . .	149
<b>Cuadro A.36</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	150
<b>Cuadro A.37</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	151

<b>Cuadro A.38</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	152
<b>Cuadro A.39</b> Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación). . . . .	153
<b>Cuadro A.40</b> Parámetros reológicos del diseño de cribado. . . . .	154
<b>Cuadro A.41</b> Parámetros reológicos del diseño de superficie. . . . .	154
<b>Cuadro A.42</b> Parámetros reológicos del diseño de superficie. . . . .	155
<b>Cuadro A.43</b> Parámetros de trabajo para las sustancias a utilizar. . . . .	155
<b>Cuadro A.44</b> Producción promedio mensual de tubería en extrusión. . . . .	156
<b>Cuadro A.45</b> Rendimiento de los productos de extrusión. . . . .	157
<b>Cuadro A.46</b> Masas de los productos de extrusión. . . . .	158
<b>Cuadro B.1</b> OEE por producto producido en la línea TS-108. . . . .	158
<b>Cuadro B.2</b> Valores obtenidos de Razón de rendimiento para cada equipo. . . . .	159
<b>Cuadro B.3</b> Valores obtenidos de Razón de disponibilidad para cada equipo. . . . .	160
<b>Cuadro B.4</b> Valores obtenidos de Razón de calidad para cada equipo. . . . .	161
<b>Cuadro B.5</b> Valores obtenidos de la OEE para cada equipo. . . . .	162
<b>Cuadro B.6</b> Deseabilidad calculada para los parámetros reológicos en el diseño de cribado. . . . .	163
<b>Cuadro B.7</b> Deseabilidad calculada para los parámetros reológicos en el diseño de superficie. . . . .	164
<b>Cuadro B.8</b> Termodinámica de enfriamiento para perfiles ( $L_c = 2$ m). . . . .	164
<b>Cuadro B.9</b> Termodinámica de enfriamiento para perfiles ( $L_c = 6$ m). . . . .	165
<b>Cuadro B.10</b> Transferencia de energía para perfiles ( $L_c = 2$ m). . . . .	165
<b>Cuadro B.11</b> Transferencia de energía para perfiles ( $L_c = 6$ m). . . . .	165
<b>Cuadro B.12</b> Cambio de energía interna para el enfriamiento de tuberías. . . . .	166
<b>Cuadro B.13</b> Resistencia térmica de transferencia por convección para tuberías ( $L_c = 2$ m). . . . .	167
<b>Cuadro B.14</b> Resistencia térmica de transferencia por convección para tuberías ( $L_c = 6$ m). . . . .	168

<b>Cuadro B.15</b> Resistencia térmica de transferencia por conducción para tuberías ( $L_c = 2$ m). . . . .	168
<b>Cuadro B.16</b> Resistencia térmica de transferencia por conducción para tuberías ( $L_c = 6$ m). . . . .	169
<b>Cuadro B.17</b> Resistencia equivalente de transferencia para tuberías ( $L_c = 2$ m). . . . .	169
<b>Cuadro B.18</b> Resistencia equivalente de transferencia para tuberías ( $L_c = 6$ m). . . . .	170
<b>Cuadro B.19</b> Tasas de transferencia de energía para el enfriamiento de tubería ( $L_c = 2$ m). . . . .	170
<b>Cuadro B.20</b> Tasas de transferencia de energía para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 6$ m). . . . .	171
<b>Cuadro B.21</b> Tiempo disponible para transferencia de energía en extrusión.	171
<b>Cuadro B.22</b> Cambio de energía interna con el tiempo disponible para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 2$ m). . . . .	172
<b>Cuadro B.23</b> Cambio de energía interna con el tiempo disponible para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 6$ m). . . . .	172

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b>	Factores críticos de la competitividad (Gutiérrez y De la Vara, 2013). . . . .	4
<b>Figura 1.2</b>	Relaciones de eficiencia de la gestión (Jacobs y Chase, 2019). . . . .	7
<b>Figura 1.3</b>	Ejemplo de Diagrama de Ishikawa por método de las 6M. . . . .	13
<b>Figura 1.4</b>	Representación del diagrama de Pareto (Deler, 2018) . . . . .	14
<b>Figura 1.5</b>	Planta de manufactura Amanco/Wavin, Heredia, Costa Rica. . . . .	15
<b>Figura 1.6</b>	Diagrama de proceso de extrusión de tuberías. . . . .	16
<b>Figura 1.7</b>	OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020. . . . .	18
<b>Figura 1.8</b>	OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 por equipo del departamento de extrusión. . . . .	18
<b>Figura 1.9</b>	OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 del equipo TS-108. . . . .	19
<b>Figura 1.10</b>	OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 de los productos producidos en el equipo TS-108. . . . .	20
<b>Figura 1.11</b>	Contribución al costo de transformación en la planta de pro- ducción enero-setiembre 2020. . . . .	21
<b>Figura 1.12</b>	Porcentaje de desperdicio generado por los principales pro- ductos del departamento de extrusión. . . . .	22
<b>Figura 1.13</b>	Factores del costo de transformación y áreas de consumo energético de la empresa para el mes de setiembre. . . . .	22
<b>Figura 1.14</b>	Mala apariencia interna en los productos no conformes del producto presión blanco. . . . .	23
<b>Figura 1.15</b>	Tina de enfriamiento de perfiles de la empresa. . . . .	24
<b>Figura 1.16</b>	Desperdicio generado en ajustes de producción del producto Presión Blanco. . . . .	25
<b>Figura 1.17</b>	Diagrama de Ishikawa para la clasificación de las ideas obte- nidas en reuniones para mejora del Producto Presión Blanco. . . . .	26
<b>Figura 1.18</b>	Diagrama de Ishikawa para la clasificación de las ideas obte- nidas en reuniones para mejora de sistema de enfriamiento. . . . .	27

<b>Figura 2.19</b> Diagrama de proceso de extrusión de tuberías. . . . .	30
<b>Figura 2.20</b> Estructura molecular del PVC, esferas blancas representan átomos de hidrógeno, grises carbono y verdes cloro (Beltrán, 2011). . . . .	32
<b>Figura 2.21</b> Representación de la acción de lubricantes internos y externos en los polímeros (Beltrán, 2011) . . . . .	33
<b>Figura 2.22</b> Acción de modificador de impacto en los polímeros (Beltrán, 2011) . . . . .	34
<b>Figura 2.23</b> Tipos de fluidos no Newtonianos (Quoc-Hung y Ngoc-Diep, 2012). . . . .	37
<b>Figura 2.24</b> Plastógrafo Brabender utilizado para las corridas de reometría. . . . .	38
<b>Figura 2.25</b> Mezcladores tipo 1 y 2 para el ensayo de reología y desarrollo de muestras, respectivamente. . . . .	39
<b>Figura 2.26</b> Respuesta de reología obtenido de un plastógrafo. A=Pico de carga, B= Mínimo momento de torsión, G=Punto de inflexión, X= Máximo momento de torsión, t= tiempo de fusión, E= Momento de torsión final (Brabender GmbH, 2019). . . . .	40
<b>Figura 2.27</b> Transferencia de datos de la respuesta de reología al tornillo de extrusión (Brabender GmbH, 2019) . . . . .	41
<b>Figura 2.28</b> Representación de región experimental y de operabilidad de un experimento (De la Vara y Domínguez, 2017). . . . .	43
<b>Figura 2.29</b> El mejor de los tratamientos en una región experimental y el punto óptimo en una región de operabilidad (De la Vara y Domínguez, 2017). . . . .	44
<b>Figura 2.30</b> a) Gráfico de Daniels, b) Diagrama de Pareto para identificar los efectos significativos (De la Vara y Domínguez, 2017). . . . .	47
<b>Figura 2.31</b> Representación de efectos de factores en una variable respuesta a) efecto de interacción, b) efecto principal. . . . .	47
<b>Figura 2.32</b> Función de deseabilidad y ponderaciones de sensibilidad de las respuestas. . . . .	52
<b>Figura 2.33</b> Preparación de muestras para pruebas reológicas. . . . .	55



<b>Figura 2.34</b> Curvas de momento de torsión obtenidas del reómetro Brabender. . . . .	56
<b>Figura 2.35</b> Curvas de temperatura obtenidas del reómetro Brabender. . . . .	56
<b>Figura 2.36</b> Diagrama de Pareto para la identificación de efectos significativos. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo. . . . .	57
<b>Figura 2.37</b> Efecto de los aditivos de fórmula en la deseabilidad compuesta de las propiedades reológicas. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo. . . . .	57
<b>Figura 2.38</b> Validación de supuestos del diseño de experimentos. . . . .	58
<b>Figura 2.39</b> Análisis de curvatura para la respuesta reológica de las formulaciones. . . . .	60
<b>Figura 2.40</b> Gráficas de contorno para la respuesta de deseabilidad de los parámetros reológicos. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo. . . . .	60
<b>Figura 2.41</b> Validación de supuestos del diseño de experimentos. . . . .	61
<b>Figura 3.42</b> Transferencia de energía a través de una capa de fluido de espesor $L$ y diferencia de temperatura (Cengel y Ghajar, 2011). . . . .	68
<b>Figura 3.43</b> Transferencia de energía en régimen a) laminar y b) turbulento (Cengel y Cimbala, 2018). . . . .	69
<b>Figura 3.44</b> Desarrollo de capa límite (Cengel y Cimbala, 2018). . . . .	70
<b>Figura 3.45</b> Variación del coeficiente de Nusselt respecto al punto de contacto de una circunferencia de un cilindro circular (Cengel y Cimbala, 2018). . . . .	72
<b>Figura 3.46</b> Ciclo de refrigeración en un Chiller (Stanford, 2012) . . . . .	75
<b>Figura 3.47</b> Esquema de análisis de eficiencia del sistema de refrigeración de la planta . . . . .	77
<b>Figura 3.48</b> Circuito de refrigeración de la planta de producción de Amanco/Wavin . . . . .	78

<b>Figura 3.49</b> Comparación de transferencia de energía por conducción y convección por los productos de extrusión. . . . .	83
<b>Figura 3.50</b> Cambio en la resistencia térmica con el cambio en el espesor del producto. . . . .	84
<b>Figura 3.51</b> Condensación en las paredes de las tinas de enfriamiento. . .	86
<b>Figura 3.52</b> Respuesta de la resistencia térmica equivalente ( $R_{eq}/\Delta$ ), aprovechamiento de capacidad frigorífica ( $C_f/\square$ ) y número de Reynolds ( $Re/\circ$ ) respecto al cambio la longitud de tina de enfriamiento ( $L_c$ ), en temperatura fría ( $T_C$ ) y velocidad de agua helada ( $v$ ). . . . .	87
<b>Figura 3.53</b> Aprovechamiento de la capacidad frigorífica respecto a la longitud característica de transferencia de energía y a diferentes temperaturas frías de agua helada. . . . .	87
<b>Figura 3.54</b> Circuito de recirculación propuesto para agua helada. . . . .	89
<b>Figura 4.55</b> Cabezal tipo patas de araña 2D y 3D (Kainth, 2018). . . . .	92
<b>Figura 4.56</b> Cabezal tipo patas de araña 3D seccionado (Kainth, 2018). . .	92
<b>Figura 4.57</b> Flujo alrededor de las patas de araña de cabezal (Kainth, 2018). .	94
<b>Figura 4.58</b> Efectos de los esfuerzos cortantes en la apariencia de plástico fundido (Agassant <i>et al.</i> , 2006). . . . .	95
<b>Figura 4.59</b> Relaciones de dimensiones de tubería, pin y dado (Kainth, 2018) . . . . .	100
<b>Figura 4.60</b> Sección dado y pin del cabezal (Kainth, 2018) . . . . .	102
<b>Figura 4.61</b> Sección de convergencia de dado-pin (Kainth, 2018). . . . .	103
<b>Figura 4.62</b> Dimensiones de cabezal actual utilizado para producto Presión Blanco. . . . .	104
<b>Figura 4.63</b> Pin modificado del cabezal para mejoras. . . . .	106
<b>Figura 4.64</b> Mejora en la apariencia interna del producto Presión Blanco. . . . .	106
<b>Figura 7.65</b> Paso 1 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . .	175
<b>Figura 7.66</b> Paso 2 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . .	176
<b>Figura 7.67</b> Paso 3 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . .	176
<b>Figura 7.68</b> Paso 4 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . .	177
<b>Figura 7.69</b> Paso 5 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . .	177

**Figura 7.70** Paso 6 para el desarrollo del diseño de experimentos. . . . . 178



# INTRODUCCIÓN

La industria de manufactura procura concentrar gran parte de sus recursos y esfuerzos en la mejora continua de los procesos con la intención de que estas mejoras se reflejen como un aumento de los rendimientos financieros que le permiten mantener y crecer sus operaciones. Estas mejoras están dirigidas en evitar y eliminar los despilfarros y las acciones que no aportan valor en el producto final para el cliente, garantizando calidad, competitividad y rentabilidad tal como lo expone un modelo de gestión de Lean Manufacturing.

En la optimización de la producción de tubosistemas se identifican diferentes áreas de mejora: formulación de producto, aprovechamiento de recursos de transformación como materia prima, mano de obra, energía eléctrica, fluido de enfriamiento y la inversión en la mejora de equipos en respuesta a la cantidad de producto defectuoso. En este proyecto se desarrollan cuatro iniciativas en función de la mejora del rendimiento de una línea de producción de tubosistemas de PVC en la empresa Amanco-Wavin, Heredia. Estas consisten en un reconocimiento de flujo de proceso y OEE, optimización de formulación, aprovechamiento de capacidad frigorífica y configuración de extrusión.

En la empresa el aumento de producto defectuoso ha generado desperdicios durante el proceso traduciéndose en costos directos e indirectos de fabricación. Se analiza el desperdicio hasta identificar que la línea de producción de tubería TS-108 reporta un valor promedio mensual para el año 2020 de 9.31 %, mientras que para el año anterior se encontraba en un 5.35 %, mostrando una clara oportunidad de mejora que se puede reflejar positivamente en las utilidades de la empresa.

La primera iniciativa desarrollada en la empresa corresponde al reconocimiento del flujo de proceso de la empresa y el estado real del aprovechamiento integral de sus equipos productivos mediante el análisis de la Efectividad Global de los Equipos (OEE), como indicador de eficiencia y eficacia que reconocen que la línea TS-108 presenta oportunidades de mejora. Este primer reconocimiento es importante debido a que la optimización de los procesos y equipos se facilita al evaluar clara y directamente la relación de los objetivos planteados por la organización con la realidad de

los procesos, logrando plantear los planes de mejora que alinean estrechamente esta relación con la estrategia de la empresa para conseguir el máximo aprovechamiento del potencial de su cadena de valor.

La segunda iniciativa corresponde a un análisis mediante un diseño de experimentos de superficie multirespuesta de la formulación utilizada para producto presión blanco para garantizar las propiedades físicas y químicas finales del producto. Este análisis permite identificar y modificar los aditivos críticos de la fórmula para proponer una nueva, capaz de mejorar el rendimiento en extrusión a un costo adecuado. A la vez permite comprender y detallar el efecto de cada uno de los componentes en la fórmula por su influencia en ensayos de reología que describen el comportamiento de los polímeros.

La tercera iniciativa se desarrolla al identificar un desperdicio de la capacidad frigorífica en el sistema de enfriamiento del proceso de extrusión, evidenciado con que el agua de enfriamiento en las tinas de producto ingresa a una temperatura de 14 °C y retorna a 17 °C produciendo una condensación por fuera de las tinas que demuestra un sobre enfriamiento no requerido en el proceso y además, se obtiene una temperatura del producto extruido de 27 °C, mientras que una temperatura adecuada de salida, según la experiencia de los operadores, es de (35-45) °C con la cual el producto mantiene sus propiedades específicas de calidad.

Por último, la cuarta iniciativa consiste en la mejora de la configuración de la maquinaria en la línea TS-108 de extrusión mediante el análisis de su cabezal formador para diseñar y construir un nuevo cabezal que garantice las propiedades físicas de tubería y permita un mayor rendimiento de extrusión.

Esta práctica dirigida aprovecha el conocimiento adquirido por el Ingeniero Químico en balances de masa y energía, fenómenos fisicoquímicos de los polímeros y las habilidades para la identificación de oportunidades de mejora a partir de problemas y no conformidades para proponer estrategias que mejoren los rendimientos de producción y principalmente la rentabilidad de las empresas. Esto contribuye a la formación del Ingeniero Químico para su desempeño satisfactorio y destacado en su actividad laboral.

# CAPÍTULO 1: Competitividad y Productividad

La toma de decisiones eficientes y eficaces en los sistemas de cadena de valor a cargo de directivos y gerentes se consigue mejor al aprovechar la información obtenida directamente de la evaluación del proceso productivo y de transformación, por lo que obtener la información relevante de manera oportuna permite evaluar ágilmente el comportamiento de la producción para apoyar la mejora continua de los procesos y evaluar la competitividad y productividad de las empresas por medio de medidores de desempeño que representan la situación real de la empresa. Este capítulo presenta los indicadores de mayor utilidad para identificar las oportunidades de mejora más significativas con las que una empresa puede conseguir un incremento en su medición de desempeño de gestión y operación.

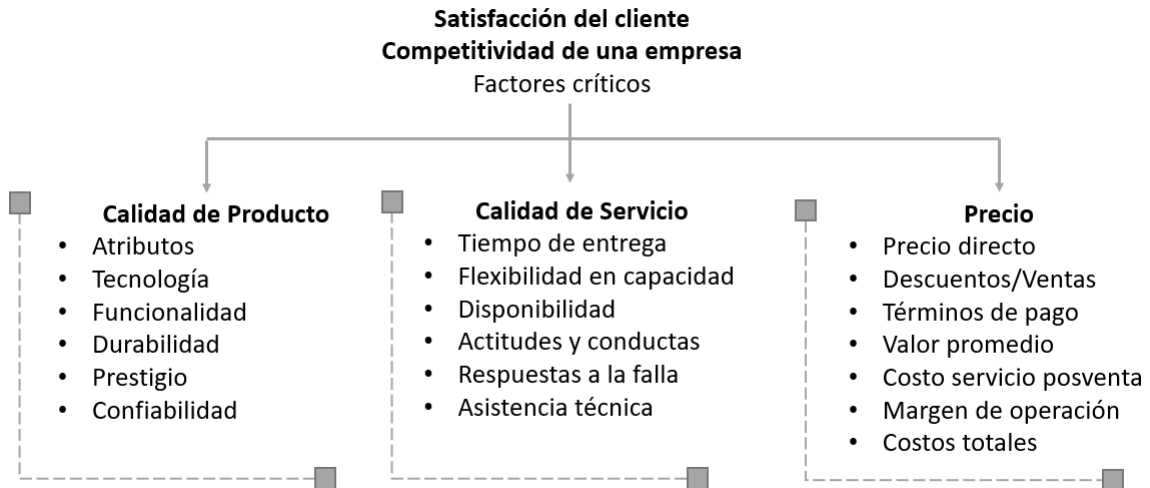
## 1.1. Competitividad

La competitividad de las empresas se refiere a su capacidad para producir un producto o servicio mejor o igual que su competencia, la cual se procura mantener para sobrevivir en el mercado altamente globalizado en el que se vive actualmente, ya que cada vez más, las fronteras comerciales se van desvaneciendo y los clientes pueden adquirir tanto productos como servicios de diferentes locaciones del mundo con menos limitaciones. Esto genera que las empresas se mantengan en una constante competencia por conseguir nuevos clientes y mantener a aquellos con los que ya cuentan mediante la elaboración de estrategias de mejor integración e interrelación de sus actividades en conjunto a los clientes (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

La competitividad se analiza de acuerdo con cuatro elementos significativos: *Calidad de Producto*, *Calidad de Servicio*, *Prestigio de Marca* y *Precio*. Por lo tanto, se consigue una mayor competitividad cuando se ofrece al mercado un producto o servicio de mejor calidad, con buenas relaciones entre partes interesadas y asegurando menores precios, de acuerdo con la relación del valor para el cliente que se muestra en la Ecuación 1 (Gutiérrez y De la Vara, 2013). Los factores involucrados en el valor para el cliente se pueden observar en la Figura 1.1; la buena calidad de los productos y de los servicios promueven el alto prestigio de la empresa, que al

combinarse con los precios se asegura un alto valor y preferencia por ellos.

$$\text{Valor para el cliente} = \frac{(\text{Calidad Producto}) \times (\text{Calidad Servicio}) \times (\text{Marca})}{\text{Precio}} \quad (1)$$



**Figura 1.1.** Factores críticos de la competitividad (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

## 1.2. Productividad

La productividad, por su lado, es una razón de la cantidad de resultados obtenidos en un periodo entre los recursos requeridos para obtenerlos, por esto se considera un indicador de medición del desempeño operacional que se verá más adelante (Anaya, 2007).

## 1.3. Medición del desempeño

El método de medición del desempeño de las empresas ha ido evolucionado con el tiempo conforme han surgido nuevas necesidades para comprender los procesos y para emplear un seguimiento a los requerimientos de producción y servicio que permita generar acciones oportunas para su mejora; esto ha demostrado que es fundamental cuantificar los signos vitales de una organización para dirigir el pensamiento de los



colaboradores hacia sus objetivos, siendo esencial los métodos de control estadístico y mejora continua para conseguir transformar las ideas en acciones. Por esto se clasifican indicadores como mediciones de desempeño de gestión y operación (De la Vara y Domínguez, 2017).

## **1.4. Medición del desempeño de gestión**

Las empresas de manufactura suelen medir la eficiencia de su cadena de suministro mediante diferentes indicadores financieros que reflejan el impacto de las operaciones y procesos en la rentabilidad de la empresa. Entre estos indicadores se encuentran: el retorno sobre las inversiones (ROI), la rotación de inventarios, la rotación de cuentas por cobrar, costo de inventario, costo de transformación y la rotación de activos (Jacobs y Chase, 2019).

### **1.4.1. Rotación de cuentas por cobrar**

La rotación de cuentas por cobrar consiste en medir la eficiencia de recolectar las ventas a crédito de una empresa. Esta razón demuestra, desde la perspectiva operativa, la velocidad con la que el departamento de operaciones entrega las órdenes de producción, cumple con las especificaciones y las inspecciones por parte del cliente que afectan el inicio del cobro de las ventas. Su cálculo consiste en la razón de las ventas entre el valor de las cuentas por cobrar en un periodo (Jacobs y Chase, 2019).

### **1.4.2. Rotación de inventario**

Esta razón muestra la eficiencia por medio del número de veces en que se vende un inventario y se reemplaza con otro en un periodo. Se calcula como la razón del costo del inventario vendido entre el costo promedio del inventario. La rotación de inventario demuestra el nivel de liquidez de una empresa, un valor pequeño es señal de ineficiencia, ya que significa que existe inventario sin vender que inmoviliza capital que puede ser utilizado para otros fines y puede deberse a pocas ventas o exceso de inventario por producción en exceso. Un valor alto, puede significar tanto ventas eficaces como ventas ineficaces, ya que un nivel bajo de inventario puede significar

poca cantidad de producción equivalente a excesivos alistamientos de equipos o seguidas compras de materia prima que incorporan costos por pedido (Ross *et al.*, 2012).

#### **1.4.3. Rotación de activos**

La rotación de activos corresponde a la cantidad de ventas obtenidas por cada unidad monetaria del valor de sus activos e indica la eficiencia de la empresa para generar ingresos con el uso de sus recursos. Entre los activos se incluyen las plantas, los almacenes, equipo, el inventario y otros bienes de propiedad, cuanto mayor sea la razón, mejor calificación de la empresa (Ross *et al.*, 2012).

#### **1.4.4. Costo de inventario**

Según el Comité de Normas Internacionales de Contabilidad (IASC) (2003) en la *NIC 2 Inventarios*, el costo de inventario comprende los costos derivados a su adquisición, transformación y otros costos necesarios para otorgar al inventario su condición y ubicación.

#### **1.4.5. Costo de transformación**

El costo de transformación incorpora aquellos costos directos relacionados con las unidades de producción como materia prima, también los costos indirectos variables y fijos incurridos para transformar estas materias primas en productos terminados. Los costos indirectos fijos se identifican como la depreciación de los equipos, mantenimiento de equipos y edificios, gestión y la administración de la planta, mientras que entre los costos indirectos variables se encuentran los materiales de producción y la mano de obra (IASC, 2003).

#### **1.4.6. Margen de beneficio**

El margen de beneficio representa la proporción de las ventas que corresponde a las ganancias de la empresa, se determina mediante la razón de las ventas entre la utilidad neta del periodo (Jacobs y Chase, 2019).

### 1.4.7. Retorno sobre la inversión (ROI)

Ross *et al.* (2012) define el retorno sobre la inversión como la comparación del beneficio o utilidad generada en relación con la inversión realizada. Su valor se determina mediante el producto del margen de beneficio de las ventas y la rotación de los activos, o bien, como la razón de la utilidad neta del periodo entre los activos totales de la empresa.

En la Figura 1.2 se observa un esquema de varios indicadores de medición del desempeño de gestión que se engloban en el ROI, como indicador general de la situación financiera de la empresa que a la vez demuestra eficiencia gerencial.



**Figura 1.2.** Relaciones de eficiencia de la gestión (Jacobs y Chase, 2019).

## 1.5. Medición del desempeño operativo

Los indicadores de desempeño operacional representan las mediciones críticas que las organizaciones dan seguimiento para conseguir los objetivos planteados para el corto y largo plazo que le permiten garantizar su rentabilidad. Entre los indicadores de uso frecuente a nivel industrial para evaluar el desempeño operacional de los procesos es la Efectividad Global de los Equipos (OEE por sus siglas en inglés de Overall Equipment Effectiveness) y la productividad (Parmenter, 2010). La importancia de estos indicadores radica en que logran contemplar la eficiencia y eficacia de la totalidad de la empresa evitando que se mejoren eficiencias individuales en

etapas que no mejoran la cantidad de productos que se producen globalmente en la empresa, lo que resulta en una inversión de recursos que no se reflejan en el retorno sobre la inversión total porque no aumenta la eficiencia Global, como sería mejorar la productividad de un equipo no cuello de botella.

### **1.5.1. Productividad**

La productividad cuantifica los resultados de producción entre los recursos necesarios para dicha producción. Los recursos pueden ser: cantidad de trabajadores, horas trabajadas, energía, materia prima, entre otros recursos y los resultados de un proceso pueden ser unidades producidas, unidades vendidas, clientes atendidos, entre otros. Mejorar la productividad consiste en incrementar la obtención de resultados optimizando los recursos utilizados, para este fin, la productividad se puede calcular total, dividiendo todos los resultados entre todos los recursos consumidos y también se puede calcular parcial, lo que significa que se puede obtener la razón de los resultados obtenidos entre cada uno de los recursos utilizados por aparte.

La productividad total permite observar el panorama general de la organización y la productividad parcial, identificar oportunidades de mejora en un proceso. Se obtienen dos términos que componen la productividad: la eficiencia y la eficacia, el primero de éstos consisten en alcanzar los objetivos con el menor uso de recursos y el otro en la capacidad para lograr los objetivos planteados y es necesario evaluar ambos componentes al mismo tiempo ya que se puede ser eficaz sin ser eficiente y viceversa, siendo de mucha importancia conseguir ambas para una operación satisfactoria de los procesos (De la Vara y Domínguez, 2017).

### **1.5.2. Efectividad global de equipos (OEE)**

La OEE corresponde a un indicador cuantitativo para el control y monitoreo tanto de la productividad como de las mejoras y rendimiento de los procesos, ya que es utilizado para dar seguimiento a los procesos e identificar las áreas que presentan mayor posibilidad de mejora evaluando la disponibilidad de los equipos, su rendimiento y calidad del proceso. De esta manera, incrementando la efectividad de los equipos individualmente se consigue una mejora de efectividad en el sistema de

producción global al resaltar pérdidas y cuellos de botella en los procesos, permitiendo enlazar las decisiones financieras de nuevas inversiones en personal, materiales, equipos, servicios, entre otros que pueden mejorar el rendimiento de las operaciones.

El OEE procura identificar pérdidas en producción y en otras actividades indirectas que contribuyen en una alta proporción de los costos de transformación en una empresa que se pueden reflejar fácilmente en los tres componentes de la OEE: **disponibilidad**, es la proporción del tiempo de equipo utilizado para producir, contemplados los tiempos de mantenimiento y el tiempo disponible; **rendimiento**, proporción de la capacidad real de producción del equipos respecto a su capacidad teórica; **calidad**, es la proporción de producto conforme a especificaciones técnicas respecto a la producción total (Pintelon y Nganga, 2010).

La OEE se calcula de la siguiente manera:

$$OEE(\%) = RD \cdot RR \cdot RC \quad (2)$$

Donde,

$RD$  : Razón de Disponibilidad [adim]

$RR$  : Razón de Rendimiento [adim]

$RC$  : Razón de Calidad [adim]

**Razón de disponibilidad (RD):** corresponde a la relación del tiempo real de producción y el tiempo de producción disponible. Esta razón hace referencia a la pregunta "¿cuál es el porcentaje de tiempo que un equipo costosa en realidad está en operación?", es decir, ¿se está obteniendo el máximo aprovechamiento de los equipos para conseguir un retorno de la inversión satisfactorio? ya que los flujos de efectivo contemplan las inversiones realizadas y los ingresos que generen dichas inversiones para evaluar si un proyecto fue o no rentable (Pérez y García, 2014).

$$RD = \frac{t_{tr}}{t_d} \quad (3)$$

Donde,

$t_{tr}$  : Tiempo trabajado [h]

$t_d$  : Tiempo disponible para trabajar [h]

**Razón de rendimiento (RR):** esta razón corresponde a la relación de la producción conforme y no conforme respecto al producto del rendimiento estándar y el tiempo trabajado. (Pérez y García, 2014)

$$RR = \frac{P_c + P_{nc}}{R_{est} \cdot t_{tr}} \quad (4)$$

Donde,

$P_c$  : Producción conforme [kg]

$P_{nc}$  : Producción no conforme [kg]

$R_{est}$  : Rendimiento estándar [kg/h]

$t_{tr}$  : Tiempo trabajado [h]

**Razón de calidad (RC):** la razón de calidad relaciona la producción conforme respecto a la producción conforme y no conforme obtenida (Pérez y García, 2014).

$$RC = \frac{P_c}{P_c + P_{nc}} \quad (5)$$

$P_c$  : Producción conforme [kg]

$P_{nc}$  : Producción no conforme [kg]

El valor obtenido de la OEE permite clasificar las líneas de producción de la planta y la planta en totalidad según su nivel de excelencia, con el objetivo de mejorar constantemente hasta alcanzar niveles mundiales de competencia que permitan retornos sobre las inversiones altos, mejorando los rendimientos de los accionistas de las empresas (Cruelles, 2009). El Cuadro 1.1 muestra los rangos de la OEE por el que las empresas a nivel mundial clasifican sus procesos productivos.

A partir de indicadores como la OEE se identifican las áreas de mejora del desempeño de una organización que acompañado del uso de herramientas de gestión se logran implementar de la forma más eficiente con resultados financieros positivos para las organizaciones.

**Cuadro 1.1.** Clasificación de la excelencia de los procesos de acuerdo con el valor de la OEE.

% OEE	Valoración	Consecuencia
0-64	Deficiente (Inaceptable)	Se producen importantes pérdidas económicas. Muy baja competitividad
65-74	Regular	Aceptable para procesos en mejora. Baja competitividad y pérdidas económicas.
75 – 84	Aceptable	Continuar con la mejora para superar el 85%. Buena competitividad.
85 – 94	Buena	Se ingresa en el World Class. Buena competitividad.
95 - 100	Excelente	Valores World Class. Excelente competitividad.

## 1.6. Herramientas de gestión de la cadena de suministro

Para conseguir la mejora continua de los procesos evaluando la productividad y la competitividad de una empresa de cualquier tamaño y entorno competitivo se requieren esfuerzos en cuanto a la mejora de la calidad de los productos y procesos; estos esfuerzos son más eficaces cuando se establecen diferentes técnicas que facilitan

desarrollar y poner en práctica el sistema de gestión de calidad que asegura la calidad en los productos y procesos (Santiago, 2018).

Entre las herramientas útiles para la implementación de mejoras en la cadena de suministro se encuentran las siguientes:

**Diagrama de flujo de proceso:** el diagrama de proceso consiste en un recurso gráfico para representar un proceso desde una perspectiva macro hasta micro en el que se especifican las actividades con un mayor grado de detalle de las actividades que realmente se realizan en un proceso como aquellas principales, secundarias, inspecciones, esperas, transportes, reprocesos, entre otras. En este diagrama se puede presentar información de las etapas de proceso como: principales variables de entrada y salida clasificados como crítico, controlable y de ruido, pasos que aportan y no aportan valor para el producto final, objetivos de producción y también indicadores de desempeño (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

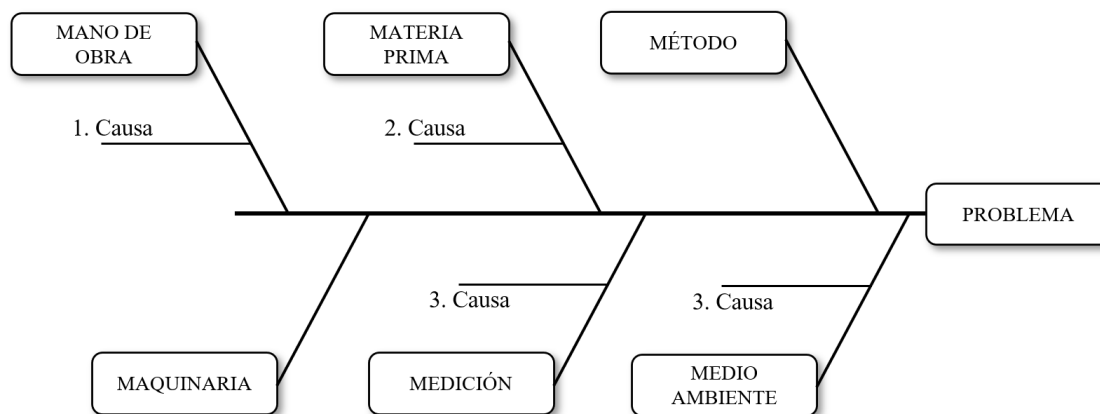
**Lluvia de ideas:** la lluvia de ideas es una herramienta muy utilizada en los equipos de mejora para el análisis grupal de diversas situaciones, esta consiste en propiciar el pensamiento creativo de los miembros de un equipo de trabajo para aportar ideas que identifiquen un problema o proponer una solución. La característica más importante es que cada integrante tenga la posibilidad de aportar su idea sin preocupación de ser juzgado por su idea, apreciando que cada idea es importante y puede abrir el camino hacia otras ideas (De la Vara y Domínguez, 2017).

**Diagrama Ishikawa:** este diagrama también es conocido como Diagrama Causa-Efecto y permite una vez identificado, definido y delimitado un problema, investigar las causas que lo pueden ocasionar para analizarlas y determinar aquellas de mayor impacto en el problema por medio de un gráfico de relación entre el problema y las posibles causas agrupadas en seis ramas principales que aportan más o menos variabilidad al producto final, conocidas como las 6M: métodos de trabajo, mano de obra, materia prima, maquinaria, medición y medio ambiente. Esta herramienta permite un mayor conocimiento del problema o situación motivando la participación y trabajo en equipo de los involucrados, al mismo tiempo permite comprender y



reconocer mejor las etapas de un proceso de modo que genera una guía de resolución de problemas futuros (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

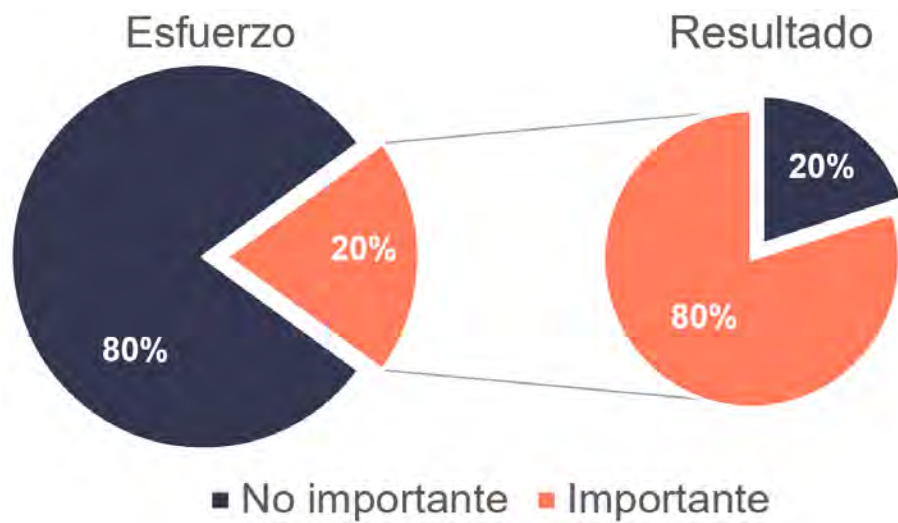
La Figura 1.3 muestra un ejemplo de un diagrama Ishikawa y sus componentes como guía para la preparación de un diagrama de este tipo.



**Figura 1.3.** Ejemplo de Diagrama de Ishikawa por método de las 6M.

**Diagrama Pareto:** este diagrama corresponde a la observación de que existe un 20 % de causas de un problema que ocasionan el 80 % de los efectos en éste, tal como se representa en la Figura 1.4. Por medio de este diagrama se consigue identificar con rapidez la parte esencial de una actividad permitiendo dedicar los esfuerzos y recursos en esta parte que asegura tener valiosos resultados. Esta herramienta tiene mucha aplicabilidad como herramienta de control y gestión de la calidad en las cadenas de suministro. Por ejemplo, el principio de Pareto se puede interpretar como Deler (2018):

- Gestión personal: el 20 % del personal genera el 80 % de los productos de la empresa.
- Gestión de riesgos: el 20 % de los riesgos conlleva al 80 % de las consecuencias.
- Gestión logística: el 20 % de los productos genera el 80 % de los costos de almacenamiento.



**Figura 1.4.** Representación del diagrama de Pareto (Deler, 2018)

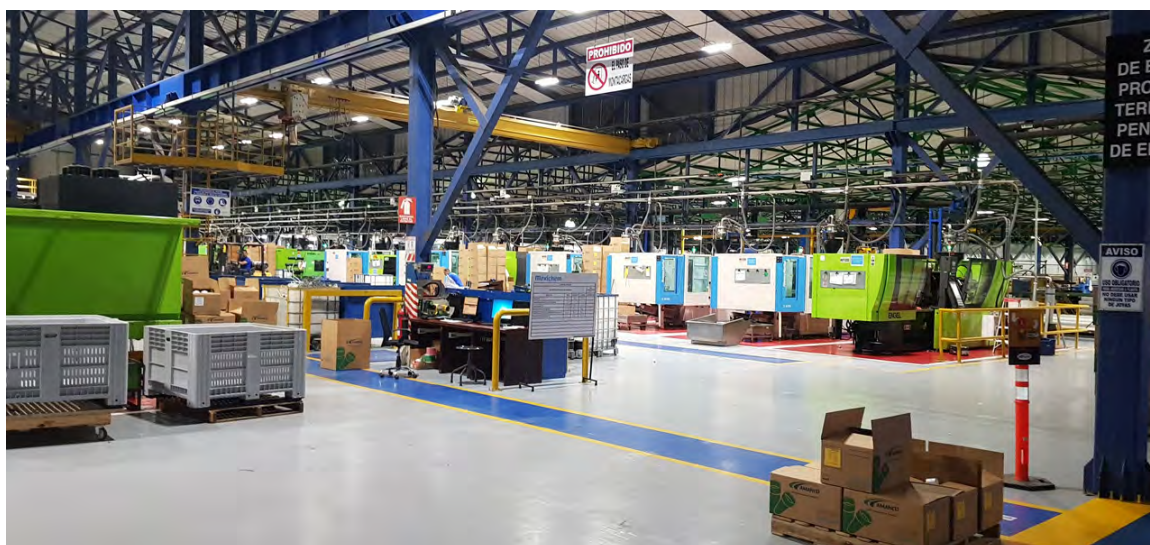
## 1.7. Reconocimiento del estado actual del desempeño de la empresa Amanco Wavin 2020

Se realizó un análisis de los indicadores operacionales y de gestión en el departamento de extrusión de la empresa Amanco-Wavin para identificar áreas de mejora en la empresa en las que se puede disminuir el desperdicio y aumentar la relación de retorno de inversión mejorando los indicadores de medición del desempeño de la empresa.

Amanco-Wavin es una empresa dedicada a la fabricación de tubosistemas de PVC para aplicaciones en la conducción de fluidos. Actualmente cuenta con operaciones en 30 empresas en 13 países de América Latina con más de 6.000 colaboradores. Entre sus productos se encuentran: Conduflex, Novaloc, Novafort, Drenaflex, Canoas, Conduit, Tubería Pluvial, Drenaje, Residuales, Potable, entre otros. En la planta de producción de Belén, Heredia cuenta con un departamento de extrusión, inyección, rotomoldeo y pegamentos (Amanco-Wavin, 2020).

### 1.7.1. Medición del desempeño de Amanco-Wavin

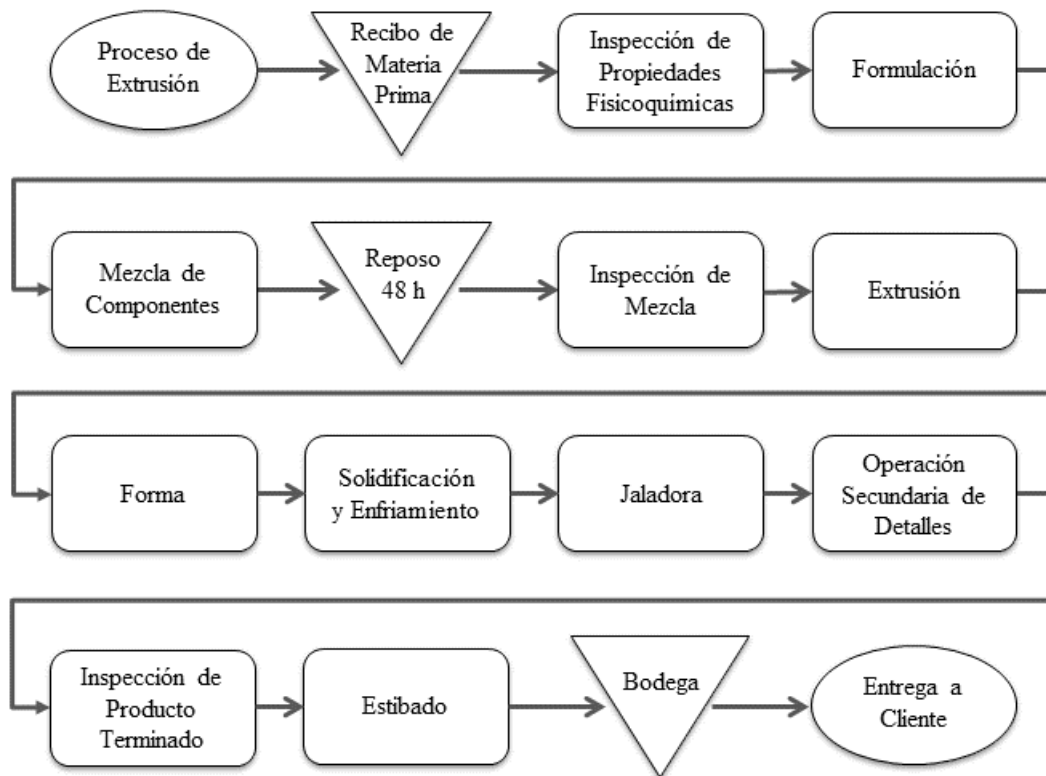
Se recopiló información para la determinación de los indicadores de medición del desempeño de gestión y de operación de la empresa y así identificar las áreas de mejora a las cuales se deben tomar especial atención debido al consumo de insumos



**Figura 1.5.** Planta de manufactura Amanco/Wavin, Heredia, Costa Rica.

de producción y así enfocar recursos y esfuerzos con la intención de obtener mejores beneficios. Para esto se comenzó realizando un diagrama de proceso por bloques para el proceso de extrusión de la empresa para conseguir un reconocimiento de cada una de las etapas del proceso, sus actividades, las variables involucradas y así determinar la etapa que probablemente requiera atención como oportunidad de mejora. La Figura 1.6 muestra el diagrama de proceso para las etapas de extrusión de la empresa.

En el análisis de la medición del desempeño de la empresa se determina el costo de transformación por mes que evalúa la gestión de los recursos de producción y la efectividad global de los equipos (OEE). Estas mediciones se utilizan para demostrar el uso eficiente de los recursos y así identificar con mayor facilidad las oportunidades de mejora en el proceso. No es necesario contar con el valor de las ventas y se limita la medición del desempeño solo a las actividades de producción y no financieras, ya que se pretende resolver indicadores base que implícitamente mejoran la rentabilidad de la empresa al disminuir desperdicio y mejorar la efectividad del uso de los recursos. Posteriormente, estos cálculos se pueden utilizar junto con el valor de las ventas para determinar el retorno sobre la inversión y de esta manera englobar el desempeño gerencial, operacional y financiero que muestra integralmente la rentabilidad de la empresa.



**Figura 1.6.** Diagrama de proceso de extrusión de tuberías.

Entonces, se determina el desempeño operacional de la empresa para apoyar la identificación de las oportunidades de mejora en el proceso. Se desglosa la OEE mensual de la empresa y sus componentes para analizar su situación actual. Luego se calcula la OEE por equipo acumulada desde enero a septiembre para determinar el equipo con menor desempeño. Una vez identificado el equipo se presenta la OEE de los productos que se fabrican en dicho equipo para reconocer aquel con menor efectividad. Por último, se desglosa la OEE del producto identificado para determinar la razón componente de la OEE que afecta más su valor y así determinar con el equipo de producción una estrategia de mejora.

Después, se determina el desempeño de la gestión de los recursos de la empresa por medio del costo de transformación del departamento de extrusión, de esta manera se identifique otra oportunidad de mejora para la situación actual de la empresa, el ROI y así su rentabilidad. Para esto se calcula la proporción de cada uno

de los componentes del consumo energético desde enero a setiembre para determinar el área de mayor consumo y así proponer una estrategia de mejora para reducir el consumo de dicha área.

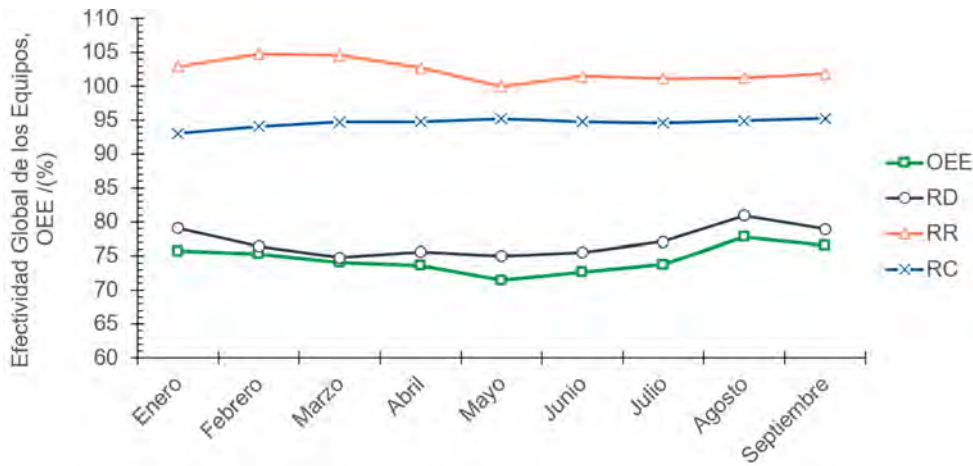
### **1.7.2. Medición del desempeño operacional en el periodo de enero a setiembre 2020**

En el análisis de la OEE como parte de la medición del desempeño operacional se observa en la Figura 1.7 valores entre 75 % y 84 %, según la tabla de clasificación de excelencia operacional la empresa se valora como aceptable con una buena competitividad en sus procesos y se recomienda continuar con la mejora continua para alcanzar valores mayores del 85 %. Entre las razones que más afectan el OEE se muestra la razón de disponibilidad, de acuerdo con las estrategias de la empresa, se procura disminuir la cantidad de producto no conforme por las dificultades de reproceso del PVC y contaminación para aquellos productos que no se puedan reprocesar; este producto no conforme toma en cuenta el producto terminado que no cumple con las especificaciones de producción y el producto defectuoso, por este motivo la razón de calidad obtiene valores por encima del 90 %.

El análisis de la razón de rendimiento muestra valores por encima del 100 %, lo cual corresponde a que el departamento debe cumplir con la programación de producción obteniendo un 100 % de rendimiento y además se contempla el producto no conforme que provoca los valores por encima del 100 %, ya que este producto no conforme, idealmente, pudo haber sido producto conforme y la meta es lograr aprovechar los equipos consiguiendo la menor cantidad de producto no conforme.

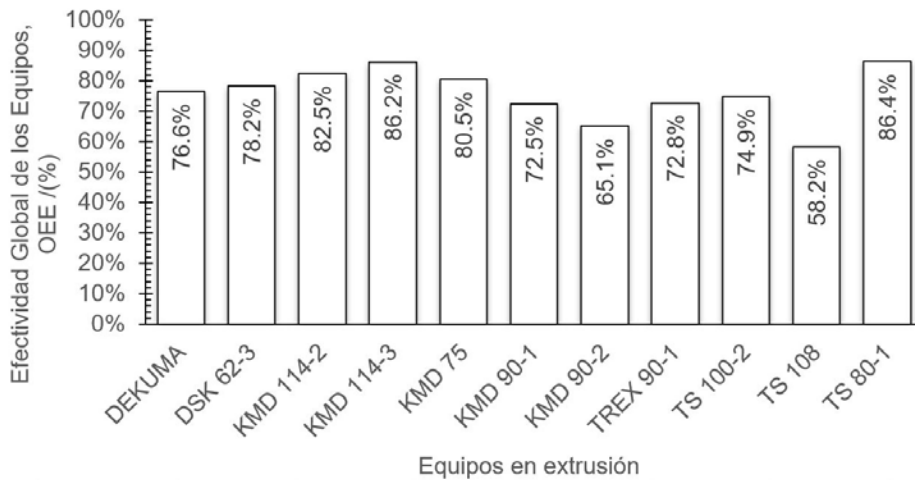
Por último, la razón de disponibilidad consigue valores muy bajos respecto a las otras dos razones debido a que se invierte suficiente tiempo disponible en ajustar las condiciones de proceso para lograr los mejores rendimientos y menor cantidad de producto no conforme.

A partir del resultado anterior se construye un gráfico de la OEE mensual por equipo para identificar el equipo que presenta el menor valor y determinar una mejora para aumentar su eficiencia. En la Figura 1.8 se muestra que el equipo TS-108 obtiene el menor valor de OEE englobando todos los productos que en ella



**Figura 1.7.** OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020.

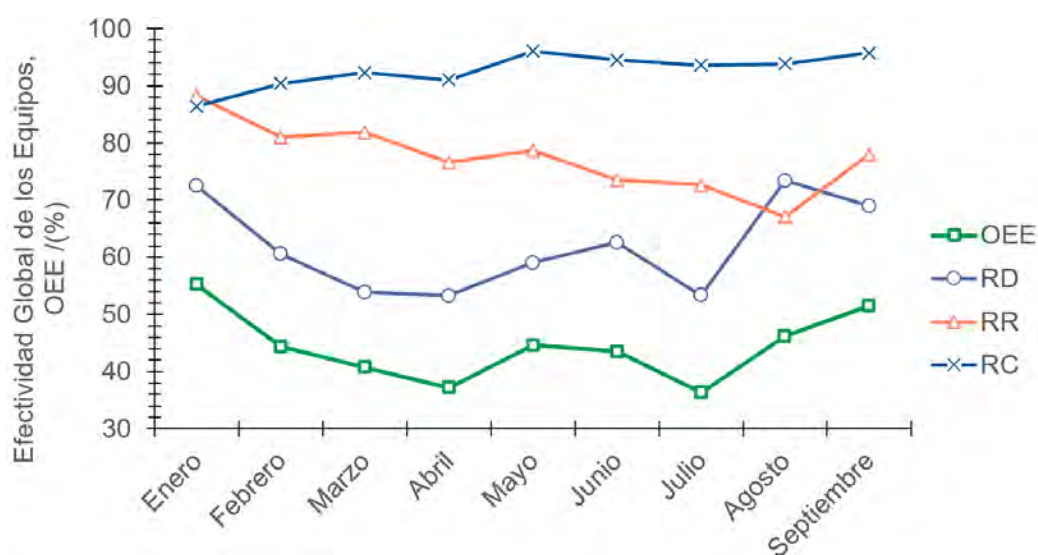
se procesan respecto a los demás equipos del departamento de extrusión. De esta manera, se decide desglosar los productos que en este equipo se producen para reconocer aquel de mayor influencia en la eficiencia global del equipo.



**Figura 1.8.** OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 por equipo del departamento de extrusión.

La Figura 1.9 muestra la eficiencia global del equipo TS-108 desde enero a setiembre del 2020, donde se muestra la tendencia de los componentes de la OEE. Al igual que en el análisis anterior de todo el departamento, la razón de calidad se mantiene por encima del 90% con tendencia ascendente, evitando la generación de producto no conforme; también se observa una mejora en la razón de disponibilidad al final del periodo y una tendencia descendente para la razón de rendimiento debido

a que se notaba mejora en las características de los productos finales al reducir su velocidad y con esto su rendimiento, esto demuestra el aumento de la razón de calidad. Al mismo tiempo se nota un aumento de la razón de disponibilidad que puede atribuirse al aprendizaje en la línea de producción que permite disminuir los tiempos de ajuste y el producto no conforme aprovechando mejor el tiempo disponible para producir.

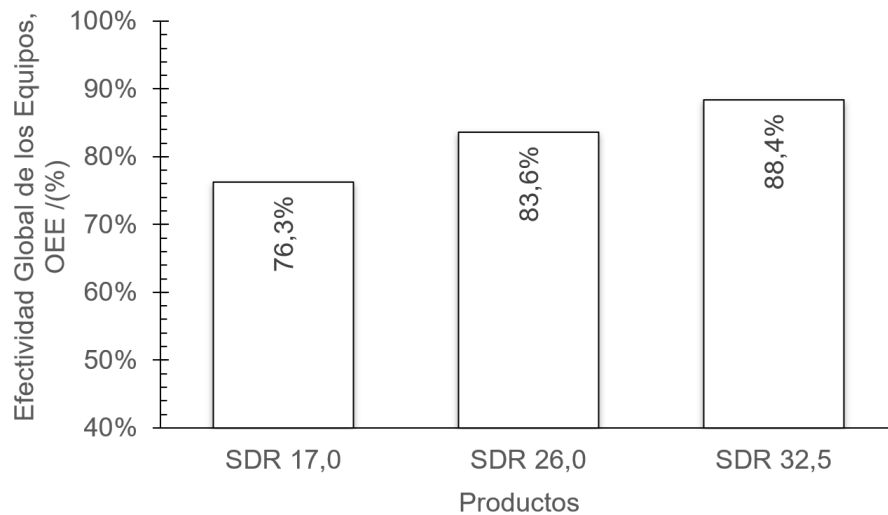


**Figura 1.9.** OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 del equipo TS-108.

Para reconocer cual producto producido en el equipo TS-108 presenta mayor afectación en la OEE del equipo y proponer una estrategia de mejora para dicho producto que consiga una mejora en el indicador, se calcula la OEE por producto como se muestra en la Figura 1.10. En esta Figura se identifican los productos de menor SDR como los de menor efectividad global. Estos productos que se producen en la TS-108 corresponden a productos de mayor diámetro y por relación estándar de diámetro, los de mayor espesor.

Estos productos corresponden a productos especiales para altas presiones de trasiego de aguas que requieren mayor resistencia mecánica para soportarlas y una baja rugosidad que permita un flujo sin requerimientos excesivos de energía de bombeo. Debido a estas características especiales es necesario un estricto control de calidad para cumplir con las especificaciones de resistencia y rugosidad del producto

lo que está presentando rechazos por incumplimiento. El producto Presión Blanco de la empresa corresponde al producto SDR 17 que se muestra como uno de los que requieren atención de mejora, por lo que el análisis se centró en este producto.



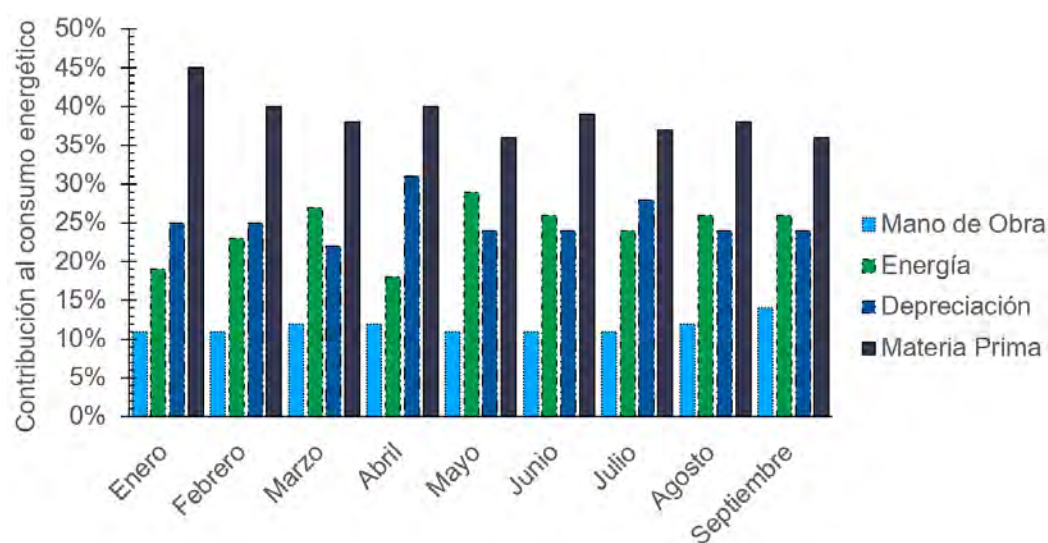
**Figura 1.10.** OEE acumulado Amanco-Wavin de enero a setiembre 2020 de los productos producidos en el equipo TS-108.

Una vez determinado el producto con mayor desperdicio de la planta de producción que afecta significativamente los indicadores de la empresa, se determina la etapa en el proceso que presenta mayor variabilidad para atender aquella que presenta un mayor valor.

### 1.7.3. Medición del desempeño de la gestión de los recursos en el periodo de enero a setiembre 2020

En cuanto a la medición del desempeño de la gestión de los recursos, se estudia el costo de transformación de la planta de producción en el que se incluye el costo de la energía, el costo de la materia prima o insumos, el costo de la mano de obra del personal y el costo por depreciación de los equipos. En la Figura 1.11 se observan las proporciones de los factores que contribuyen al costo de transformación de la planta. En el cálculo se obtiene una mayor contribución por el factor de la materia prima, una contribución significativa por el consumo energético en la planta y también por la depreciación de los equipos.

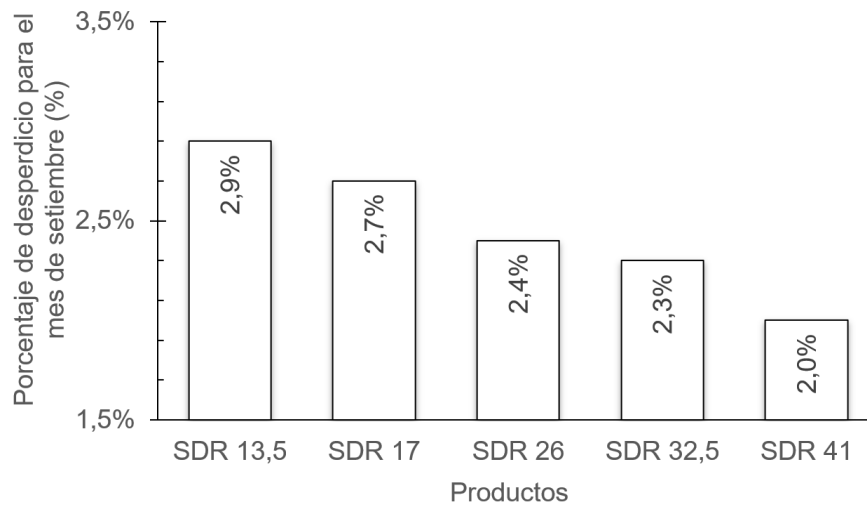




**Figura 1.11.** Contribución al costo de transformación en la planta de producción enero-setiembre 2020.

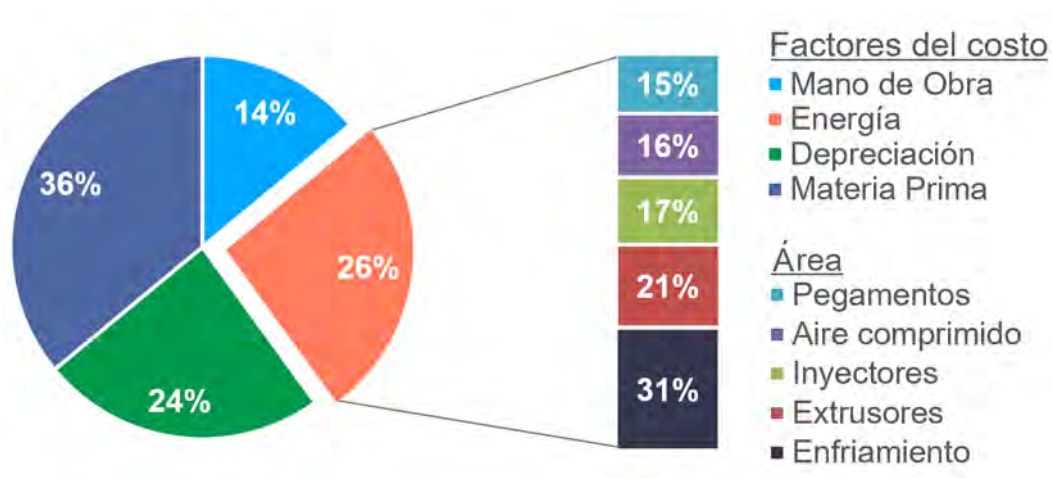
La materia prima corresponde a un componente del costo de transformación difícil de disminuir debido a que su costo está directamente relacionado a la inversión en materia prima de buena calidad y aditivos para mejorar las propiedades de procesamiento y del producto final, por esta razón, solo cabe analizar su uso eficiente y eficaz durante la producción y validar si la formulación utilizada es la óptima de acuerdo con su costo y rendimiento de producción. Por lo tanto, se determina el producto que presenta mayor desperdicio en la empresa y menor rendimiento de producción para validar si su formulación podría ser modificada para conseguir un mayor rendimiento a un menor costo. En la Figura 1.12 se muestra el porcentaje de desperdicio de los productos producidos en el departamento de extrusión, se puede observar que los productos con SDR 13.5 y 17 corresponden a los productos con mayor porcentaje de desperdicio en la empresa; el producto SDR 17 concuerda con los resultados del análisis del desempeño operacional anterior en el que se presentaba una baja eficiencia por lo que representa a uno de los productos que requieren atención para determinar una estrategia de mejora.

Por otro lado, la depreciación de los equipos representa un componente positivo para la empresa al ser un escudo fiscal para las empresas, por lo que no hace falta tomar alguna acción para disminuir este componente.



**Figura 1.12.** Porcentaje de desperdicio generado por los principales productos del departamento de extrusión.

Por último, el costo energético se puede atender por medio de una cuantificación del consumo de los equipos y proponer estrategias que permitan disminuir su consumo aprovechando oportunidades de mejora. En la Figura 1.13 se encuentra la proporción del consumo para el mes de setiembre para las áreas más importantes de la empresa, notando que el sistema de mayor consumo corresponde al sistema de enfriamiento de la planta, éste sistema se encarga de extraer la energía térmica del producto terminado, por lo cual es una etapa crítica y se debe atender la eficiencia de aprovechamiento de la capacidad frigorífica instalada.



**Figura 1.13.** Factores del costo de transformación y áreas de consumo energético de la empresa para el mes de setiembre.

#### 1.7.4. Declaración de problema

El producto de Presión Blanco muestra una OEE por debajo del 70 % en la línea TS-108 obteniendo producto no conforme durante su producción. Las características del producto no conforme corresponde a mala apariencia interna de la tubería por excesiva rugosidad, como se observa en la Figura 1.14, lo cual no es deseado en esta tubería, ya que es dedicada al trasiego de altos volúmenes de fluidos, siendo muy importante la optimización del uso de las capacidades hidráulicas y evitar la formación de sedimentación o biopelículas, que presentan aumentan los coeficientes de fricción en la tubería provocando un aumento de las capacidades hidráulicas para lograr el trasiego.

El sistema de enfriamiento muestra uno de los componentes significativos del consumo energético con una proporción cercana al 25 % del costo de transformación en el periodo de enero a septiembre del 2020. En las tinas de enfriamiento del departamento de extrusión se nota un sobre enfriamiento que no se está aprovechando en su mayoría para el intercambio calórico con el producto terminado, si no que se desperdicia en absorber calor latente del agua del ambiente consiguiendo su condensación en las paredes externas de las tinas y además la tubería consigue una temperatura final muy fría (25 °C) respecto a la temperatura recomendada por la literatura (35-45) °C y la temperatura del retorno del agua helada se mantiene en 17 °C a la cual todavía podría aprovecharse su capacidad frigorífica.



**Figura 1.14.** Mala apariencia interna en los productos no conformes del producto presión blanco.

Con el fin de mejorar los indicadores de gestión y operación, se plantean estrategias de mejora para el producto de Presión Blanco y el área del sistema de enfriamiento de los productos terminados de la planta.



**Figura 1.15.** Tina de enfriamiento de perfiles de la empresa.

#### **1.7.5. Producto Presión Blanco**

Este producto de la empresa corresponde a una tubería de trasiego de altos caudales de agua, por lo que requiere de resistencia a altas presiones de fluido, además cuenta con paredes lisas para disminuir el factor de fricción del fluido que demanda una mayor cantidad de energía hidráulica para su trasiego. Las características de este producto se muestran en el Cuadro 1.2.

La producción requiere la mezcla de diferentes aditivos para la resina virgen de PVC que le brindan diferentes propiedades que mejoran su procesamiento, estabilidad y resistencias mecánicas exigidas por el cliente. Entre los componentes se cuenta con lubricantes internos y externos, estabilizadores térmicos, refuerzos y protectores UV; la formulación para el producto presión blanco se observa en el Cuadro 1.3.

Actualmente representa uno de los productos de mayor desperdicio en el departamento de extrusión por mala apariencia interna y los ajustes para lograr conseguir un producto conforme provocan gran parte de estos desperdicios. En la Figura 1.16 se muestra el desperdicio generado por ajuste de equipo para producir el producto Presión Blanco.

**Cuadro 1.2.** Características del Producto Presión Blanco.

Característica	Detalle
Longitud (mm)	6000
Espesor (mm)	11.3
Diámetro interno (mm)	152
SDR	17
Presión de trabajo (kPa)	2172
Color	Blanco
Características especiales	Paredes lisas
	Resistencia al impacto
	Liviano
	Flexibilidad
	Baja conductividad térmica

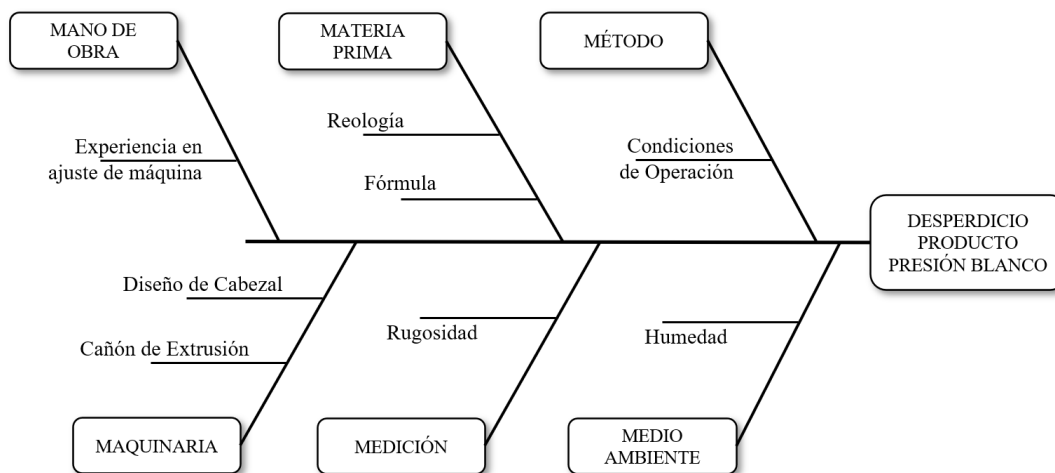
**Cuadro 1.3.** Composición del producto Presión Blanco en la empresa.

Compuesto	Partes por cien de resina (phr)
Estabilizador térmico	0.45
Cera parafínica	1.70
Cera polietilénica	0.15
Estearato de Calcio	0.15
Estabilizador UV	0.45
CaCO <sub>3</sub>	7.5

**Figura 1.16.** Desperdicio generado en ajustes de producción del producto Presión Blanco.

### 1.7.6. Determinación de causa raíz

Se utilizan herramientas de gestión de ideas como lluvia de ideas en reuniones con el equipo del departamento de extrusión para determinar las posibles causas raíz de los problemas identificados con los medidores de desempeño y las posibles soluciones que podrían aplicarse para dichas causas. Las ideas se enumeran en dos diagramas de Ishikawa para el desperdicio del producto Presión Blanco y desaprovechamiento de la capacidad frigorífica del agua helada que afectan el desempeño operacional y gerencial de la empresa; estos diagramas se muestran en la Figura 1.17 que permita clasificar las ideas en las diferentes 6M relacionadas con el problema.

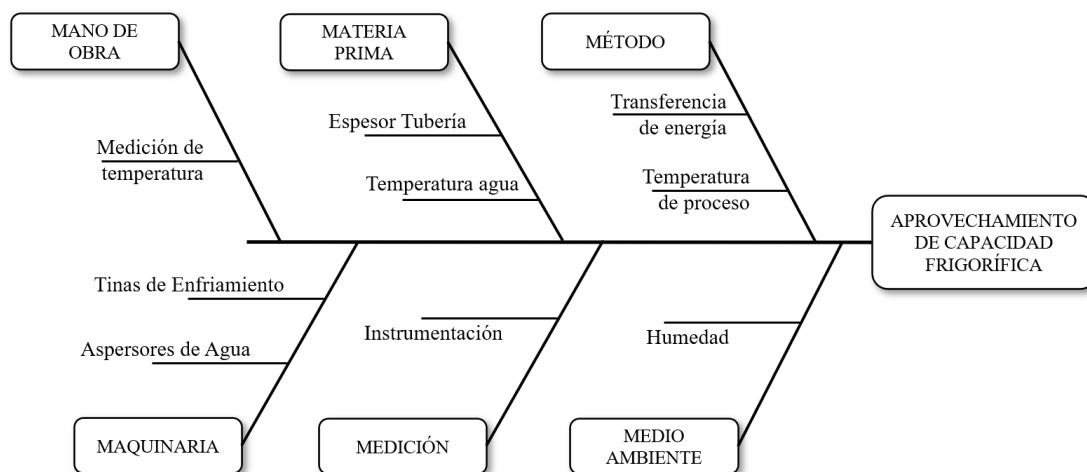


**Figura 1.17.** Diagrama de Ishikawa para la clasificación de las ideas obtenidas en reuniones para mejora del Producto Presión Blanco.

El rendimiento de la producción de tubería está directamente relacionado con el diseño de cabezal, ya que éste diseño limita el rendimiento de producción debido a las características de tiempo de retención y los esfuerzos cortantes que presenta el fluido a través del cabezal provoca diferentes efectos en el producto final. Esto requiere que las características del cabezal de extrusión sean estrictamente diseñadas para cada tipo de producto para lograr mejores rendimientos y menores cantidades de producto no conforme. Por esta razón, se evalúa el diseño del cabezal actual de la línea TS-108 en comparación con un diseño teórico según las recomendaciones bibliográficas.

El rendimiento también será dependiente de la reología del material a procesar

por lo que es necesario estudiar sus propiedades fisicoquímicas que permita estandarizar el proceso al reconocer las condiciones de operación óptimas para lograr mejores resultados y al mismo tiempo se logra capacitar al personal para los ajustes rápidos de equipo.



**Figura 1.18.** Diagrama de Ishikawa para la clasificación de las ideas obtenidas en reuniones para mejora de sistema de enfriamiento.

En cuanto al sistema de enfriamiento del departamento de extrusión se nota un desperdicio debido a un manejo deficiente de la transferencia de energía térmica entre los productos y el agua helada, el cual requiere de cálculos de tiempos y áreas de contacto suficientes para conseguir una transferencia eficiente contemplando los espesores de productos y temperaturas de agua helada y producto; de esta manera, se logre aprovechar la capacidad frigorífica del sistema de enfriamiento. Es necesario contar con mediciones de temperatura a la entrada y retorno del agua helada para monitorear la eficiencia de la transferencia de energía comparándolas con los cálculos teóricos y reportes en literatura.





## CAPÍTULO 2: Proceso de transformación de PVC

La transformación de polímeros involucra diferentes operaciones en una cadena de suministro que es específica para cada tipo de resina y producto final deseado, aun así, estas mantienen en común requerimientos de energía, equipos, mano de obra, herramientas, tecnología y conocimientos que se procuran gestionar óptimamente para ofrecer valor al cliente. Estas variables dependerán de las propiedades de la materia prima, sus aditivos y las propiedades deseadas del producto final, por lo que es de suma importancia el reconocimiento de la materia prima, sus aditivos y cada etapa para definir exactamente sus requerimientos y conseguir los resultados finales satisfactorios. Entre las operaciones de transformación de plásticos se encuentra la producción de tubería plástica por medio del proceso de extrusión.

Este capítulo se apoya en el diseño de un experimento para reconocer el efecto de los aditivos de formulación de una tubería de presión de color blanco y así determinar la optimización de la composición de una fórmula que brinde una mayor productividad del procesamiento de resina de PVC en la empresa. Las características del producto de presión específicamente exigen condiciones de proceso adecuadas para conseguir un alto rendimiento.

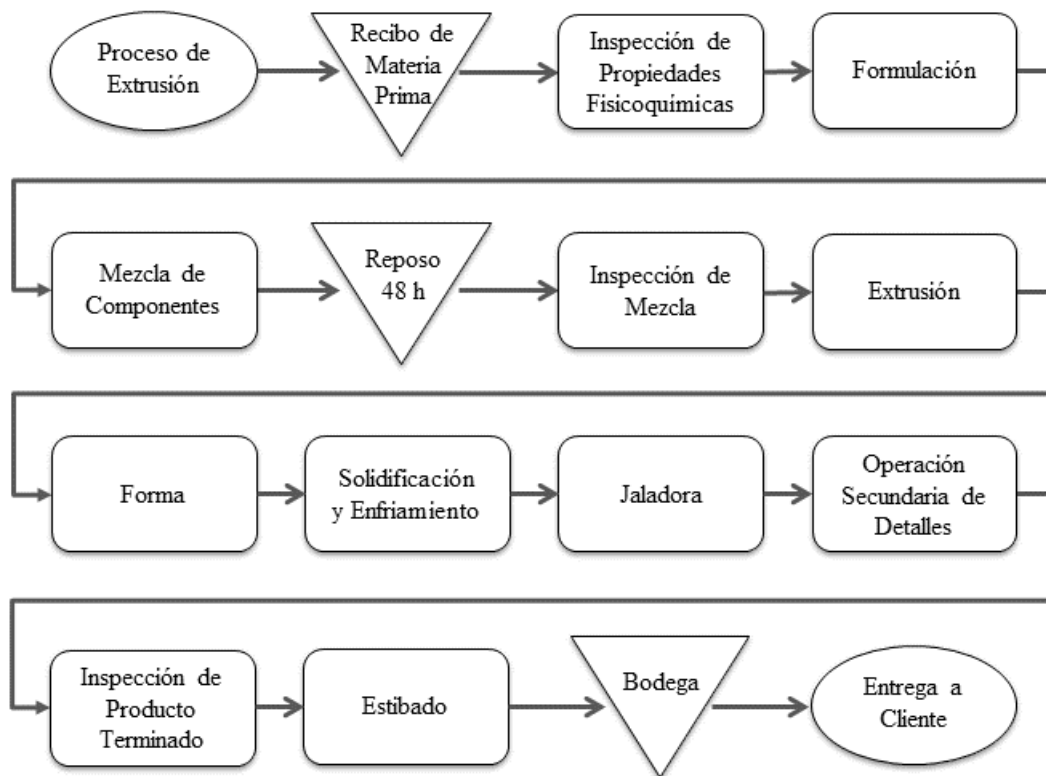
### 2.1. Tubería PVC

Las tuberías de PVC se ofrecen al mercado de infraestructura y manufactura como soluciones de tubosistemas para el trasiego de aguas potable, pluvial y residuales, y también para la protección y manejo de cableado eléctrico y de telecomunicaciones. Sus principales ventajas son la resistencia mecánica, resistencia química, su bajo costo en comparación con otras alternativas y capacidad para procesar diferentes diámetros y longitudes de acuerdo a las necesidades de los clientes. De acuerdo con su aplicación final requieren de un espesor que se estandariza por una relación estándar de dimensiones (Standard Dimension Ratio / SDR) (AWWA, 2002).

**Relación estándar de dimensión (SDR)** En la industria de tuberías para agua y gas se establecen diferentes mediciones y procedimientos estándar internacionales

para definir las especificaciones para cada aplicación. Para esto se hace referencia al uso de la razón estándar de dimensión que relaciona el diámetro externo de una tubería y el espesor mínimo que esta debería tener correlacionado a la resistencia a la presión hidráulica. Por ejemplo, 11 SDR en una tubería de diámetro nominal 110 mm, requiere un espesor mínimo de 10 mm (Kainth, 2018).

El proceso de extrusión de tubería consiste en un seguimiento de varias etapas que involucran diferentes variables a controlar para conseguir un producto final conforme, estas etapas se observan en la Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Diagrama de proceso de extrusión de tuberías.

## 2.2. Materia Prima

La materia prima corresponde a uno de los insumos de producción necesarios para la elaboración de productos, es necesario comprender su comportamiento, ya que

cada materia cuenta con propiedades específicas asociadas directamente a sus condiciones de procesamiento y las características del producto final. La materia prima debe ser adecuadamente almacenada, tomando en cuenta las posibles variaciones de temperatura y humedad a las que se puede encontrar. Por esta razón es necesario realizar inspecciones de la materia antes de utilizar para identificar inconsistencias que afecten el rendimiento de su procesamiento. Algunas de las características a evaluar son: viscosidad, memoria térmica, color, propiedades mecánicas, entre otras (Giles *et al.*, 2005).

## **2.3. Formulación**

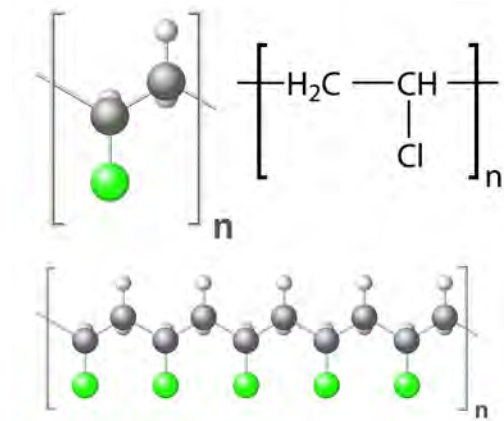
En el catálogo de producción de una empresa pueden existir dos o más productos plásticos diferentes para los cuales posiblemente se requiera de una combinación de materias primas y aditivos diferentes para lograr las características especiales de cada uno de ellos, por esta razón, se realizan diseños de productos que permitan evaluar la composición óptima que garantice un buen rendimiento de producción y las características requeridas en el producto final (Giles *et al.*, 2005).

Generalmente en la industria de plásticos, sus formulaciones se expresan como partes por 100 de resina (phr) para facilitar las actividades de mezclado, ya que generalmente se utiliza una cantidad conocida de resina virgen como base de cálculo (Beltrán, 2011).

### **2.3.1. Policloruro de Vinilo (PVC)**

El PVC consiste en una cadena del monómero de cloruro de vinilo que contiene en su estructura átomos de cloro repetidamente, es uno de los polímeros más utilizados a nivel mundial y su estructura es principalmente amorfa. Posee la habilidad de formularse con muchos aditivos que le permite conseguir un amplio rango de productos entre flexibles hasta rígidos para satisfacer diferentes necesidades. La mayor parte del procesamiento mundial de PVC se dedica a aplicaciones de infraestructura, mobiliarias y electrónica. El PVC posee un bajo precio; sin embargo, para el procesamiento del PVC es necesario estabilizadores térmicos que prevengan su degradación, incluso para algunas aplicaciones es necesario el uso de varios aditivos

adicionales en diferentes cantidades de acuerdo con la aplicación final. Estos aditivos son necesarios para modificar y/o mejorar las propiedades del producto final y para conseguir un procesamiento más sencillo, entre estos se encuentran estabilizadores térmicos, lubricantes, pigmentos y rellenos (Subramanian, 2010).



**Figura 2.20.** Estructura molecular del PVC, esferas blancas representan átomos de hidrógeno, grises carbono y verdes cloro (Beltrán, 2011).

La Figura 2.20 muestra la unidad polimérica del PVC en representación de varas y esferas. Esta estructura provee al material características útiles del PVC son su resistencia química a fluidos corrosivos, dureza y rigidez en comparación con otros termoplásticos y también cuenta con propiedad antinflama (Buezas, 2010).

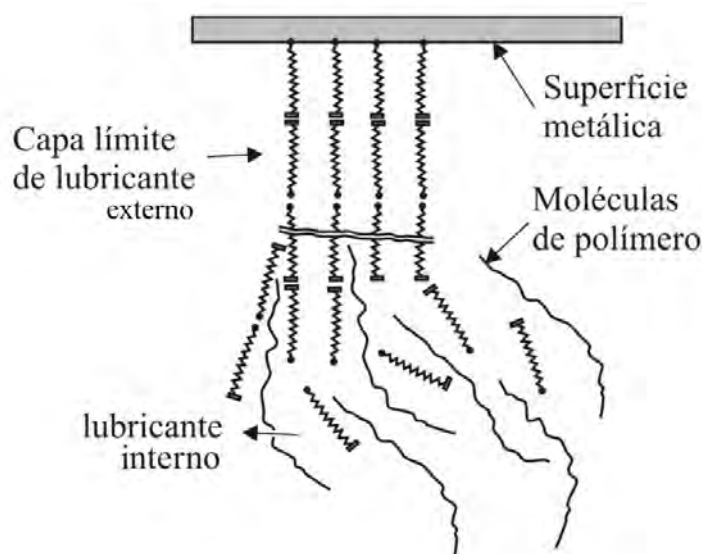
### 2.3.2. Clasificación de los aditivos de PVC

La industria de PVC utiliza una gran cantidad de aditivos para el procesamiento y características del producto final. Su formulación varía según las técnicas de procesamiento de los productos, se utilizan en pequeñas cantidades con el fin de mejorar el procesamiento, rendimiento, apariencia y uso. Estos aditivos se clasifican en estabilizadores térmicos, lubricantes, modificadores de impacto, plastificantes, rellenos y pigmentos (Subramanian, 2010).

**Estabilizadores térmicos:** el PVC puro a temperatura ambiente presenta una baja estabilidad térmica, por lo que requiere de estabilizadores térmicos que le permitan ser calentados durante su procesamiento para fundirlo y brindarle la forma

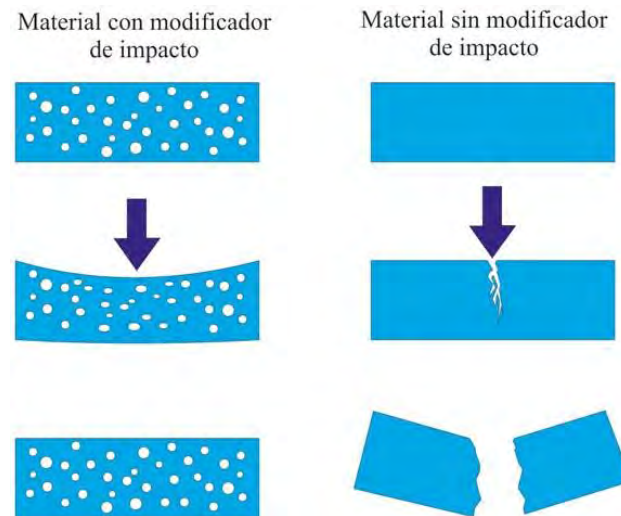
final requerida, de otro modo el material se descompone, se decolora y no logra procesarse adecuadamente (Subramanian, 2010).

**Lubricantes:** estos aditivos se utilizan para evitar que el material se adhiera a las paredes metálicas del cañón y el tornillo de extrusión que podría generar degradación y limitar el flujo del material fundido. Cera polietilénica y parafínica son lubricantes externos comúnmente utilizados en el procesamiento de PVC para promover el movimiento del material. Los ácidos esteáricos y sus sales derivadas son utilizados como lubricantes internos que atraen las moléculas intermolecularmente para facilitar el flujo al mantener las moléculas más juntas. Los excesos de lubricantes pueden provocar problemas en el rendimiento de producción debido a las capas de lubricantes que se pueden formar en las paredes del cañón que entorpecen el transporte de material (Kalpakjian y Schmid, 2002).



**Figura 2.21.** Representación de la acción de lubricantes internos y externos en los polímeros (Beltrán, 2011)

**Modificador de impacto:** corresponde a materiales que mejoran la resistencia al impacto de los productos, brinda ductilidad y disminuye la fragilidad. El carbonato de calcio es el único relleno que también puede actuar como modificador de impacto (Subramanian, 2010). En la Figura ?? se observa el efecto del modificador de impacto en la resistencia de una material polimérico.



**Figura 2.22.** Acción de modificador de impacto en los polímeros (Beltrán, 2011)

**Plastificantes:** son utilizados como mejora de la flexibilidad y suavidad de los productos. Es importante considerar que estos aditivos se mantienen en el producto final y son fácilmente migrables a las sustancias que contengan los productos (Subramanian, 2010).

**Rellenos:** como su nombre lo dice, son materiales que se incorporan en la mezcla de PVC para reducir la proporción de resina virgen y así su costo de formulación. En la manufactura de productos de PVC se maneja cuidadosamente la concentración y adición de rellenos minerales, ya que estos modifican significativamente el módulo elástico y la tenacidad, de mayor a menor medida según el tamaño y forma de partícula del relleno (Hernández *et al.*, 2014). De acuerdo con Subramanian (2010) el talco (silicato de magnesio) posee una eficiencia mayor que el carbonato de calcio y la fibra de vidrio es el mejor.

**Pigmentos:** son compuestos coloreados que permiten dar color a los productos terminados, el dióxido de titanio es utilizado como pigmento blanco y también como estabilizador UV. Es importante resaltar que el dióxido de titanio es altamente abrasivo, por lo que se recomienda utilizar como máximo 12 phr en la formulación (Subramanian, 2010).

**Estabilizador ultravioleta:** el dióxido de titanio es usualmente utilizado como aditivo para materiales poliméricos, ya que este compuesto se encarga de frenar la degradación del material debido a su exposición e interacción con diferentes factores atmosféricos, entre los que se encuentra la luz, la interacción con el agua y el cambio de temperatura como los más propensos a disminuir la calidad de un material. Los rayos ultravioletas, provenientes de la luz solar, provocan energización de los electrones de las moléculas desprendiendo electrones que desencadenan reacciones químicas con radicales libres. Por lo tanto, la adición de dióxido de titanio provoca que sus electrones sean energizados antes que los del polímero, absorbiendo y reflejando la energía, para con esto proteger el material polimérico. El cambio de temperatura y la interacción con agua producen fatiga al material polimérico ya que el mismo está sometido constantemente a esfuerzos elásticos los cuales provocan una pérdida de elasticidad (Schweigger, 2005).

## 2.4. Extrusión

La extrusión consiste en un proceso de compresión en el cual se fuerza un material a fluir a través de un agujero molde para generar un producto determinado de forma transversal igual a la del agujero. Es altamente utilizado para termoplásticos y elastómeros para la formación de tubos, ductos, perfiles, filamentos continuos y recubrimiento de alambres que se cortan a las longitudes deseadas. El proceso consiste en: primero, realizar la medición gravimétrica de materia prima, donde se controla la materia prima necesaria para la fabricación de la tubería, dosificándose gradualmente la mezcla de resina y aditivos premezclada al tornillo de extrusión en el cilindro. El segundo paso se basa en la adición de energía térmica a la materia prima con el fin de disminuir la tensión en el equipo, como tornillo y cilindro evitando una ruptura en el material de éstos, a esta etapa se le denomina precalentamiento. El tercer paso ocurre en el cabezal de extrusión, el cual es el accesorio del equipo por el que el tornillo comprime el material fundido para la obtención del producto final con la forma y espesor deseado. El cuarto paso, es un proceso de gran importancia para que el producto extruido intercambie calor con el agua helada de enfriamiento para que éste mantenga su apariencia física. El quinto paso consiste en arrastrar el

producto extruido por medio de una jaladora. El sexto paso es de corte e inspección del producto terminado para verificar que se cumpla con las especificaciones de norma y de los clientes, al no cumplirse las mismas esta etapa funciona como alerta para que se realicen las acciones correctivas necesarias en el proceso. Finalmente, el producto es apilado y enviado a bodega a esperar por su transporte hacia el cliente (Subramanian, 2010).

Un proceso de extrusión eficiente se consigue con un mejor entendimiento del comportamiento de los materiales a utilizar. Se puede caracterizar el comportamiento de los polímeros por medio de ensayos reológicos para predecir características y propiedades del procesamiento y producto final de plástico.

#### 2.4.1. Reología

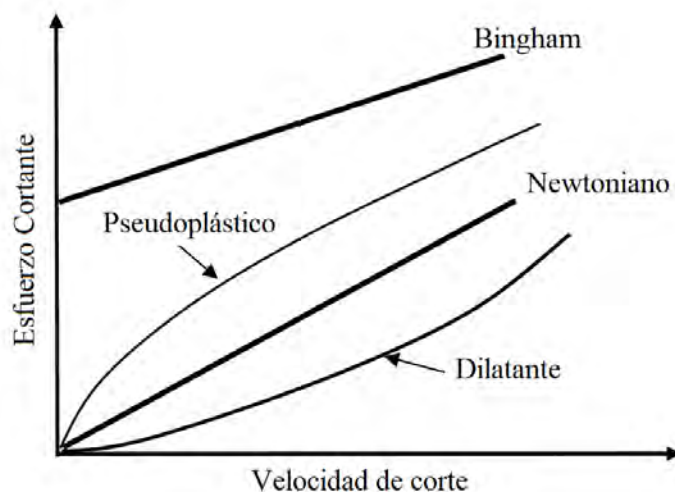
La reología se encarga del estudio del flujo y deformación de la materia, la cual se somete a un esfuerzo mecánico, donde el comportamiento del material de estudio no puede explicarse por medio de modelos lineales simples de la hidrodinámica y elasticidad. Los polímeros presentan un comportamiento reológico que está relacionado a diferentes fenómenos propios del material entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: flujo viscoso, elasticidad de los cauchos y afines, viscoelasticidad y elasticidad de Hooke (Billmeyer, 2004).

Para este estudio se cuenta con una norma internacional ASTM D2538-Standard Practice for Fusion of PVC Compounds Using a Torque Rheometer, específicamente para realizar ensayos de fusión, estabilidad térmica, estabilidad de color y estabilidad de esfuerzos de momento de torsión, obteniendo un perfil de momento de torsión y de temperatura, como respuesta de reología, que permite correlacionar mezclas en un reómetro con las condiciones de proceso y predecir cambios de procesamiento (ASTM International, 2018). El análisis de estas variables permite por medio de diseños de experimentos garantizar las propiedades del producto final extruido y también desarrollar nuevas fórmulas conformes variando la composición de los aditivos.

**Fluidos Newtonianos:** los fluidos pueden clasificarse como fluidos Newtonianos o no Newtonianos, según su forma de fluir. Los fluidos Newtonianos presentan una



viscosidad independiente a la velocidad de deformación a la que se sometan y los fluidos no Newtonianos se comportan de manera contraria. Los fluidos no Newtonianos se pueden clasificar respecto a su comportamiento de esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 2.23, Pseudoplásticos, Bingham (Viscoplásticos) o dilatantes (Quoc-Hung y Ngoc-Diep, 2012).



**Figura 2.23.** Tipos de fluidos no Newtonianos (Quoc-Hung y Ngoc-Diep, 2012).

Los pseudoplásticos son aquellos fluidos que presentan una menor viscosidad conforme aumenta la velocidad de deformación; los fluidos dilatantes presentan un comportamiento contrario, conforme se aumenta la velocidad de deformación, estos aumentan su viscosidad y por último los fluidos de Bingham son aquellos que muestran una viscosidad constante después de un esfuerzo mínimo aplicado (Quoc-Hung y Ngoc-Diep, 2012).

**Momento de torsión** se conoce como la capacidad de hacer girar un objeto aplicando un determinado esfuerzo a una distancia del centro de masa de un objeto (Wolfgang y Westfall, 2011).

#### 2.4.2. Reómetro de momento de torsión Brabender

Este equipo es reconocido en la industria de transformación de plástico para facilitar el desarrollo de nuevas formulaciones para los productos, control de cali-

dad en planta y como apoyo en la solución de problemas, también llamado como plastógrafo.

Una de las grandes ventajas de este equipo consiste en atender la necesidad de mejorar el rendimiento de los productos y aumentar sus tasas de producción que requieren del uso de diferentes componentes como rellenos, resinas mejoradas, estabilizantes, lubricantes, ayudas de proceso, entre otros aditivos; para esto, el Brabender logra medir los pequeños cambios en las características de procesamiento y formulación al incorporar estos componentes y así optimizar la fórmula de trabajo (Hawkins, 1982).



**Figura 2.24.** Plastógrafo Brabender utilizado para las corridas de reometría.

El equipo cuenta con una unidad de medición y registro de momento de torsión y temperatura durante un proceso de mezclado reflejando la resistencia del material ante la rotación de los accesorios de mezclado. Esta respuesta se muestra en un diagrama de temperatura y momento de torsión respecto al tiempo, llamado plastograma. En el plastograma se logra observar la relación entre el momento de torsión y la temperatura en el proceso de mezclado y plastificación. El equipo cuenta con diferentes tipos de mezcladores según la aplicaciones que se le vaya a dar. Se cuenta con un mezclador tipo 1 que se utiliza específicamente para obtener el perfil de temperatura y momento de torsión de los ensayos de reología y otro tipo 2 que se utiliza para mezclar los componentes según la formulación seleccionada. Los tipos

de mezcladores cuentan con geometrías distintas según la aplicación que favorecen el comportamiento en cada aplicación. En la Figura 2.25 se observan los dos tipos de mezcladores utilizados para el ensayo de reometría (Brabender GmbH, 2017).



**Figura 2.25.** Mezcladores tipo 1 y 2 para el ensayo de reología y desarrollo de muestras, respectivamente.

### 2.4.3. Plastificación

La plastificación corresponde a la propiedades de los polímeros que les permite deformarse continua y permanentemente sin alcanzar una ruptura, por la aplicación de una fuerza que excede el límite elástico del material (Beltrán, 2011).

### 2.4.4. Perfil de momento de torsión y temperatura de plastógrafo

En la Figura 2.26 se muestra una curva típica de la respuesta de reología obtenida del plastógrafo, esta información es necesaria para diseñar los tornillos de extrusión según la energía requerida en cada zona y el esfuerzo de cizalladura presente en cada una de ellas (ASTM International, 2018). Se muestra el momento de torsión necesaria cuando ingresa la masa sólida a la cámara de ensayo, seguido la zona de fusión de toda la muestra y posteriormente la zona de estabilidad y homogeneidad del material.

El procedimiento general para el desarrollo de muestras y ensayo de reología se muestra en los anexos de este documento. En la Figura 2.26 se muestra la curva

típica de un ensayo de reología con el reómetro Brabender; de esta curva se extrae la siguiente información según ASTM International (2018):

**A-Pico de carga:** corresponde al aumento de momento de torsión máximo de la mezcla virgen fría y sin fusionar.

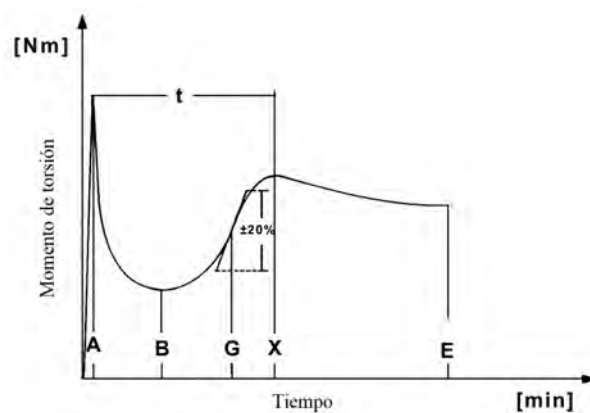
**B-Mínimo momento de torsión:** es el punto de mínimo momento de torsión.

**G-Punto de inflexión:** consiste en el cambio de pendiente de la curva después del punto de mínimo momento de torsión, refleja la velocidad con la que las partículas modifican su arreglo molecular, que corresponde a la velocidad de fusión.

**X-Máximo momento de torsión (Momento de torsión de fusión):** corresponde al punto de la curva que refleja el momento de torsión máximo del material fundido, en este punto el material esta completamente fundido.

**E-Momento de torsión final:** muestra el punto final definido por el usuario en el que la curva es estable, generalmente después de los 5 min.

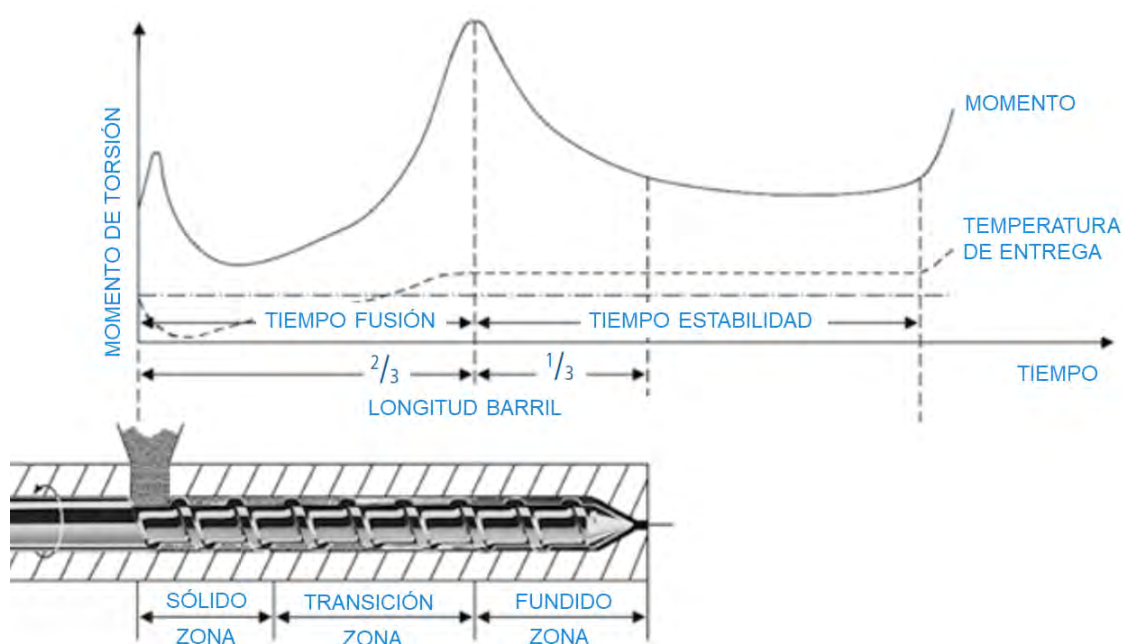
**t-Tiempo de fusión:** corresponde al tiempo entre el pico de carga A y el máximo momento de torsión X.



**Figura 2.26.** Respuesta de reología obtenido de un plastógrafo. A=Pico de carga, B= Mínimo momento de torsión, G=Punto de inflexión, X= Máximo momento de torsión, t= tiempo de fusión, E= Momento de torsión final (Brabender GmbH, 2019).

Por otro lado, la curva típica de temperatura obtenida del reómetro de momento de torsión se observa en la Figura 2.27 junto con la curva de momento de torsión, en la que se observa un decaimiento en el pico de carga por la transferencia de energía al material al fundirse y se recupera poco a poco finalizando el ensayo, este comportamiento demuestra la absorción de energía por la mezcla y la temperatura necesaria en el barril para conseguir fundir el material. La temperatura obtenida depende de la materia prima a utilizar y puede variar para encontrar la más adecuada para procesar la materia prima elegida (Brabender GmbH, 2017).

El diseño de tornillo de extrusión se basa en la respuesta reológica de una fórmula, el pico de carga se refleja en la carga del material a la extrusora por la tolva, seguido de una zona de transición en la que el material se funde por completo y termina con la zona de estabilidad como se muestra en la Figura 2.27, este estudio asegura que el material en proceso no presente cambios internos que se reflejen como deformación en el producto final, esta comparación de perfil de temperatura y aumento de torsión asegura que el material en el tornillo se encuentre completamente fusionado y estable antes de salir del tornillo (ASTM International, 2018).



**Figura 2.27.** Transferencia de datos de la respuesta reológica al tornillo de extrusión (Brabender GmbH, 2019)

## 2.5. Diseño de Experimentos (DOE)

El diseño de experimentos corresponde a una aplicación del método científico en conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería que permiten comprender ampliamente las relaciones existentes entre causas-efectos. Esta aplicación tiene el objetivo de implementar un análisis e interpretación de la variación de los factores sobre una o más variables de respuesta utilizando un procedimiento probabilístico y estadístico de los datos característicos de cada factor. El análisis de los diseños de experimentos es útil para apoyar la toma de decisiones, control del proceso industrial y organización del personal involucrado (Gutiérrez y De la Vara, 2008).

Para estudiar la gran diversidad de situaciones o problemas que pueden ocurrir en la práctica existen numerosos diseños experimentales y para cada uno se deben considerar diferentes aspectos para elegir adecuadamente el que más se adecue a cada situación dada. Entre los diseños que se conocen se encuentran (Gutiérrez y De la Vara, 2008):

- Diseños de comparación entre dos o más tratamientos.
- Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una respuesta.
- Diseños para determinar el punto óptimo de operación de un proceso.
- Diseños para la optimización de mezcla.
- Diseños para conseguir producto o proceso insensibles a factores no controlables.

Un diseño de experimentos es una estrategia activa utilizada para la mejora de productos y procesos por medio de cambios estratégicos que genera señales útiles que pueden lograr concretarse en mejoras sustanciales antes de acumular defectos, en lugar de esperar señales de procesos defectuosos que urgen de mejora (Bacio, 2007).

La validez de los resultados obtenidos de un experimento depende de la confiabilidad de los datos tomados para el estudio de la variable respuesta. Esta validez se puede comprobar mediante la comprobación de distribución normal de los datos

recolectados, igualdad de varianza entre tratamientos e independencia de los datos que se conocen como supuestos de modelo. La comprobación de estos supuestos puede ser tanto analítica como gráfica (Lind *et al.*, 2012).

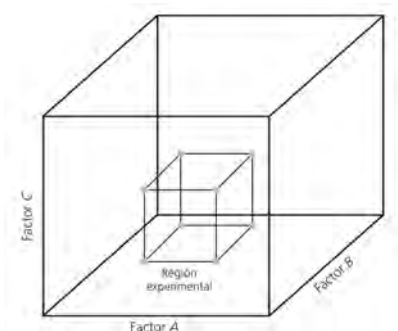
Entre métodos analíticos más comunes para comprobar supuestos de modelo se encuentran Shapiro Wilks para normalidad de los datos, prueba Barlett para varianzas iguales y Durbin Watson para independencia entre los datos que se pueden comprobar utilizando un paquete estadístico como Minitab o R-Studio (De la Vara y Domínguez, 2017).

## 2.6. Metodología de superficie de respuesta (MSR)

Esta metodología consigue la optimización de una o varias variables respuesta mediante experimentos secuenciales que desplazan la región experimental de acuerdo con los resultados del experimento anterior hasta obtener las mejoras deseadas (De la Vara y Domínguez, 2017).

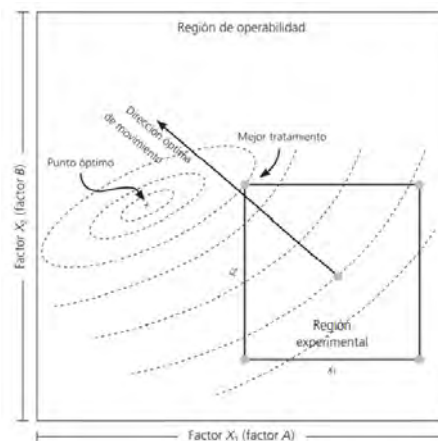
### 2.6.1. Región de operabilidad y experimental

La metodología MSR parte de un espacio de operabilidad de un equipo o proceso que corresponde al conjunto de condiciones en el puede operarse; mientras que la región experimental consiste en la porción de la región de operabilidad que se elige para estudiar una respuesta. En la Figura 2.28 se observa la representación de la metodología MSR (De la Vara y Domínguez, 2017).



**Figura 2.28.** Representación de región experimental y de operabilidad de un experimento (De la Vara y Domínguez, 2017).

Generalmente para procesos ya establecidos el punto óptimo no se encuentra muy alejado de las condiciones actuales del proceso; mientras que para procesos o productos nuevos probablemente la región experimental propuesta esté alejado del punto de interés, por lo que debe comenzarse con una región experimental amplia que abarque el punto de interés y en los siguientes experimentos acercarse mejor a dicho punto delimitando las condiciones encontradas. Para encontrar las mejores condiciones de operación es importante verificar si en los datos utilizados existe curvatura mediante el ajuste de los datos con un modelo lineal o cuadrático y así conseguir las condiciones deseadas con mayor confianza. En un experimento se puede encontrar el mejor tratamiento y el punto óptimo del experimento, es decir, entre las condiciones evaluadas en una región experimental se encontrarán las mejores condiciones que optimizan una respuesta, sin embargo, existen otras condiciones en la región de operabilidad que muestran las condiciones óptimas para encontrar la mejor de todas las respuestas, como se muestra en la Figura 2.29 con las curvas de nivel o isolíneas, para dicho caso es necesario desplazar la región experimental (De la Vara y Domínguez, 2017).



**Figura 2.29.** El mejor de los tratamientos en una región experimental y el punto óptimo en una región de operabilidad (De la Vara y Domínguez, 2017).

La metodología MSR se compone de tres etapas para conseguir el punto óptimo de operación: cribado, búsqueda I y búsqueda II (De la Vara y Domínguez, 2017).

- *Cribado:* Al contar con muchos factores involucrados en la obtención de una variable respuesta (6 u 8), es necesario reducirlos a 5 o menos factores de



mayor influencia que permita un análisis manejable. En esta etapa se pueden realizar diseños factoriales, factoriales fraccionados, Plackett-Burman, entre otros y solo interesa detectar el efecto principal de cada factor (De la Vara y Domínguez, 2017).

- *Búsqueda I o primer orden:* Consiste en un diseño de primer orden que se aplica cuando se consiguen los 5 factores o menos con influencia en la variable respuesta. Permite determinar el tipo de superficie de respuesta y la presencia de curvatura (De la Vara y Domínguez, 2017).
- *Búsqueda II o segundo orden:* Al detectar presencia de curvatura se completa un diseño de segundo orden para determinar mejor la superficie de respuesta y modelar la curvatura obtenida. De esta búsqueda se obtienen las condiciones óptimas de operación del experimento (De la Vara y Domínguez, 2017).

### 2.6.2. Modelo

El modelo de ajuste de los datos experimentales en un MSR son de tipo polinomio de primer y segundo orden (De la Vara y Domínguez, 2017):

**Primer orden:**

$$Y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (6)$$

**Segundo orden:**

$$Y = \beta_0 \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

Donde,

$Y$ : Variable dependiente

$x_i/x_j$ : Variable independiente

$\beta_0$ : Parámetro constante 0 del modelo

$\beta_i$ : I-ésimo parámetro constante del modelo

$\varepsilon$ : Error de estimación

## 2.7. Diseños factoriales

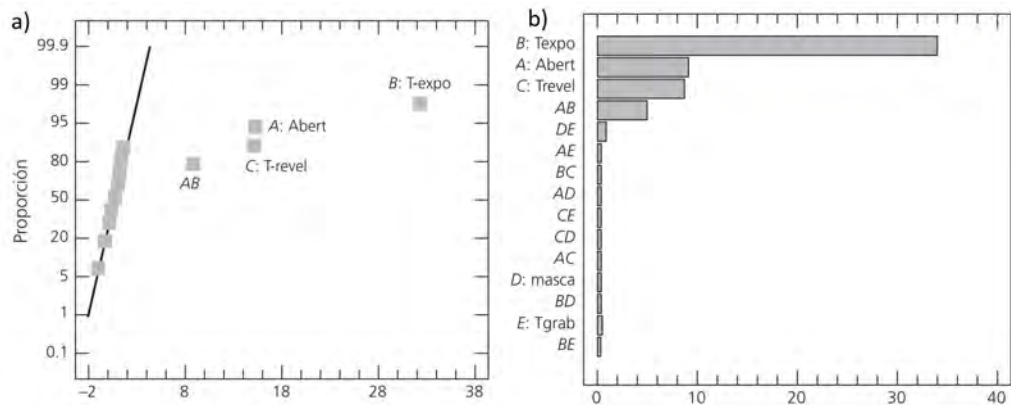
Este tipo de diseño es útil cuando se desea conocer el efecto de varios factores en una variable respuesta, los cuales presentan la misma importancia entre sí en el experimento. Los factores se prueban en dos niveles que se corren aleatoriamente mediante una matriz de diseño que genera todas las combinaciones posibles de niveles entre los factores para evaluar su efecto principal y además en interacción con los otros factores. De esta forma un diseño factorial permite descartar de una investigación los factores que su variación no presenta un efecto importante en la variación de la variable respuesta y así se logra economizar recursos al eliminar sus corridas del experimento (Prat *et al.*, 2004).

### 2.7.1. Efecto principal y de interacción

El efecto de un factor corresponde a la respuesta observada en una variable de estudio debido a un cambio en el valor de dicho factor. Un efecto es principal cuando la respuesta presenta un cambio significativo debido a la variación de uno de los factores en estudio, mientras que el efecto de interacción se refiere al cambio de dos factores que interactúan entre sí para generar una variación significativa en la respuesta.

La significancia del efecto de un factor se puede determinar mediante la comparación del valor-p respecto con el nivel de significancia o confianza del experimento con la que se está trabajando. Se decide que un efecto es significativo si el valor-p es más pequeño que el nivel de significancia. También se puede determinar gráficamente por medio de un Gráfico de Daniel o Diagrama de Pareto como los que se observan en la Figura 2.30 (De la Vara y Domínguez, 2017).

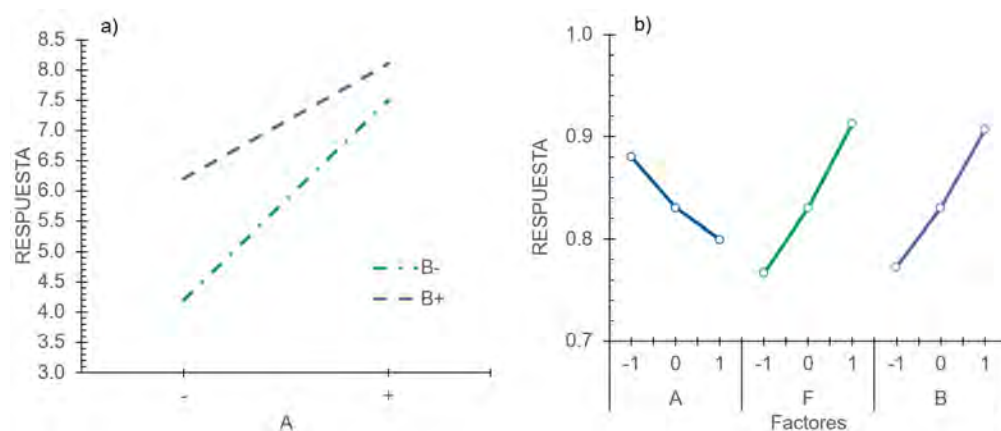
El gráfico de Daniel o diagrama de Pareto son muy útiles para discriminar entre factores significativos y no significativos con bajas resoluciones de diseños de experimentos que permiten descartar aquellos factores no significativos sin invertir grandes recursos.



**Figura 2.30.** a) Gráfico de Daniels, b) Diagrama de Pareto para identificar los efectos significativos (De la Vara y Domínguez, 2017).

### 2.7.2. Representación de los efectos principales y de interacción

Los efectos se representan de manera gráfica para apreciar la variación en la respuesta que provoca una variación en el factor. Una pendiente menos pronunciada se interpreta como que el efecto de un factor es poco significativo, mientras que en el sentido contrario una pendiente muy pronunciada es efecto significativo de un factor como se muestra en la Figura 2.31. La interpretación de los efectos de interacción se analiza graficando el efecto de uno de los factores en interacción mientras se fija el otro factor (De la Vara y Domínguez, 2017).



**Figura 2.31.** Representación de efectos de factores en una variable respuesta a) efecto de interacción, b) efecto principal.

## 2.8. Diseños factoriales fraccionados

Aumentar el número de factores en un diseño factorial aumenta el número de corridas necesarias de un experimento que lo hacen poco rentable en la práctica por el tiempo y el costo de los recursos, para esto cuando se cuenta con más de 5 factores de interés puede reducirse los tratamientos experimentales sin sacrificar la información valiosa del experimento y así conseguir un diseño manejable. Este procedimiento provoca que los efectos a estimar tengan al menos un alias en el que dos o más efectos comparten un mismo contraste y por esto un mismo efecto en la respuesta por lo que se debe interpretar su variación en contexto del experimento para generar conclusiones concretas (De la Vara y Domínguez, 2017).

### 2.8.1. Efectos generadores

Los efectos generadores consisten en las interacciones de más alto orden que se utilizan para generar la fracción factorial a trabajar para el experimento.

### 2.8.2. Concepto de resolución

Al trabajar diseños fraccionados provoca alias que impiden que efectos puedan estimarse de manera aislada, de esta manera es esencial que los diseños cuenten con efectos importantes alias de efectos poco importantes para que la influencia sea explicada por dichos efectos importantes sin confusión. Para esto se utiliza el concepto de resolución para identificar qué tan bien pueden estudiar los efectos potenciales de un experimento (De la Vara y Domínguez, 2017).

- Resolución III: Efectos principales no son alias entre ellos, pero sí con interacciones dobles.
- Resolución IV: Efectos principales no son alias entre ellos y tampoco con interacciones dobles, pero las interacciones dobles están alias con otras dobles.
- Resolución V: Efectos principales e interacciones dobles están en alias con interacciones triples o de mayor orden, por lo que se pueden estimar limpiamente.

El costo de experimentación por el uso del tiempo, equipos y materia prima en un diseño de experimentos puede ser alto dependiendo de la naturaleza del experimento, debido a la cantidad de corridas que se requieren para su análisis, por esto, en algunas ocasiones, se recurre a una fracción del diseño de menor cantidad de corridas que presenta resolución III aceptando los riesgos de suponer interacciones inactivas de los factores para obtener los efectos principales. Estas fracciones pueden utilizar un diseño Placket-Burman, el cual cuenta con una estructura parcial de confusión, consiguiendo una menor probabilidad de que un efecto principal significativo se confunda con una interacción doble (MiniTab LLC, 2020).

### **2.8.3. Placket-Burman**

Corresponde a un diseño popular de cribado para estimar todos los efectos principales en un diseño pequeño, útil para el reconocimiento inicial de los procesos con un diseño de experimentos. Una de sus desventajas es que al ser un diseño de resolución III los efectos principales pueden estar confundidos con los efectos de interacción, sin embargo, las corridas adicionales que agrega el diseño produce un menor riesgo de interacción convirtiéndolo en un diseño adecuado para el cribado de factores (Vanaja y Shobha, 2014).

### **2.8.4. Diseños factoriales con punto al centro**

Corresponde a aquellos diseños factoriales con un nivel de prueba intermedio, conocido como punto central que permite demostrar si un efecto posee curvatura o no y además agrega más grados de libertad al error para obtener un estimador de los efectos más puros sin necesidad de repetir corridas (De la Vara y Domínguez, 2017).

## **2.9. Función de Deseabilidad**

La necesidad de utilizar esta función se basa en que en los procesos industriales reales, la calidad de un producto depende de la respuesta que se obtiene de más de una propiedad de los productos. Entonces, es necesaria una metodología que

permita evaluar la combinación adecuada entre los valores de los factores que mejor satisfacen un objetivo que se desea alcanzar para un determinado proceso o producto que reporta múltiples respuestas importantes a considerar. Esta función convierte un problema multirespuesta a uno de respuesta única y otorga importancia relativa entre respuestas.

### 2.9.1. Deseabilidad individual:

La transformación de experimento multirespuesta a respuesta única consiste en trabajar con valores que se encuentran entre 0 y 1 obtenidos por criterios que se evalúan de acuerdo con requisitos de cada variable que pueden ser minimizar la respuesta, encontrar un valor deseado o maximizar la respuesta, que se definen como la cercanía a un valor objetivo. La deseabilidad 100 % hace referencia al lograr el valor esperado u objetivo de un experimento (Rubio, 2019).

Por último, se calcula una deseabilidad compuesta que combina cada deseabilidad individual; la deseabilidad óptima será la máxima encontrada, ya que encuentra las mejores opciones en las que se consiguen los requisitos definidos de cada respuesta. Según los requisitos definidos la deseabilidad se calcula de la siguiente manera (Bacio, 2007):

**Maximizar respuesta:**

$$d_i(\hat{y}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{y}_i < L_i \\ ((\hat{y}_i - L_i)/(O_i - L_i))^{g_i} & \text{si } L_i \leq \hat{y}_i \leq O_i \\ 1 & \text{si } \hat{y}_i > O_i \end{cases} \quad (8)$$

**Minimizar respuesta:**

$$d_i(\hat{y}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{y}_i > U_i \\ ((U_i - \hat{y}_i)/(U_i - O_i))^{s_i} & \text{si } O_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \\ 1 & \text{si } \hat{y}_i < O_i \end{cases} \quad (9)$$

**Valor objetivo de respuesta:**

$$d_i(\hat{y}) = \begin{cases} ((\hat{y}_i - L_i)/(O_i - L_i))^{g_i} & si \quad L_i \leq \hat{y}_i \leq O_i \\ ((U_i - \hat{y}_i)/(U_i - O_i))^{s_i} & si \quad O_i < \hat{y}_i \leq U_i \\ 0 & si \quad \hat{y}_i < L_i \\ 0 & si \quad \hat{y}_i > U_i \end{cases} \quad (10)$$

Donde,

$d_i$  : Deseabilidad de la i-ésima respuesta [*adim*]

$g_i$  : Ponderación de deseabilidad de la i-ésima respuesta [*adim*]

$s_i$  : Ponderación de deseabilidad de la i-ésima respuesta [*adim*]

$\hat{y}_i$  : Valor de la i-ésima respuesta

$U_i$  : Límite superior para la i-ésima respuesta

$L_i$  : Límite inferior para la i-ésima respuesta

$T_i$  : Valor Objetivo de la i-ésima respuesta

### 2.9.2. Deseabilidad compuesta:

Corresponde a la media geométrica ponderada de las deseabilidades individuales:

$$D = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{W}} \quad (11)$$

$$\frac{1}{W} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (12)$$

Donde,

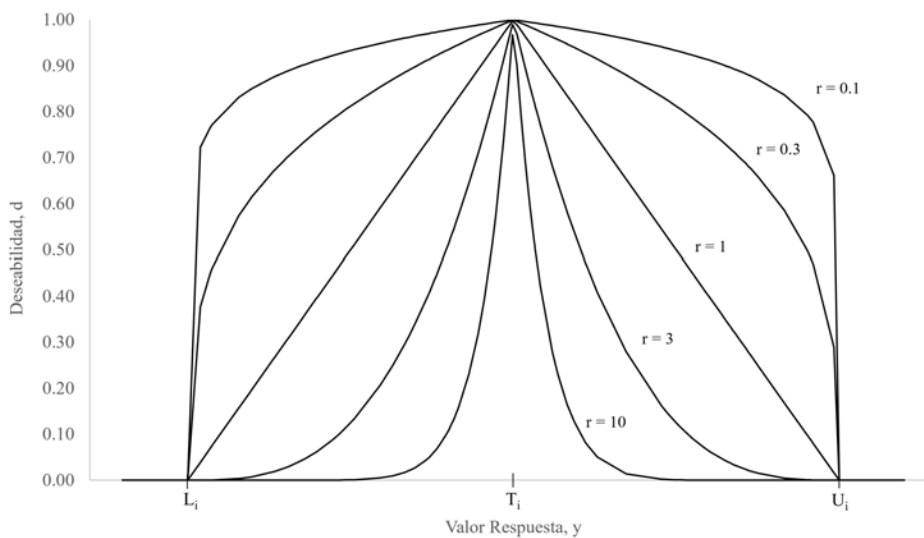
$d_i$  : Deseabilidad de la i-ésima respuesta [*adim*]

$w_i$  : Importancia de la i-ésima respuesta [*adim*]

$W$  : Ponderación promedio de respuestas [*adim*]

El comportamiento de la función de deseabilidad individual se muestra en la Figura 2.32, en la cual se observa un comportamiento distinto al utilizar una ponderación diferente de acuerdo con la sensibilidad que se elige para cada variable respuesta; esta sensibilidad se elige de acuerdo con el criterio del experimentador

que considere mayor o menor importancia de cada variable en la respuesta global (Bacio, 2007). Este comportamiento describe la exigencia de las respuestas a estar cercanas al objetivo definido en el experimento según su importancia; se puede observar que al acercarse al objetivo, los valores de deseabilidad para valores altos de ponderación se acercan a la unidad más lentamente que con valores bajos de ponderación.



**Figura 2.32.** Función de deseabilidad y ponderaciones de sensibilidad de las respuestas.

## 2.10. Cribado de los aditivos de formulación para producto Presión Blanco

El producto terminado de Presión Blanco es uno de los productos de la empresa que actualmente presenta una no conformidad por rugosidad interna, para lo cual se ha reducido su rendimiento respecto al estándar para conseguir eliminar la rugosidad interna y resolver la no conformidad; sin embargo, esta estrategia está afectando los indicadores de desempeño de la empresa, especialmente la OEE en su razón de rendimiento. Por esta razón, se desea evaluar si una formulación distinta logra mejorar la apariencia interna del producto al mantener su rendimiento estándar.

El diseño de nueva fórmula para el producto se consigue eficientemente aplicando diseños de experimentos, para lo cual se plantea un diseño con metodología de



superficie de respuesta (MSR) para evaluar el efecto de los componentes utilizados y su interacción en la respuesta reológica obtenida de un reómetro hasta conseguir una respuesta adecuada que permita disminuir los esfuerzos presentes en el herramental de extrusión que provoca deformidades en los productos.

El primer paso para realizar un diseño de superficie de respuesta es realizar un cribado de los factores a evaluar en la formulación del producto Presión Blanco con el fin de identificar aquellos factores con influencia significativa en las respuestas del ensayo de reología. La formulación de este producto se observó en el Cuadro 1.3, cada uno de sus componentes se evaluarán para determinar aquellos que cuentan con mayor influencia en la respuesta reológica obtenida del equipo Brabender comparada con un ensayo de referencia. Este ensayo de referencia corresponde a una formulación con aditivos diferentes de un producto que se obtiene en la misma línea sin problemas de calidad y con alto rendimiento. Conseguir un comportamiento reológico similar al de un producto sin problemas propone que el material mantendrá esfuerzos cortantes similares que son los principales causantes de problemas en apariencia interna de la tubería.

El cribado de los componentes de formulación se lleva a cabo mediante un diseño de cribado para reducir el número de componentes con el que se va a trabajar. Para definir los niveles de cada factor se toman las composiciones de los productos que se fabrican en la línea TS-108 y se define el nivel bajo de cada componente a analizar como la composición mínima que se trabaja y el nivel alto como la composición máxima. Los productos y su composición se observan en el Cuadro 2.4 y los niveles seleccionados en el Cuadro 2.5, el lubricante 1 corresponde a la cera polietilénica, lubricante 2 a cera parafínica, lubricante externo es estearato de calcio y el relleno carbonato de calcio.

Dado que se cuenta con 6 componentes, éstos se consideran como los factores del experimento, estadísticamente en este diseño se realizan 12 corridas para detectar los efectos realmente importantes trabajando con un diseño factorial fraccionado  $2^{6-3}$ , con 4 corridas adicionales que mejoran la ambigüedad de presencia de confusión entre efectos principales y de interacción.

**Cuadro 2.4.** Clasificación de la excelencia de los procesos de acuerdo con el valor de la OEE.

Producto	Estabilizador térmico	Lubricante interno 1	Lubricante interno 2	Lubricante externo	Estabilizador UV	Relleno
SDR 13.5	0.45	1.70	0.15	0.60	0.45	7.50
SDR 17.0	0.60	1.78	0.15	0.60	2.10	5.00
SDR 26.0	0.60	1.30	0.20	1.00	0.45	3.00
SDR 32.5	1.35	2.50	0.50	1.10	2.30	1.35

La variable respuesta del diseño corresponde a la deseabilidad compuesta de las propiedades reológicas del material como momento de torsión máximo, momento de torsión mínimo, momento de torsión de carga y tiempo de fusión, las cuales tienen un efecto importante en el procesamiento de extrusión.

El momento de torsión máximo y de carga determinan el esfuerzo máximo al que se someten los tornillos de extrusión y es importante no exceder su capacidad para no fracturarlos, el momento de torsión mínimo se correlaciona con la fluidez del material y el máximo rendimiento que podría obtenerse, el tiempo de fusión establece el tiempo mínimo que requiere el material en el barril para empezar a fundirse y a la vez permite reconocer el tiempo máximo para no descomponer el material.

**Cuadro 2.5.** Niveles del diseño de experimentos.

Factor	Nivel bajo (phr)	Nivel alto (phr)
Estabilizador térmico	0.30	1.35
Lubricante interno 1	0.50	2.50
Lubricante interno 2	0.05	0.50
Lubricante externo	0.10	1.10
Estabilizador UV	0.20	2.30
Relleno	1.35	5.00

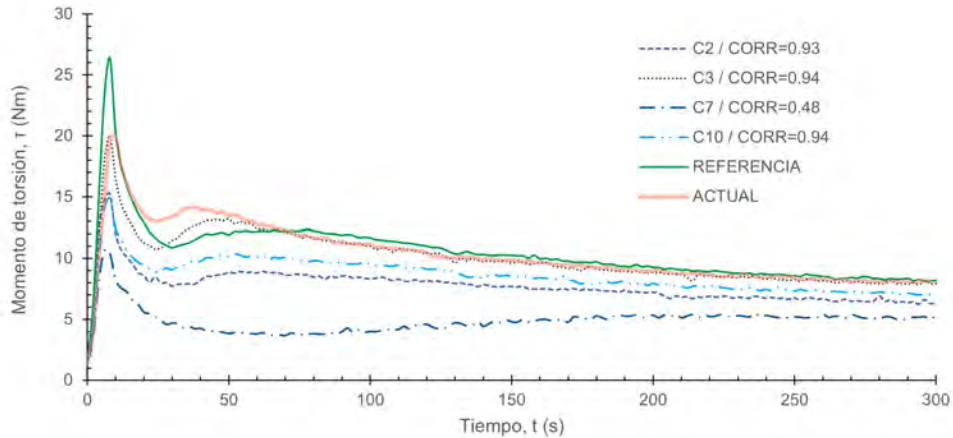
Se preparan las fórmulas del diseño y las de referencia utilizando el reómetro Brabender, para las cuales se prepara con aproximadamente 78 g de mezcla en la cámara de desarrollo del equipo por 5 min a 100 °C, estas fórmulas se dejan reposando por 48 h para que se estabilice y entreguen resultados repetibles y reproducibles. Las muestras se etiquetan y se almacenan en cápsulas de PVC como se muestra en la Figura 2.33, para ser utilizadas en los ensayos de reología que consisten en obtener una respuesta de estabilidad térmica, color y a los esfuerzos cortantes del material fundido de PVC que predice su comportamiento dentro de los tornillos de extrusión.



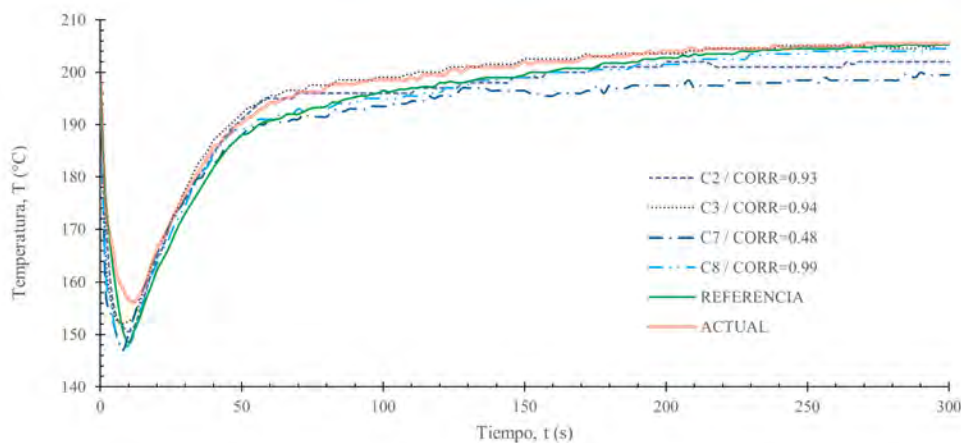
**Figura 2.33.** Preparación de muestras para pruebas reológicas.

A partir de los ensayos de reología se obtiene las curvas que se muestran en las Figuras.2.34 y 2.35, donde se muestra la respuesta de temperatura y aumento de torsión para las corridas que se asemejan a la muestra de referencia y otra que menos se asemeja (corrida 7/C7). La muestra de referencia corresponde a la muestra que se produce en el equipo en estudio sin presentar rugosidad interna en la tubería que se suponen por efecto de excesivos esfuerzos cortantes y la muestra actual representa a la fórmula que se utiliza actualmente para el producto Presión Blanco. Las curvas de aumento de torsión representan el comportamiento del material fundido con la aplicación de las fuerzas por el tornillo de extrusión, mientras que las curvas de temperatura muestran la absorción de energía por el material para fundirse y de esta forma no llegue a descomponerse por excesos de temperatura. Para la corrida 7 (C7) se puede observar que la temperatura en la cámara de mezcla no se recupera como el resto de corridas en la figura de temperaturas, por lo que se puede correlacionar

con el comportamiento del momento de torsión en el que se observa un aumento en el momento de torsión que probablemente va requiriendo de absorción de energía.



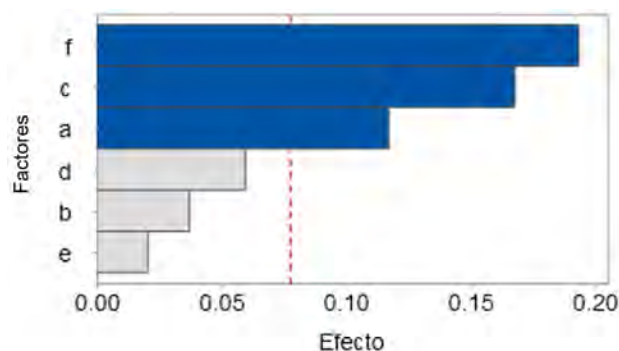
**Figura 2.34.** Curvas de momento de torsión obtenidas del reómetro Brabender.



**Figura 2.35.** Curvas de temperatura obtenidas del reómetro Brabender.

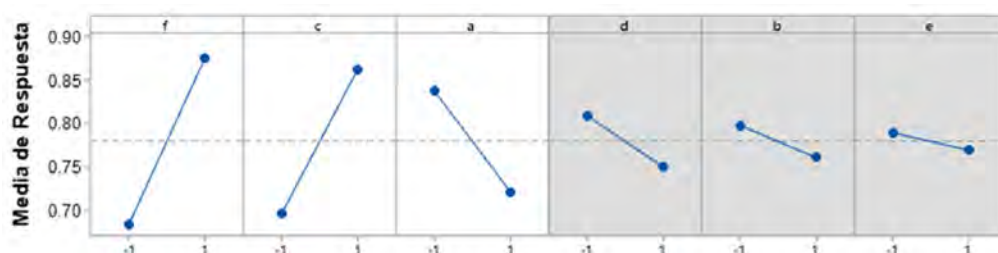
Del diseño factorial se obtiene que la composición de estearato de calcio, cera parafínica y carbonato de calcio presentan un efecto significativo en la respuesta reológica cómo se muestra en la Figura 2.36. Este resultado concuerda con que las muestras con mayor composición de lubricantes y menor de relleno, muestran un menor valor del momento de torsión lo que refleja el comportamiento de que el movimiento entre partículas es mucho más favorable además de la disminución de la fricción con las paredes de la cámara de ensayo. En la literatura se reporta que

un mayor contenido de  $\text{CaCO}_3$  disminuye el movimiento de las moléculas indicando un mayor momento de torsión y reducción del índice de fluidez (Mousa *et al.*, 2007). Esto justifica la importancia de controlar adecuadamente las formulaciones de los productos para estandarizar los procesos de extrusión.



**Figura 2.36.** Diagrama de Pareto para la identificación de efectos significativos. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo.

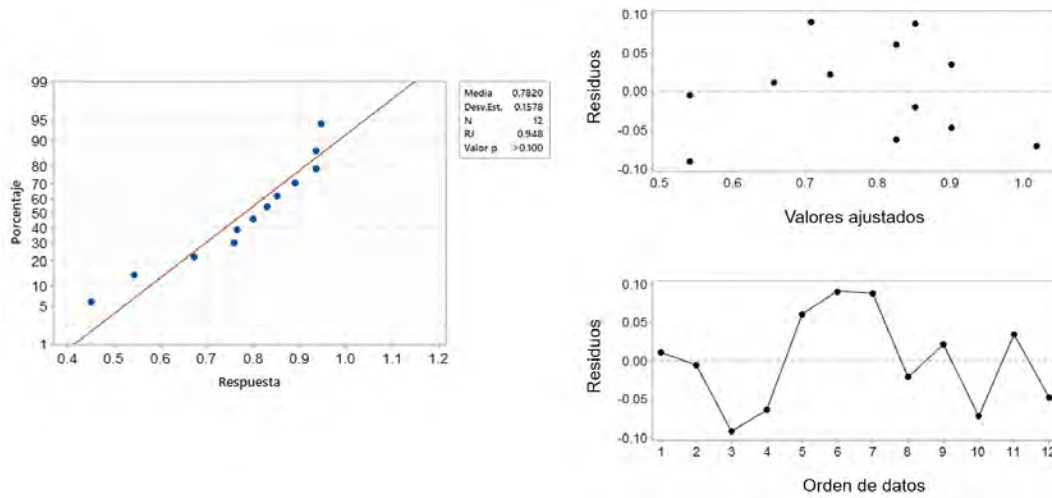
La Figura 2.37 muestra la respuesta de deseabilidad para las propiedades reológicas en función de los niveles de los factores. Se observa que el aumento del relleno de fórmula provoca que disminuya el criterio de deseabilidad compuesta de la respuesta, mientras que para el lubricante interno 1 y el externo aumentar su proporción provoca que la respuesta se asemeje a la referencia.



**Figura 2.37.** Efecto de los aditivos de fórmula en la deseabilidad compuesta de las propiedades reológicas. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo.

En la Figura 2.38 se muestra la verificación de supuestos del diseño que brindan confianza a los datos procesados y así los resultados y conclusiones obtenidas. En los gráficos construidos no se observan patrones que indiquen dependencia, variabilidad

no uniforme o falta de normalidad de los datos.



**Figura 2.38.** Validación de supuestos del diseño de experimentos.

## 2.11. Optimización de Fórmula Presión Blanco

Después de conseguir los aditivos críticos se pretende encontrar la fórmula adecuada para el producto Presión Blanco de manera que mejore los esfuerzos cortantes evidenciado en la respuesta reológica. Se aplica al diseño de experimentos de superficie de respuesta incorporando la función de deseabilidad para evaluar las múltiples respuestas de interés para el procesamiento del PVC. Estas respuestas corresponden a las propiedades reológicas del material como aumento de torsión máximo, aumento de torsión mínimo, aumento de torsión de carga y tiempo de fusión, las cuales tienen un efecto importante en el procesamiento de extrusión. Los parámetros de ponderación de la función de deseabilidad se muestran en el Cuadro 2.6, se eligen los límites de acuerdo al comportamiento de la mezcla de referencia y las ponderaciones según la importancia de los parámetros reológicos en la mezcla final. El pico de carga, el aumento de torsión mínimo y tiempo de fusión se eligen por debajo de la unidad, ya que son variables que pueden variarse con más libertad, mientras que el aumento de torsión máximo no por complicaciones que puede dar en el tornillo de extrusión.

La determinación de las propiedades reológicas del material se lleva a cabo con el uso del equipo Brabender de la empresa, para el cual se deben preparar previamente las muestras con la formulación de estudio con una configuración de equipo a una

**Cuadro 2.6.** Parámetros de la función deseabilidad.

Corrida	Aumento de torsión de carga, $A /(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión mínimo, $B/(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión, máximo $X/(\text{N} \cdot \text{m})$	Tiempo de fusión, $t_f/(\text{s})$
Límite Inferior	6.0	2.0	2.0	15
Límite Superior	50.0	20.0	20.0	300
Ponderación	0.4	0.8	1.0	1

temperatura inicial de 100 °C, un tiempo de corrida de 5 min y una muestra de 78.0 g a una velocidad de rotor a 60 rpm. Se dejan reposando las muestras por 48 h y se realizan los ensayos de reología con una configuración de equipo de temperatura a 197 °C, 73.43 g, velocidad de rotor a 60 rpm por 5 min.

Se realizó un factorial  $2^3$  por duplicado para cumplir con los grados de libertad del error. De los aditivos no críticos se eligen de manera que presenten menor costo y facilidad de operación en el equipo, es importante reconocer que la respuesta del diseño de cribado es mecánica y no de cualidades del producto, como el color, disminuir el aceite estabilizador, por ejemplo, no influye las propiedades reológicas, pero sí la descomposición de material obteniendo una decoloración no deseada. Los niveles y composición de los aditivos fijos se observan en el Cuadro 2.7.

**Cuadro 2.7.** Niveles del diseño de experimentos y aditivos fijos.

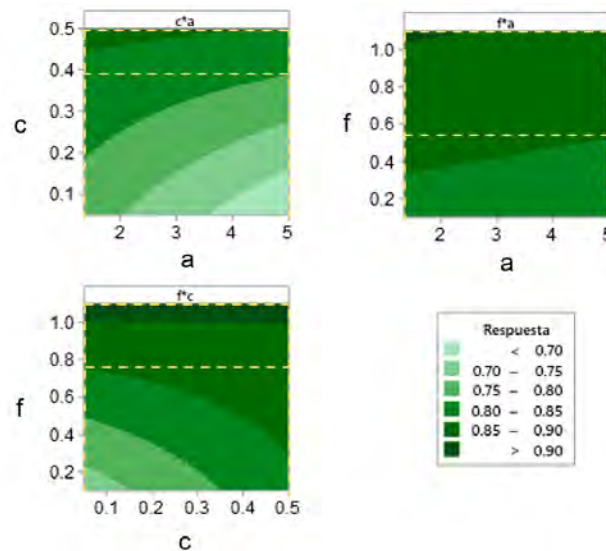
Factor	Nivel bajo (phr)	Nivel alto (phr)
Estabilizador térmico	0.60	0.60
Lubricante interno 1	1.40	1.40
Lubricante interno 2	0.05	0.50
Lubricante externo	0.10	1.10
Estabilizador UV	2.10	2.10
Relleno	1.35	5.00

Se tomaron 3 puntos centrales para determinar si existe curvatura en la respuesta. En la Figura 2.39 se puede observar que existe relación lineal entre la respuesta y los efectos explicado en un 85 %, por lo que no hay necesidad de utilizar un modelo cuadrático y las conclusiones se obtienen a partir de los resultados del modelo lineal.



**Figura 2.39.** Análisis de curvatura para la respuesta reológica de las formulaciones.

De acuerdo con los gráficos de superficie que se muestran en la Figura 2.40 es preferible formular el Producto Presión blanco entre los rangos señalados en la Figura en la que se observa una mayor deseabilidad que se asemeja a las propiedades reológicas de la muestra de referencia. El relleno (a) puede estar en cualquier concentración del intervalo estudiado, mientras que el lubricante interno y externo se mantengan en sus niveles altos, por encima de 0.4 phr y 0.8 respectivamente. La ecuación de regresión se optimiza para conseguir la composición de estearato de calcio, cera parafínica y carbonato de calcio que consigue la mayor deseabilidad posible en el escenario estudiado por lo niveles elegidos.



**Figura 2.40.** Gráficas de contorno para la respuesta de deseabilidad de los parámetros reológicos. a) Relleno, b) Lubricante interno 1, c) Lubricante interno 2, d) Estabilizador UV, e) Estabilizador térmico, f) Lubricante externo.

La Figura 2.41 muestra la verificación de supuestos del diseño que brindan confianza a los datos procesados y así los resultados y conclusiones obtenidas. En los gráficos construidos no se observan patrones que indiquen dependencia, variabilidad



no uniforme o falta de normalidad de los datos.

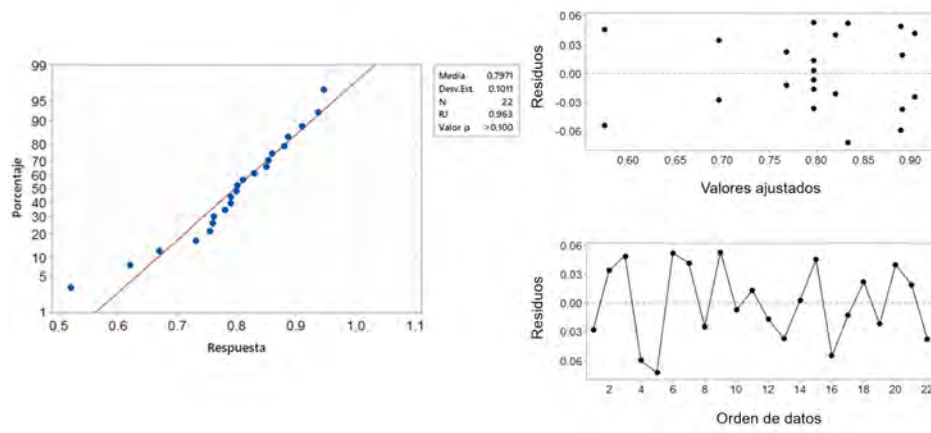


Figura 2.41. Validación de supuestos del diseño de experimentos.



## CAPÍTULO III: Sistemas de Enfriamiento Industrial

Los procesos de enfriamiento industrial se consideran dentro de las operaciones unitarias más importantes de las empresas de manufactura debido a que tienen un efecto significativo en las etapas necesarias para conseguir el producto final. Su principal aplicación consiste en disminuir la energía térmica de otro cuerpo más caliente por medio del intercambio calórico basado en principios termodinámicos. Para llevar a cabo estos procesos se cuenta con distintos equipos de tamaño industrial con diferentes capacidades de refrigeración de acuerdo con la aplicación requerida (Olsson, 2015).

Entre las leyes de la termodinámica se cita la segunda, la cual expone que la transferencia de calor se consigue desde un cuerpo más caliente a otro más frío y esta diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para que se dé la transferencia, entre mayor sea este gradiente de temperatura con mayor rapidez se dará la transferencia de energía. Y la primera ley, indica que la energía que cede uno de los sistemas es igual a la energía que percibe el otro sistema o sistemas involucrados, sin embargo, no es suficiente calcular un calor ganado y un calor perdido entre sistemas, se requiere entender que existe un tiempo y eficiencia para que dicho intercambio calórico ocurra, debido a que el proceso de enfriamiento está descrito por el fenómeno de transferencia de energía calórica, la cual corresponde al estudio de la razón o rapidez con la que se lleva a cabo la transferencia de una cantidad medida de energía de un sistema a otro. Para lograr un enfriamiento satisfactorio y además eficiente, es necesario el conocimiento de conceptos fundamentales de la termodinámica como balances de energía, mecanismos básicos de transferencia de energía como conducción, convección y radiación y también la conductividad y difusividad térmica y números adimensionales que correlacionan el coeficiente de transferencia por convección (Cengel y Ghajar, 2011).

En el proceso de extrusión de tubería y accesorios plásticos se utilizan procesos de enfriamiento para reducir la temperatura de estos productos por debajo de la temperatura de moldeo por medio de la extracción de energía térmica del material con el fin de garantizar las propiedades finales del producto terminado. El intercam-

bio calórico se lleva a cabo por medio de una transferencia de calor por conducción y convección con agua helada y así el material consigue la temperatura adecuada a la que la pieza final no presenta una deformación significativa (Beltrán, 2011).

### 3.1. Formas de energía térmica

En el universo se puede encontrar la energía en diferentes expresiones como: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, interna, química y nuclear, juntas constituyen la energía total,  $E$ , de un sistema. La energía relacionada con la estructura molecular de un sistema y su grado de actividad se conoce como energía microscópica y la suma de todas estas energías microscópicas dan como resultado la energía interna de un sistema ( $U$ ).

La energía interna se puede considerar como la suma de la energía cinética y potencial de las moléculas, en las cuales la parte cinética constituye la energía sensible o calor sensible haciendo referencia a la velocidad y grado de actividad de las moléculas, la cual se relaciona directamente con la temperatura. La energía interna también se asocia a las fuerzas intermoleculares con las que interaccionan las moléculas mutuamente, siendo más fuertes en los sólidos, luego en los líquidos y seguido en los gases, así al introducir energía a un sistema, la actividad de las moléculas aumenta hasta igualar la energía de las fuerzas de interacción, logrando vencerlas y conseguir los cambios de fase en los sistemas, esta energía a la que se consigue el cambio de fase se conoce como energía latente o calor latente.

En el fenómeno de transferencia de energía también es importante el calor específico de una sustancia, el cual representa la energía requerida para elevar en un grado una unidad de masa de un sistema. El calor específico varía para sistemas a presión o volumen constante ( $c_p$  y  $c_v$ ), sin embargo, los sólidos y líquidos se consideran sustancias incompresibles dado que sus volúmenes específicos se mantienen prácticamente constantes durante un proceso, por lo que para  $c_p = c_v = c$ . Para sólidos y líquidos el cambio de energía interna se expresa como (Thomas y Philip, 2019):

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (13)$$

Donde:

$\Delta U$  : Cambio de energía interna [J]

$m$  : Masa [kg]

$c$  : Calor específico [J/kg · K]

$\Delta T$  : Cambio de temperatura [K]

## 3.2. Mecanismos de transferencia de calor

La energía puede ser transferida de un sistema a otro por medio de calor por unidad de tiempo ( $\dot{Q}$ ) y/o trabajo por unidad de tiempo, conocido como Potencia ( $\dot{W}$ ). Se consigue una transferencia de calor  $\dot{Q}$  cuando existe una interacción energética como gradiente de temperatura entre sistemas, lo cual se conoce como la fuerza impulsora de la transferencia de calor. Si no existe este gradiente de temperatura, es necesario de la actuación de trabajo  $W$  para transferir energía de uno de los sistemas a otro para los cuales no existe un gradiente de temperatura. La transferencia de energía puede llevarse a cabo por medio de tres diferentes mecanismos: Conducción, Convección y Radiación y por potencia por medio de compresores y válvulas de expansión (Cengel *et al.*, 2019).

### 3.2.1. Transferencia por conducción

Consiste en la transferencia de energía entre partículas más energéticas de una sustancia a las menos energéticas adyacentes por medio de transporte de electrones libres, vibraciones, colisiones y difusiones. La temperatura es una relación de la energía cinética de las partículas de una sustancia, la vibración, rotación y traslación de estas partículas provoca choque con otras partículas adyacentes transfiriendo parte de la energía de la partícula más energética a otra menos energética y así su temperatura como reflejo de estas colisiones, si se cuenta con mayor temperatura es posible una mayor cantidad de colisiones por un mayor movimiento de partículas

y así una mejor transferencia de energía. La rapidez de la conducción de energía a través de un medio depende de la geometría, espesor y tipo de material del medio y la diferencia de temperaturas. Experimentalmente se ha concluido que la conducción térmica es proporcional a la diferencia de temperatura y al área de transferencia de una capa de estudio, pero inversamente proporcional al espesor de dicha capa, tal y como lo expresa la Ley de Fourier en la Ecuación 14 (Cengel y Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{Cond} = \frac{-k \cdot A_{\perp} \cdot \Delta T}{L} \quad (14)$$

Donde:

$\dot{Q}_{Cond}$  : Energía transferida por conducción [W]

$k$  : Conductividad Térmica [W/m · K]

$A_{\perp}$  : Área perpendicular a la dirección de la transferencia de energía [m<sup>2</sup>]

$L$  : Espesor de capa [m]

**Conductividad térmica:** el calor específico se definió como la capacidad de un material para almacenar energía térmica y es diferente para cada naturaleza de material. Mientras que la conductividad térmica de los materiales se refiere a su capacidad para conducir la energía térmica, de esta manera, los materiales pueden ser buenos medios para almacenar energía térmica, pero malos conductores de esta misma. Por ejemplo, el agua cuenta con un calor específico de 4.18 kJ/kg · K y una conductividad térmica de 0.607 W/m · K, siendo un buen medio para almacenar energía, pero mal conductor de la energía, por otro lado el hierro posee un calor específico de 0.45 kJ/kg · K y una conductividad térmica de 80.2 W/m · K, presentándose como un mal almacenador de energía, pero buen conductor térmico. Comparando con el PVC, Wypich (2016) reporta un calor específico de (0.90-0.97) kJ/kg · K y una conductividad térmica de (0.13-0.17) W/m · K, por lo tanto, el PVC cuenta con una capacidad para almacenar energía inferior que la del agua con lo que se podría predecir un intercambio calórico favorable, sin embargo, su conductividad es inferior por lo que el tiempo para el intercambio puede ser alto.

**Difusividad térmica:** esta representa la rapidez con la que se difunde el calor por un material y se define como el cociente de la conductividad térmica y la capacidad calorífica, consiguiendo una constante que permite la comparación adecuada entre materiales respecto con su capacidad de transferir calor, el agua cuenta con un valor de  $0.14 \cdot 10^{-6}$  y el hierro de  $22.8 \cdot 10^{-6}$  demostrando la habilidad del agua de almacenar energía y poca conducción, contrario al hierro. La conducción térmica en sólidos se consigue principalmente por ondas reticulares de vibración que se transporta por medio de un flujo libre de electrones (Cengel *et al.*, 2019).

### 3.2.2. Transferencia por convección

En este modo de transferencia de energía se cuenta con una transferencia entre un medio sólido y otro líquido o gaseoso que se encuentran en movimiento y comprende el efecto combinados de conducción y movimiento de fluidos y es útil destacar que entre más rápido sea el movimiento, se obtendrá una mayor transferencia de energía térmica. En ausencia de movimiento la convección limita a una conducción de energía entre sistemas. La relación de la rapidez con la que se transfiere energía térmica por transferencia por convección se expresa mediante la Ley de Newton del enfriamiento en la Ecuación 15 (Cengel y Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{cv} = h \cdot A_S \cdot (T_S - T_\infty) \quad (15)$$

Donde:

$\dot{Q}_{cv}$  : Energía transferida por convección [W]

$h$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$A_S$  : Área de superficie de transferencia de calor [ $\text{m}^2$ ]

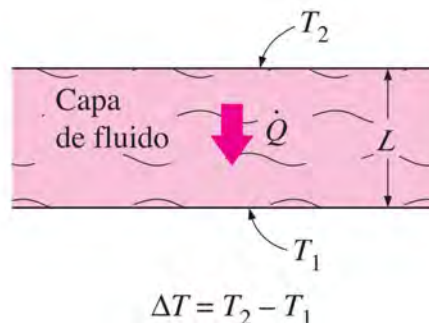
$T_S$  : Temperatura superficial [K]

$T_\infty$  : Temperatura bien alejada de la superficie [K]

Este modo de transferencia se presenta en dos subtipos según se fuerce o no el fluido a fluir alrededor de una superficie; se habla de convección forzada si medios externos fuerzan al fluido y convección natural no es forzado, en su lugar, el mo-

vimiento es causado por fuerzas naturales de empuje inducidas por diferencias de densidad debidas a los cambios de temperatura en el fluido (Cengel y Ghajar, 2011).

**Número de Nusselt (Nu):** con el fin de eliminar las dimensiones de la ecuación de transferencia de energía por convección y representar de manera más acertada la transferencia de calor a través de un fluido, se introduce el número adimensional de Nusselt que agrupa el coeficiente de transferencia por convección, la longitud característica y el coeficiente de conductividad térmica (Cengel y Ghajar, 2011). Como se observa en la Figura 3.42, la transferencia a través de la capa de un fluido será por medio del mecanismo de conducción cuando éste se mantenga inmóvil y por convección cuando presente algún tipo de movimiento. Como se observa en la Ecuación 17 si no existe movimiento y predomina el mecanismo de conducción y Nu disminuye, mientras que si existe mucho movimiento predomina el mecanismo de convección y Nu aumenta, aumentando la transferencia de energía.



**Figura 3.42.** Transferencia de energía a través de una capa de fluido de espesor  $L$  y diferencia de temperatura (Cengel y Ghajar, 2011).

$$\frac{\dot{Q}_{Cv}}{\dot{Q}_{Cond}} = \frac{h \cdot \Delta T}{k \cdot \Delta T / L} \quad (16)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (17)$$

Donde:

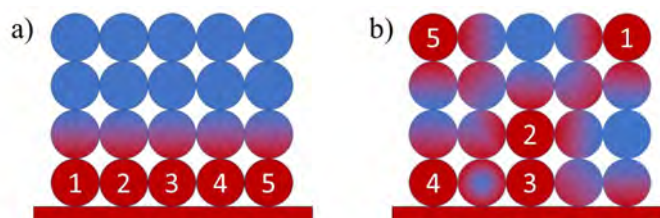
$Nu$  : Número de Nusselt [adim]



**Régimen de flujo de fluidos:** es importante reconocer la clasificación de los flujos de fluidos ya que la transferencia de calor está directamente relacionada con el comportamiento de los fluidos en reposo o movimiento y su interacción con las fronteras de otros sólidos o fluidos. En muchos problemas en los que se involucran fluidos se pueden atender con el reconocimiento del régimen de flujo en el que operan.

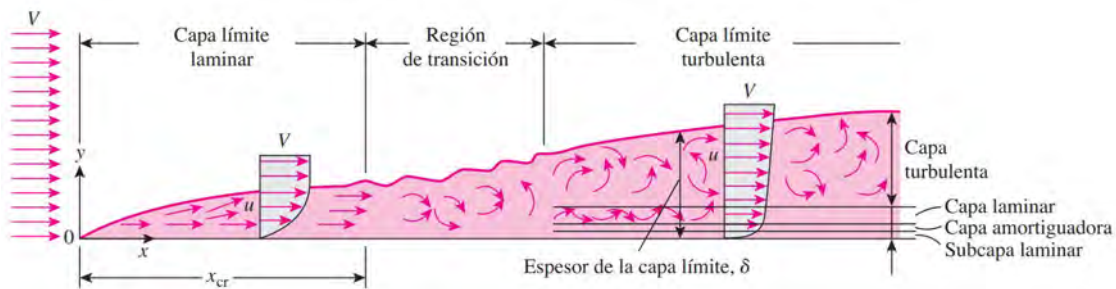
Cuando un fluido fluye intensamente ordenado en capas suaves y ordenadas se le conoce como flujo laminar, mientras que cuando su movimiento es caótico, caracterizado por fluctuaciones de velocidad se conoce como flujo turbulento. Debido a la fricción presente en las superficies por las que fluye un fluido, éste tiende a velocidades bajas hasta detenerse a una velocidad cero. Esta capa de fluido de velocidad cero genera un aislamiento entre la superficie caliente y el fluido de enfriamiento, ya que la capa en contacto con las paredes calientes adquiere energía que transmite a la siguiente capa por el mecanismo de conducción que es más lento que por conducción y así la conducción por la tubería se restringe al disminuir su gradiente de temperatura como fuerza impulsora del flujo de energía. Por lo tanto la transferencia de calor es mayor cuando el flujo se comporta de manera completamente turbulento (Cengel y Cimbala, 2018).

La representación de la transferencia de energía por el contacto entre partículas de fluido se observa en la Figura 3.43, donde el flujo turbulento provoca que las partículas se distribuyan por todo el flujo mejorando el intercambio energético entre ellas, mientras que para el flujo laminar se mantiene una capa fija que va transmitiendo el calor a las capas superiores, que además genera una especie de aislamiento debido a la baja difusividad térmica del agua.



**Figura 3.43.** Transferencia de energía en régimen a) laminar y b) turbulento (Cengel y Cimbala, 2018).

En la Figura 3.44 se muestra el flujo laminar y flujo turbulento de un fluido, se nota que en la sección turbulenta existen fluctuaciones aleatorias y rápidas llamadas remolinos proporcionando un mecanismo adicional de transferencia de energía. En la sección laminar se presenta un movimiento ordenado de las partículas del fluido por lo que la cantidad de movimiento y energía de ellas se transfieren entre capas por medio de difusión molecular, mientras que los torbellinos presentes en el flujo turbulento transportan masa, cantidad de movimiento y energía hacia otras regiones del fluido con una velocidad mayor a la de la simple difusividad logrando mejorar la transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía, esto hace que el flujo de calor sea mayor en el flujo turbulento que en el laminar (Mott *et al.*, 2015).



**Figura 3.44.** Desarrollo de capa límite (Cengel y Cimbala, 2018).

**Número de Reynolds ( $Re$ ):** representa adimensionalmente el régimen de flujo como una dependencia de la razón de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el fluido, se expresa como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (18)$$

Donde:

$Re$  : Número de Reynolds [adim]

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

$V$  : Velocidad del fluido [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$L_c$  : Longitud característica de una configuración geométrica [m]

$\mu$  : Viscosidad dinámica [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ]

Cuando un fluido presenta grandes fuerzas de inercia proporcionales a la densidad y a la velocidad del fluido en comparación con las fuerzas viscosas provocando fluctuaciones aleatorias y rápidas de los fluidos, representado por un número de Reynolds mayor a  $5 \cdot 10^5$  (flujo turbulento), mientras que para fuerzas viscosas grandes, las fluctuaciones son suprimidas y el fluido se mantiene alineado y se representa con números de Reynolds menores a  $5 \cdot 10^5$  (flujo laminar).

**Número de Prandtl ( $Pr$ ):** describe, mediante un número adimensional, el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmicas mediante la expresión de la Ecuación 19. Aquellos fluidos que difunden el calor con rapidez obtienen un  $Pr$  mayor que la unidad, mientras que aquellos que lo difunden con lentitud su  $Pr$  es menor que uno (Cengel y Ghajar, 2011).

$$Pr = \frac{\text{Difusividad de cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad térmica}} = \frac{\mu c}{k} \quad (19)$$

Donde:

$Pr$  : Número de Prandtl [adim]

**Coefficiente de transferencia de energía por convección:** se determina por medio de las relaciones de  $Nu, Pr$  y  $Re$ , suponiendo superficies isotérmicas y garantizando flujo turbulento, ya que como se mencionó anteriormente, corresponde al régimen que presenta mayor transferencia de energía. Se utiliza la siguiente expresión para obtener dicho coeficiente en la aplicación de superficies planas (Cengel y Ghajar, 2011):

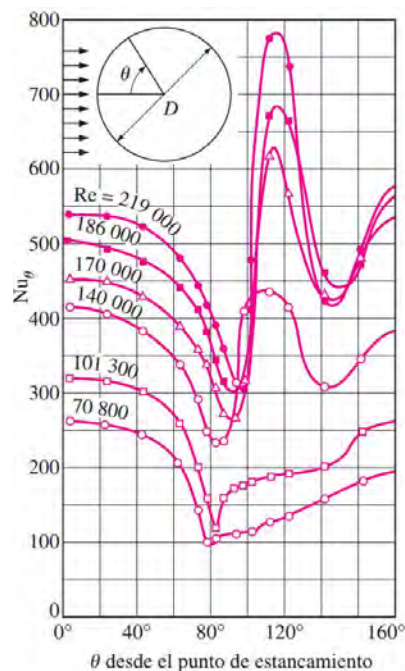
$$Nu = 0.0308 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (20)$$

El flujo alrededor de cilindros y esferas involucran la separación de flujos que provoca una transferencia de energía diferente en diferentes puntos de su superficie, por lo que se emplean modelos experimentales o numéricos para su análisis y así obtener correlaciones útiles para determinar el promedio del coeficiente de transfe-

rencia de calor por convección. Existen varias relaciones del número de Nusselt, en la Ecuación 21 se presenta la relación propuesta por Churchill y Bernstein (Cengel y Ghajar, 2011):

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}} \left( 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right)^{4/5} \quad (21)$$

La apreciación más importante que se observa en la Figura 3.45 es que a diferentes ángulos ( $\theta$ ) de la circunferencia del cilindro se obtiene una variación del coeficiente de transferencia de energía por convección, notando valores altos en el punto de estancamiento y luego disminuye al aumentar los valores de  $\theta$  debido al crecimiento de la capa límite de transferencia hasta un máximo donde se consigue una transición laminar a turbulenta en los costados de los cilindros (Cengel y Cimbala, 2018). Este fenómeno confirma la necesidad de garantizar el flujo turbulento en los aspersores de agua helada en tinas de enfriamiento en las aplicaciones de enfriamiento de tubería, para reducir los tiempos de retención de tubería y conseguir la transferencia térmica deseada, asegurando el aprovechamiento de la capacidad frigorífica del sistema de enfriamiento de una planta industrial.



**Figura 3.45.** Variación del coeficiente de Nusselt respecto al punto de contacto de una circunferencia de un cilindro circular (Cengel y Cimbala, 2018).

### 3.2.3. Transferencia por radiación

Este modo de transferencia de energía corresponde al mecanismo por el cual la energía es emitida en forma de ondas electromagnéticas desde un sistema que presenta cambios en las configuraciones electrónicas de sus átomos o moléculas, a diferencia de la conducción y convección, la radiación no requiere de un medio para propagarse y es el modo más rápido de transferencia de energía. Este modo se expresa por medio de la relación de la Ley de Stefan-Boltzmann en la Ecuación 22, donde la constante de Stefan-Boltzmann es  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  (Cengel y Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{Rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_S \cdot (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (22)$$

Donde:

$\dot{Q}_{Rad}$  : Energía transferida por radiación [W]

$\varepsilon$  : Emisividad de superficie [adim]

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]

**Temperatura de película promedio** En los diferentes mecanismos de transferencia de calor se utiliza la temperatura de película como una aproximación a la temperatura de un fluido en la capa límite de convección. Se calcula como se muestra en la Ecuación 23. Esta temperatura es una aproximación razonable debido a la variación de la temperatura que se utiliza para determinar las propiedades de los cuerpos involucrados en el intercambio calórico (Cengel y Cimbala, 2018).

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (23)$$

Donde:

$T_f$  : Temperatura de película promedio [K]

### 3.2.4. Resistencia térmica

La determinación de la tasa de transferencia de energía térmica puede ser resuelta con suficiente exactitud y precisión suponiendo condiciones estacionarias de

temperatura en el intercambio calórico que permiten la aplicación del concepto de resistencia térmica. Análogamente a la resistencia eléctrica en circuitos eléctricos, la resistencia térmica en intercambio calórico se refiere a la oposición del flujo de energía térmica en un cuerpo o entre cuerpos a diferentes temperaturas resultando en una velocidad de transferencia energética (Cengel y Cimbala, 2018).

La resistencia térmica total engloba la resistencia por conducción, convección y radiación, en el caso de transferencia que existan. Similar al procedimiento en circuitos eléctricos, se calcula una resistencia equivalente de acuerdo con la presencia de las resistencias, ya sea que se encuentren en paralelo o en serie (Blasco *et al.*, 2008). Para un conjunto de  $n$  resistencias encontradas en serie en un sistema se utiliza la siguiente relación:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (24)$$

Mientras que para el conjunto de resistencias encontradas en paralelo se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (25)$$

Donde:

$R_e$  Resistencia térmica equivalente de transferencia de energía [K/W]

$R$  Resistencia térmica de transferencia de energía [K/W]

El concepto de resistencia térmica permite evaluar la transferencia de calor de un sistema que involucra diferentes mecanismos de transferencia en el que todos son dependientes y su cálculo independiente no genera un resultado real de la tasa de transferencia de energía. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de transferencia como resultados independientes y en conjunto para demostrar la importancia de considerar los mecanismos de transferencia como conjunto y no por separado.

### 3.3. Unidades de Enfriamiento (*Chillers*)

Este tipo de equipos están diseñados para extraer energía térmica de un líquido refrigerante secundario mediante un ciclo de refrigeración, en el que un líquido refrigerante primario cambia de fase para llevar a cabo el proceso no espontáneo de conducir energía térmica de un sistema hacia otro con la misma o mayor temperatura mediante la aplicación de trabajo, lo cual se refleja al extraer la energía térmica del refrigerante y expulsarla al ambiente. El líquido secundario fluye a través de un intercambiador de calor, que se conoce como evaporador, donde se pone en contacto con el líquido refrigerante que absorbe su energía térmica que luego viaja a los condensadores para descargar dicha energía al ambiente. El líquido refrigerante secundario generalmente es agua y se conoce como agua helada, esta tiene numerosas aplicaciones en enfriamiento para procesos industriales, tales como: cuartos fríos, aires acondicionados, intercambiadores de calor y extractores de energía por contacto directo con productos terminados más calientes. Estos equipos se conocen como *Water Chiller* o solo *Chiller*. En la Figura 3.46 se observa el ciclo de refrigeración de un Chiller, en este el líquido primario se comprime y descomprime de modo que logra bajas temperaturas que luego absorbe energía del líquido secundario (Stanford, 2012).

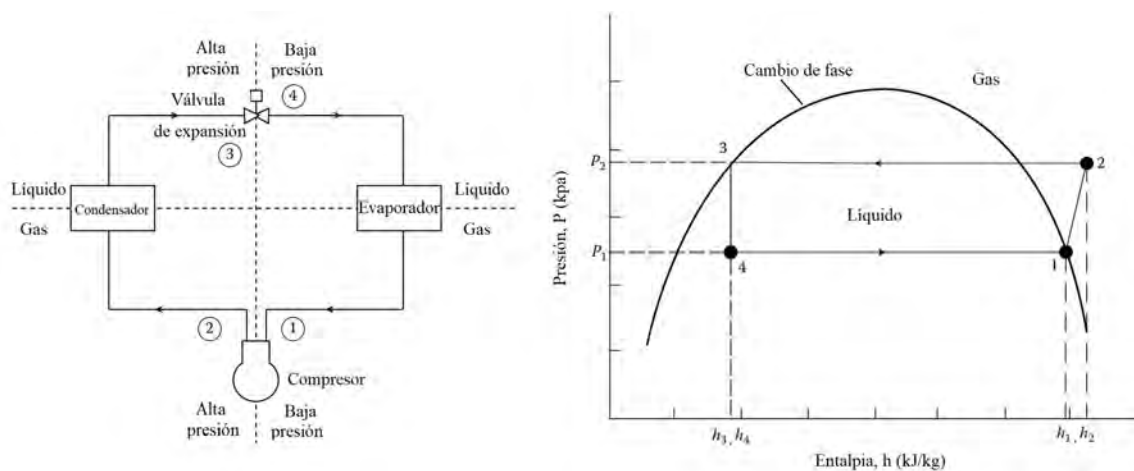


Figura 3.46. Ciclo de refrigeración en un Chiller (Stanford, 2012)

### 3.3.1. Capacidad frigorífica ( $C_f$ )

Constituye al calor capaz de remover un sistema de refrigeración y se expresa en toneladas de refrigeración; su origen parte de la cantidad de energía necesaria para fundir una tonelada métrica de hielo en un tiempo de 24 horas, dicha energía corresponde a 3.517 kW (1 ton = 3.517 kW). Es necesario conocer esta unidad de medida, ya que la mayoría de los fabricantes y distribuidores de equipos frigoríficos siguen especificando sus características en estas unidades (Buitrago *et al.*, 2014).

### 3.3.2. Cantidad de agua helada requerida

La extracción de la energía térmica en los procesos resulta en un incremento de temperatura del agua helada, el cual se requiere que se encuentre entre los (5-10) °C. Este incremento de temperatura y la cantidad de energía a extraer, establece la cantidad de agua helada requerida en el proceso mediante la siguiente relación (Stanford, 2012):

$$F_{aH} = \frac{\dot{Q}}{f_c \cdot R} \quad (26)$$

Donde:

$\dot{Q}$  : Transferencia de calor [W]

$F_{aH}$ : Flujo de agua helada requerida [L/min]

$f_c$  : Factor de conversión (250) [kJ · min/L · h · K]

$R$  : Incremento de temperatura del agua helada [K]

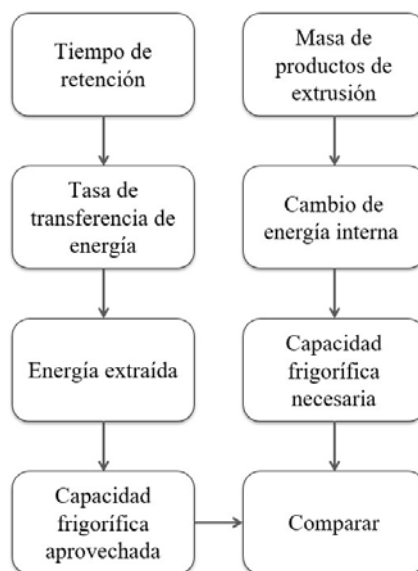
## 3.4. Eficiencia del sistema de refrigeración de Amanco-Wavin

Dentro de la estrategia de mejora de la competitividad y productividad de la empresa se identificó en las medidas de desempeño de la gestión que el retorno sobre la inversión está significativamente afectado por el costo de transformación, principalmente por los costos asociados al consumo energético en la planta de producción. Entre los componentes del consumo energético se encuentra el consumo



para la obtención de agua helada, por lo que se plantea una estrategia para mejorar su aprovechamiento y así lograr reducir su consumo energético.

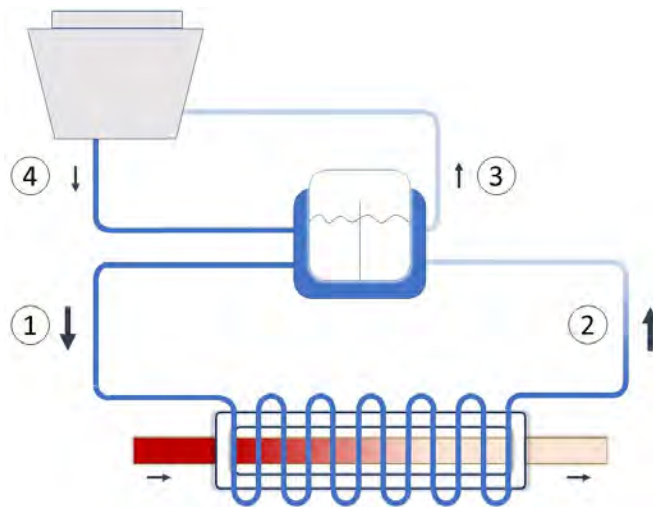
Se realiza un análisis de la capacidad frigorífica aprovechada para determinar la eficiencia del sistema de refrigeración de la planta. Para este análisis se sigue el esquema de la Figura 3.47. Para determinar la capacidad frigorífica aprovechada en los procesos de enfriamiento se obtienen los tiempos de retención de los productos en los sistemas de enfriamiento, se determina la tasa de transferencia total de energía para obtener los kW que se extraen de los productos en los tiempos que están en contacto los cuerpos, con esta información se determina la capacidad frigorífica aprovechada convirtiendo los kW a toneladas de refrigeración. Luego, se determina el cambio de energía interna de los productos a partir de las masas de los productos y así obtener una capacidad frigorífica necesaria en la planta para extraer la energía de los productos terminados. Estas dos capacidades (aprovechada y necesaria) se relaciona para determinar la eficiencia del sistema en utilizar la capacidad frigorífica disponible.



**Figura 3.47.** Esquema de análisis de eficiencia del sistema de refrigeración de la planta

En la Figura 3.48 se muestra un diagrama que representa el uso del agua helada en la planta de producción. En la etapa 1 de este circuito, el agua helada es distribuida a los diferentes procesos de enfriamiento en los equipos de extrusión en las que gana

calor sensible por parte de la energía interna de la tubería a enfriar y también absorbe energía del ambiente durante la distribución, esta ganancia de energía se refleja en un aumento de la temperatura del agua helada. Esta agua helada más caliente de cada proceso regresa al tanque de almacenamiento de aguas (2), para luego ser bombeada al Chiller (3), donde se vuelve a enfriar a la temperatura requerida por el proceso, mediante el intercambio calórico con el líquido primario de enfriamiento, luego esta nueva agua helada se reserva en un tanque de almacenamiento (4) que es bombeada nuevamente al proceso para las etapas de enfriamiento (1).



**Figura 3.48.** Circuito de refrigeración de la planta de producción de Amanco/Wavin

### 3.4.1. Capacidad frigorífica necesaria

La determinación de la capacidad frigorífica necesaria de la planta se analizó mediante la producción mensual promedio de cada uno de los productos del departamento de extrusión en el último año y así calcular la cantidad de energía térmica de intercambio requerida entre los productos terminados y el agua helada por medio del cambio en energía interna requerido por el PVC de acuerdo con la Ecuación 13.

La temperatura de transición vítrea del PVC es de (82-87) °C, por lo tanto, se procura reducir la temperatura de los productos de 200 °C a 45 °C, para reducir el riesgo de que los productos presenten deformaciones significativas al mantenerlos fuera del intervalo de temperaturas de moldeo. El calor específico del PVC se encuentra entre (0.90 y 0.97) kJ/(kg · K) por lo que se toma el valor mayor para cubrir

las diferencias que pueden existir en el material, además las pruebas históricas realizadas por la empresa de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) han reportado valores entre dicho intervalo reportado en la literatura por Wypich (2016).

En el Cuadro 3.8 se muestra la capacidad frigorífica requerida de la planta a partir de los datos de cambio de energía interna necesaria a extraer de los productos de la empresa.

**Cuadro 3.8.** Cambio de energía interna de los productos de extrusión y capacidad frigorífica del sistema de enfriamiento requerido.

Variable	Valor	Unidades
Masa total, $m$	1 477 569	kg
Cambio de energía interna total, $\Delta U$	222 152	MJ
Desviación, $SD_{\Delta U}$	3 780	MJ
Total, $E_T$	225 932	MJ
Capacidad Frigorífica, $C_f$	25	ton
Flujo agua helada, $F_{aH}$	181	L/min

Por lo tanto, se requiere una transferencia de 225 932 MJ de energía por mes, contemplando la desviación en la cantidad de energía, esta cantidad equivale a 87 kW (tomando  $3,86 \times 10^{-4}$  como factor de conversión de MJ/mes a kJ/s) que a su vez es equivalente a 25 toneladas de refrigeración. Por lo tanto es necesario contar con una unidad de enfriamiento de mínimo 25 ton, mientras que en la planta se cuenta con una unidad de enfriamiento de 44 ton, capaz de suministrar cerca de 155 kW, casi el doble de lo requerido.

Utilizando la Ecuación 26 se obtiene la cantidad de flujo volumétrico de agua helada requerida para conseguir la transferencia de energía calculada como se observa a continuación. Tomando 1.4 como factor de conversión de MJ/mes a kJ/h.

$$F_{aH} = \frac{225\,932 \cdot 1.4}{250 \cdot 7} = 181 \text{ L/min} \quad (27)$$

Es decir, es necesario contar con un equipo de refrigeración capaz de enfriar 1477 t mensuales de producto de extrusión, contando con 181 L/min para la transferencia de energía, que permita entregar una capacidad de refrigeración de 25 ton. El equipo de 44 ton instalado en la planta suministra 320 L/min (76 % sobredimensionado),

por lo que se considera suficiente para cubrir la demanda de la planta, sin embargo, es necesario analizar el aprovechamiento del uso de esta capacidad instalada para determinar su eficiencia.

### 3.4.2. Capacidad frigorífica aprovechada

La eficiencia del uso de la capacidad frigorífica de la planta se puede determinar mediante la comparación de la capacidad total de refrigeración con la capacidad realmente utilizada deseada para los productos en la planta, así reconocer si la capacidad con la que cuenta la planta es suficiente para conseguir el intercambio deseado, ya que es necesario contemplar el tiempo requerido de intercambio calórico que es limitado por el rendimiento de producción exigido por la productividad de la empresa. El uso ineficiente del uso de la capacidad frigorífica podría estar relacionado a desfases en los tiempos de retención y el flujo de los productos o también la eficiencia de la transferencia de la energía, mostrando la necesidad de requerir agua a menor temperatura o mayor flujo de recirculación.

**Transferencia de la energía térmica de los productos:** los cálculos de capacidad frigorífica tienen la desventaja de no contemplar el tiempo de contacto necesario para llevar a cabo la transferencia de energía entre el agua helada y la tubería, por esta razón, es necesario determinar la razón de transferencia de la energía térmica de la tubería al agua helada, ya que el intercambio de energía entre los cuerpos no ocurre instantáneamente, en su lugar, existe una cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo de acuerdo con la naturaleza de los cuerpos y el mecanismo de transferencia, por lo que es necesario determinar con qué rapidez se logra la transferencia de energía para determinar el tiempo de retención necesario al que se consigue el enfriamiento deseado en los productos de PVC. Dado el tiempo de retención se requerirá más o menos flujo de agua helada para conseguir la extracción de energía térmica de los productos terminados.

Para esto se realizan cálculos de transferencia de energía térmica por conducción y convección y se compara con el cálculo anterior de energía interna de los productos para determinar si el tiempo de contacto entre la tubería y el agua helada es adecuado

para llevar acabo el intercambio de energía.

**Transferencia por conducción:** la transferencia de calor del producto terminado para reducir su energía interna a valores que no comprometen significativamente su forma final se calcula como combinación de los mecanismos de transferencia por conducción y por convección. Se decide dejar de lado la transferencia por radiación ya que esta representa un fenómeno difícil de controlar en las diferentes condiciones de proceso en la etapa de enfriamiento, esta consideración permite sobrestimar la capacidad frigorífica requerida en el sistema ya que existe liberación de calor que no se está contemplando en el cálculo de la transferencia requerida.

Para el cálculo de la transferencia de calor para los productos cilíndricos, se utiliza la expresión de la Ley de Fourier que se muestra en la Ecuación 28, aplicada a un cilindro:

$$\dot{Q}_{Cond,cil} = -k \cdot A_{\perp} \cdot \frac{dT}{dr} \quad (28)$$

Donde:

$dT$  : Diferencial de temperatura [K]

$dr$  : Diferencial de radio de cilindro [m]

El área perpendicular al flujo de energía en un cilindro está dada por  $A_{\perp} = 2\pi rL$ . Por lo tanto, al sustituir en la Ecuación 28 y resolver la ecuación diferencial por el método de separación de variables se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{Cond,cil} = 2\pi Lk \cdot \frac{T_i - T_e}{\ln(r_{ext}/r_{int})} \quad (29)$$

Donde:

$r_{int}$  : Radio interno de cilindro [m]

$r_{ext}$  : Radio externo de cilindro [m]

$L$  : Longitud de cilindro [m]

$T_i$  : Temperatura interna [K]

$T_e$  : Temperatura externa [K]

Utilizando la relación de espesor diámetro nominal estándar con el SDR que se aplica para los productos de la empresa ( $r_e = r_i \cdot SDR / (SDR - 2)$ ), la expresión de transferencia por conducción para un cilindro queda de la siguiente manera:

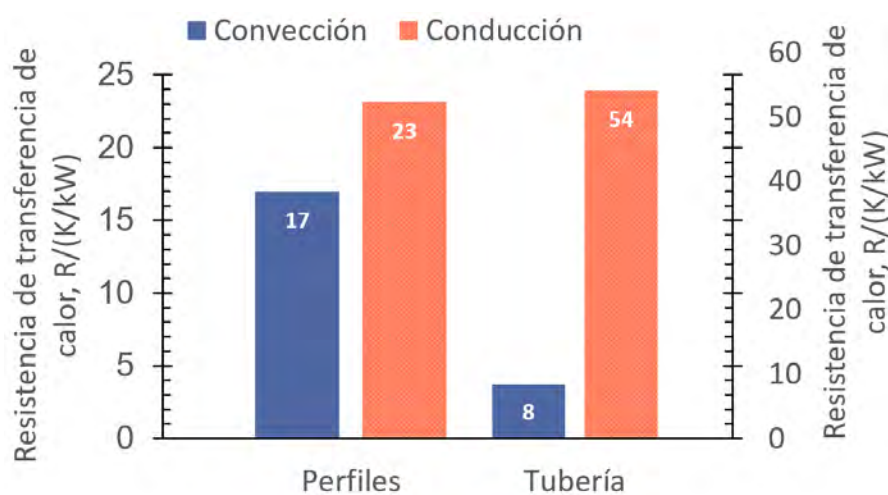
$$\dot{Q}_{Cond,cil} = 2\pi Lk \cdot \frac{T_i - T_e}{\ln\left(\frac{SDR}{SDR-2}\right)} \quad (30)$$

Se realiza el cálculo de la transferencia de energía térmica para los tubos cilíndricos que se fabrican en la empresa y se obtienen los resultados que se muestran en el Cuadro B.20. La tubería de PVC cuenta con diferentes espesores según sea la aplicación para la que se vaya utilizar según sea la resistencia necesaria. Estas diferencias en espesores provoca diferentes cantidades de energía que se logran transferir por segundo de la tubería al agua helada, siendo un factor sumamente importante a considerar ya que así debe configurarse las tinas de enfriamiento y el tiempo de retención de la tubería en esta, el PVC presenta una conductividad térmica de (0.13-0.17) W/(m · K), se toma el valor menor para sobrestimar la capacidad requerida. Para los productos de canoas y perfiles se utilizan tinas de sumersión, en las cuales se aumenta el área de transferencia de energía y se estima sumando el área de cada una de sus caras expuestas con las que cuentan los productos como canoas y Novaloc. A pesar de que exista mayor área de contacto para la transferencia de energía se debe asegurar el flujo turbulento para evitar que las capas laminares del flujo funcionen de aislantes por favorecer a la transferencia por conducción en lugar que por convección.

De los datos de producción de la empresa se toman los tiempos de procesamiento de cada producto para evaluar la cantidad de energía que logra extraerse con el sistema de refrigeración actual y así determinar la capacidad frigorífica que aprovecha el sistema para comparar con la capacidad total y calcular la eficiencia de su uso en el sistema de enfriamiento.

**Transferencia por convección:** la transferencia de calor por convección se calcula por medio de la Ecuación 15 para los diferentes productos que se fabrican en la empresa. Los productos presentan diferentes áreas superficiales que son necesarias a considerar para el cálculo de transferencia y baños de agua helada a diferentes veloci-

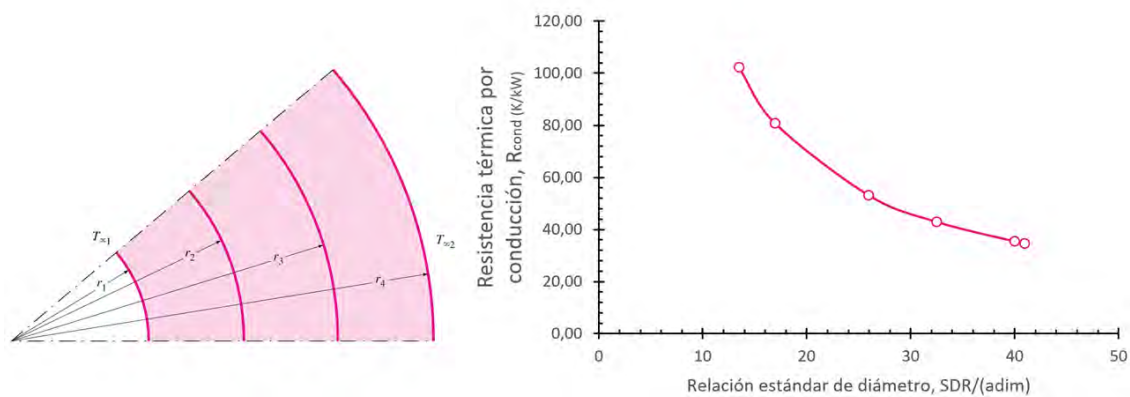
dades de flujo. El fluido de intercambio calórico es agua, la cual para las condiciones de temperatura de película promedio (112 °C), la cual consiste en el promedio de las temperaturas del flujo libre y de la superficie de la tubería. A esta temperatura se obtiene del agua una viscosidad dinámica  $\mu = 0.255 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ , una densidad  $\rho = 950.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ , un coeficiente de conductividad térmica  $k = 0.682 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  y un calor específico  $c = 4.185 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ .



**Figura 3.49.** Comparación de transferencia de energía por conducción y convección por los productos de extrusión.

Se puede observar en la Figura 3.49 el promedio de las resistencia por conducción y por convección para los productos de perfiles y tuberías en el departamento de extrusión, notando diferencias en las resistencias térmicas de transferencia de energía, esto demuestra que las dimensiones de los productos condicionan la configuración del sistema de enfriamiento para cada uno, como lo es el espesor de la tubería que provoca una mayor resistencia de conducción para tubería que para perfiles que cuentan con un espesor no mayor a 3 mm. La Figura 3.50 demuestra como la resistencia térmica aumenta con el incremento del espesor de los productos debido al aumento de la longitud que la energía térmica tiene que atravesar para difundirse en el fluido de enfriamiento en la superficie. La resistencia por conducción depende principalmente de los espesores de los productos, mientras que la resistencia por convección depende del número de Reynolds que se puede mejorar por medio de diferentes estrategias. De esta forma la mejor actuación es disminuir al máximo la

resistencia por convección y seguido mejorar el tiempo de exposición de los productos en las tinajas de enfriamiento, ya que el espesor de los productos no se puede variar. La única forma de mejorar el tiempo de retención de los productos es por medio de un aumento del largo de las tinajas de enfriamiento, ya que no es opción reducir el flujo másico de los productos porque afectaría los rendimientos del departamento.



**Figura 3.50.** Cambio en la resistencia térmica con el cambio en el espesor del producto.

A partir de la producción mensual se determina el tiempo de retención de los productos para extraer la energía interna necesaria, con esto se calcula si se está aprovechando la capacidad frigorífica de la empresa. Se observa en el Cuadro 3.9 que el sistema de enfriamiento apenas logra extraer el 30 % de energía, debido a que los productos permanecen menor tiempo en el sistema de enfriamiento del que deberían para lograr la transferencia de calor. Sin embargo, la empresa para lograr el enfriamiento deseado en los productos de extrusión cuenta con una mayor capacidad frigorífica que se mencionó anteriormente de cerca de 50 ton, lo que suministra un mayor flujo de agua helada para extraer la energía de los productos y conseguir una temperatura final de los productos deseada, esto mejora el régimen turbulento y por ende la transferencia de energía, por lo que se consigue un nuevo aprovechamiento de 50 %. El desaprovechamiento de capacidad frigorífica concuerda con los primeros hallazgos de desaprovechamiento del uso del agua helada, esta vuelve a bajas temperaturas al tanque de retorno y también condensa agua de la atmósfera en las tinajas de enfriamiento como evidencia que no se está aprovechando.



**Cuadro 3.9.** Aprovechamiento de la capacidad frigorífica de la planta.

Variable	Longitud característica, $L_c$ (m)		Unidades
	2	6	
Cambio de energía interna, $\Delta U$	72 144	237 203	MJ
Capacidad frigorífica, $C_f$	8	26	ton
Relación aprovechamiento	30	88	%

### 3.4.3. Aprovechamiento de la capacidad frigorífica

En la empresa se expresa la inquietud de que se está desaprovechando la capacidad frigorífica del agua helada de enfriamiento de los procesos, como evidencia se observa condensación de la humedad atmosférica en las paredes de las tinas de enfriamiento debido al agua utilizada para enfriar los productos, que en lugar de utilizarse en su mayoría para extraer energía interna de los productos, también está retirando energía del aire circundante que provoca que alcance su saturación en las paredes y así se note el punto de rocío como se observa en la Figura 3.51. Además, el agua helada de retorno mantiene una temperatura de 17 °C por lo que esa agua todavía puede estar siendo utilizada para extraer energía de la tubería. Los resultados obtenidos de los cálculos de transferencia de energía y energía interna que se realizaron demuestran que el tiempo de contacto entre la tubería y el agua helada en las tinas de enfriamiento es muy corto para la configuración existente y esto está provocando que se requiera un mayor flujo de agua para compensar el tiempo. Dado que no es factible reducir la cantidad de kilogramos por hora producidos para aumentar el tiempo de contacto, se debe garantizar un flujo en régimen turbulento para mejorar la transferencia de energía térmica y aumentar la longitud característica para aumentar el área de contacto.

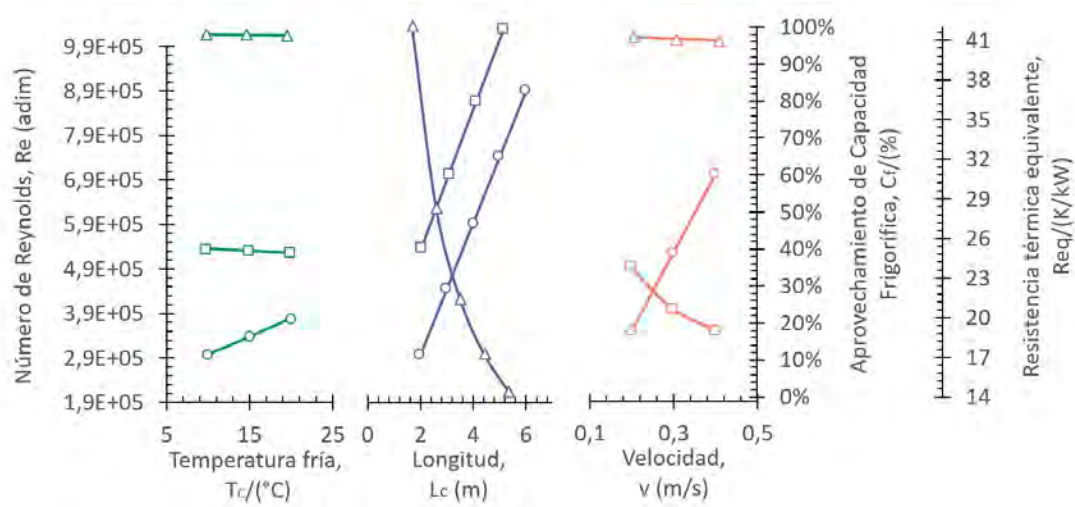
En la Figura 3.52 se observa la variación en factores que influyen en el enfriamiento de los productos de extrusión como la longitud característica de transferencia de energía, temperatura fría y velocidad del agua helada y la respuesta de estos factores en el número de Reynolds, aprovechamiento de capacidad frigorífica y resistencia térmica equivalente para predecir su efecto y determinar las mejores estrategias para mejorar la transferencia de energía en extrusión. Se puede observar que la tempera-



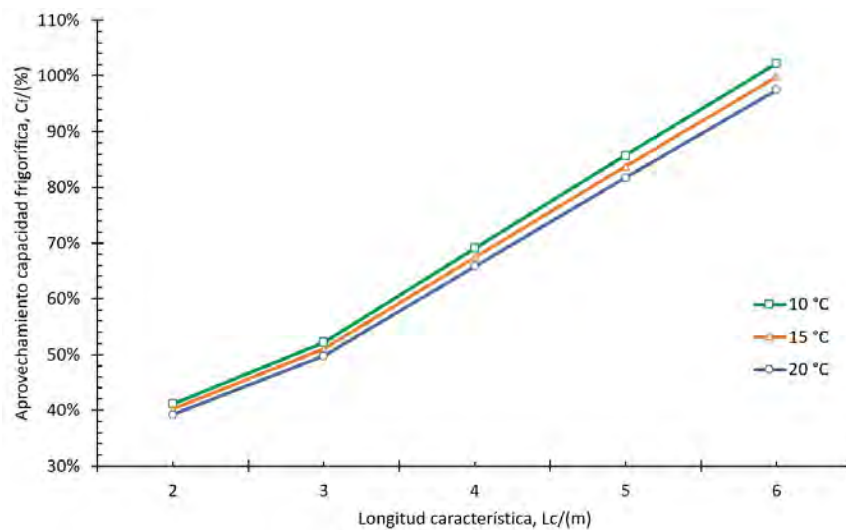
**Figura 3.51.** Condensación en las paredes de las tinas de enfriamiento.

tura fría del agua helada tiene poco efecto en las variables respuesta, mientras que la velocidad si presenta un mayor efecto, principalmente en el número de Reynolds, sin embargo se observa como el aprovechamiento disminuye, porque para aumentar la velocidad se requiere mayor flujo y mayor capacidad frigorífica para enfriar mayor cantidad de agua para dicho flujo, con esto se consigue disminuir la temperatura del producto final, sin embargo, se observa que la resistencia sigue siendo la misma. Por último, se observa que la mejor estrategia es aumentar la longitud característica de transferencia en la que se mejora el número de Reynolds, un mayor aprovechamiento de la capacidad frigorífica y una reducción de resistencia térmica equivalente significativa.

Entendido el comportamiento y efecto de los factores en las variables respuesta de interés se determinan las mejores condiciones para operar el sistema de enfriamiento. La temperatura no tiene un mayor efecto en la eficiencia de transferencia, por lo que se conseguiría una reducción en el consumo energético si la temperatura de agua helada no es fuera tan baja como  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  y se estableciera entre  $17$  o  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el factor más importante es la longitud característica, por lo que se estudia la longitud y temperatura que consiga el mayor aprovechamiento de la capacidad frigorífica necesaria para no tener que aumentar la capacidad instalada de refrigeración consiguiendo alto consumo y baja eficiencia.



**Figura 3.52.** Respuesta de la resistencia térmica equivalente ( $R_{eq}/\Delta$ ), aprovechamiento de capacidad frigorífica ( $C_f/\square$ ) y número de Reynolds ( $Re/\circ$ ) respecto al cambio la longitud de tina de enfriamiento ( $L_c$ ), en temperatura fría ( $T_C$ ) y velocidad de agua helada ( $v$ ).



**Figura 3.53.** Aprovechamiento de la capacidad frigorífica respecto a la longitud característica de transferencia de energía y a diferentes temperaturas frías de agua helada.

En la Figura 3.53 se observa que la temperatura no tiene una influencia significativa en el aprovechamiento de la capacidad frigorífica al variar las longitudes características. Se nota que variar la temperatura de 20 °C a 10 °C apenas se logra un 2% más de aprovechamiento de la capacidad frigorífica, por lo que se recomienda aumentar la longitud de las tinas de enfriamiento y además considerar aumentar la

temperatura de agua helada para conseguir una disminución del consumo energético, incluso valorar el uso de torre de enfriamiento para ciertos productos.

De esta manera se consigue un aprovechamiento de la capacidad de refrigeración del 83 %, ya que se consigue la temperatura final deseada de los productos, pero con una capacidad frigorífica instalada de 30 ton en lugar de las 25 ton calculadas para contemplar las pérdidas en distribución del agua helada. La iniciativa de aumentar la longitud característica no generaría altos costos, ya que las tinas de enfriamiento ya se encuentran instaladas, el único costo asociado sería volver a habilitar su funcionamiento.

#### **3.4.4. Circuito de enfriamiento en TS-108.**

Al aumentar la longitud característica de enfriamiento se requiere habilitar las tinas de enfriamiento de sistema de extrusión por lo que además requiere de un circuito de recirculación de agua helada en la tina de enfriamiento de las equipos para aprovechar la capacidad frigorífica del agua helada al máximo antes de que vuelva a los tanques de almacenamiento de recirculación. Para esto se utilizan accesorios que ya se encontraban en la bodega de repuestos de la planta que contaban con una valoración interna del departamento de mantenimiento en cuanto a resistencia a corrosión, a las presiones, temperaturas de trabajo y dimensiones necesarias para los flujos de proceso, la lista se muestra en el Cuadro 3.10 con los costos con los que se encuentran valorados en bodega. En la Ecuación 26 se puede observar que la cantidad de agua necesaria para el proceso es inversamente proporcional al incremento de temperatura para el agua helada del proceso, por lo tanto, el sistema requerirá menor cantidad de agua si se garantiza una temperatura de retorno de por lo menos 8 °C, lo cual propone ahorros en bombeo y enfriamiento, para garantizar esta temperatura de retorno se requiere aumentar el área de contacto entre sistemas. Por esta razón, se evalúa la instalación de un circuito de recirculación en la tina de enfriamiento del equipo TS-108 para aumentar el tiempo de contacto entre el agua helada y la tubería.

En la Figura 3.54 se observa el circuito instalado para mejorar la distribución de agua en las tinas de enfriamiento.

**Cuadro 3.10.** Accesorios utilizados para el circuito de recirculación en el equipo TS-108.

Accesorio	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
Tubería (3 m; 2")	1	17 518	17 518
Válvula de bola	3	13 254	39 762
Válvula Solenoide	5	16 378	81 890
Termopar	2	7 265	14 530
Boya de nivel	1	3 250	3 250
Filtro	2	12 365	24 730
Codos	10	1 784	17 840
Manómetro	2	8 765	17 530
Unión Flexible	2	6 325	12 650
Manguera	1	17 500	17 500
Bomba agua	1	32 500	32 500



**Figura 3.54.** Circuito de recirculación propuesto para agua helada.



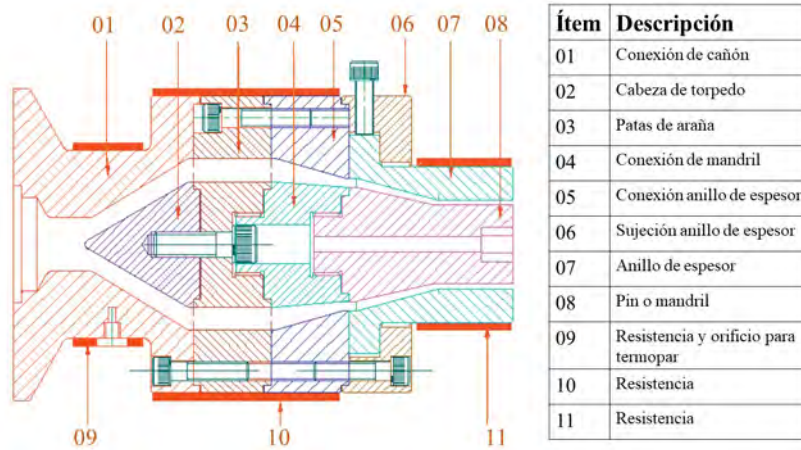
## CAPÍTULO IV: Cabezal de Extrusión

El cabezal de extrusión corresponde a una de las secciones más importantes del equipo de extrusión. Su importancia radica en que es el encargado de recibir el material fundido del cañón de extrusión y brindarle la forma final a los productos plásticos. Es importante reconocer que en el cabezal de extrusión, las propiedades del material fundido influyen en su comportamiento durante el flujo a través de él, estas propiedades se resumen en propiedades reológicas y propiedades termodinámicas de la mezcla de material, las cuales provocan un comportamiento específico de acuerdo con la geometría interna del cabezal, variaciones de temperatura dentro del cabezal, la pérdida de presión, el perfil de velocidad y los esfuerzos cortantes. Seguido del cabezal continúa una calibración, un enfriamiento, jalado y corte de los productos que finalizan la obtención de los productos finales que dependen del diseño del cabezal, por lo que el cabezal es la unidad crítica para la forma final de la tubería y es importante reconocer sus especificaciones que logren un diseño adecuado para obtener productos conformes a partir de él (Kainth, 2018).

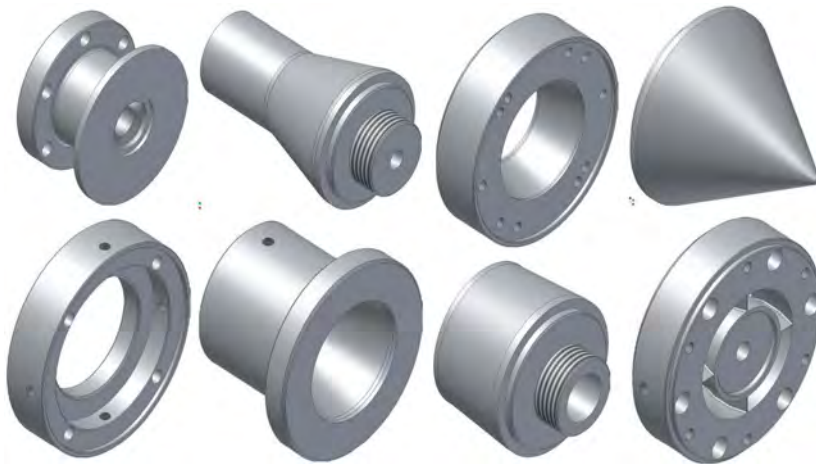
### 4.1. Cabezal patas de araña

El cabezal más comúnmente utilizado en los procesos de extrusión es el cabezal patas de araña y en especial para los procesos de PVC; un modelo de este cabezal se muestra en la Figura 4.56. Antes del ingreso al cabezal el material fluye por un anillo rompedor que elimina la dirección con la que fluye el material por el cañón de extrusión y de esta forma se consigue eliminar las orientaciones definidas del material producto de este giro en el cañón. Seguido, el material ingresa a un torpedo que lo distribuye en una forma anular para formar la tubería. Esta distribución anular atraviesa unos soportes que se conocen como patas de araña que sujetan el torpedo dentro del cabezal, estas pueden ser entre 4 o 8 patas según sea el tamaño del cabezal, su forma divergente en el inicio y luego convergente para que el material vuelva unirse con facilidad y a la vez genera un efecto adicional de interrupción de la orientación del plástico fundido hasta llegar al pin o mandril y el anillo de espesor que establecen el diámetro interno (PIN) y externo (DADO) deseados de la tubería.

Además, el cabezal posee resistencias de calentamiento en su superficie que permiten mantener el flujo del material a la temperatura adecuada (Kainth, 2018).



**Figura 4.55.** Cabezal tipo patas de araña 2D y 3D (Kainth, 2018).



**Figura 4.56.** Cabezal tipo patas de araña 3D seccionado (Kainth, 2018).

#### 4.1.1. Pin del cabezal

Esta parte define el diámetro interno de la tubería a fabricar y posee tres secciones importantes, dos de ellas se diseñan en conjunto con el dado del cabezal que corresponden a la zona de convergencia y planchado del material, uno define el diámetro interno y el otro el externo obteniendo así el espesor requerido de la tubería por lo que son importantes para la geometría final del producto. La tercera sección



es la espiga roscada de la pieza que permite conectar el pin con la conexión de pin y completar el torpedo del cabezal. Esta sección es la más importante del cabezal, ya que no es suficiente con simplemente dejar un espacio libre para que el material fluya, su diseño involucra la necesidad de recopilar y analizar información del producto, los materiales a procesar, el equipo instalado, entre otros que influyen en el diseño del cabezal (Kainth, 2018).

#### 4.1.2. Dado del cabezal

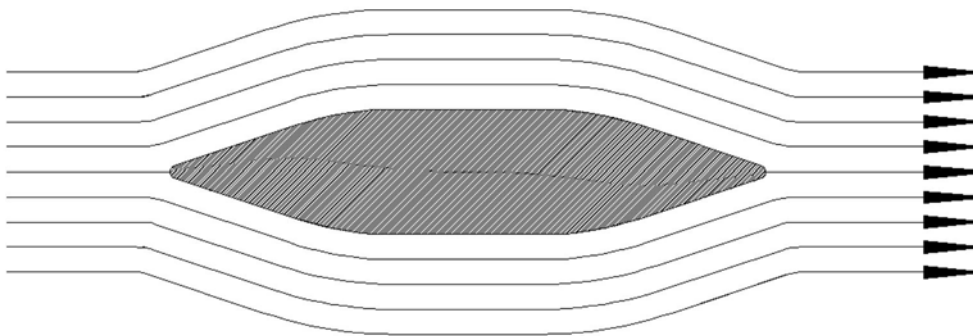
Esta parte corresponde en la sección externa del cabezal que define el diámetro final de la tubería extruida y por tanto, su espesor. En esta parte se encuentran dos secciones importantes en el diseño de cabezales: convergencia y planchado, las cuales se diseñan en conjunto con las secciones de convergencia y planchado del pin del cabezal. La sección de convergencia dentro del cabezal dirige el plástico fundido desde la conexión de mandril con las patas de araña hasta la zona de planchado donde se le brinda a la tubería el espesor deseado según las especificaciones de los clientes. El dado cuenta con resistencias de calentamiento que permite el flujo constante del material fundido evitando estancamientos y exceso de esfuerzos mecánicos (Kainth, 2018).

**Relación de reducción:** generalmente el dado y el pin del cabezal se diseñan con un tamaño menor al de las especificaciones de la tubería a procesar, esto se debe a que su material sufre una expansión debido al calentamiento por las resistencias para el flujo del plástico fundido, posteriormente también se involucran otros efectos por parte del vacío en el calibrador, la tina de enfriamiento, el efecto de la jaladora y el encogimiento natural de los polímeros que afectan las dimensiones finales del producto.

#### 4.1.3. Patas de araña

Las patas de araña corresponde a la parte central que mantiene todo el torpedo en su posición para que consiga una adecuada distribución de material fundido para formar la tubería deseada. Se conoce como patas de araña por sus secciones

de soporte que unen el torpedo con el cabezal, su forma divergente y convergente permiten que el fluido fundido se divida y se vuelva a unir sin complicaciones; este flujo se observa en la Figura 4.57. El canal libre entre el torpedo y el cabezal se diseña con base en el flujo de material requerido de la producción, relacionado con la facilidad de producción y el tiempo adecuado de residencia dentro del cabezal. Los espacios estrechos provocan aumento de presión, para evitar degradación del material y fracturas en el cabezal (Kainth, 2018).



**Figura 4.57.** Flujo alrededor de las patas de araña de cabezal (Kainth, 2018).

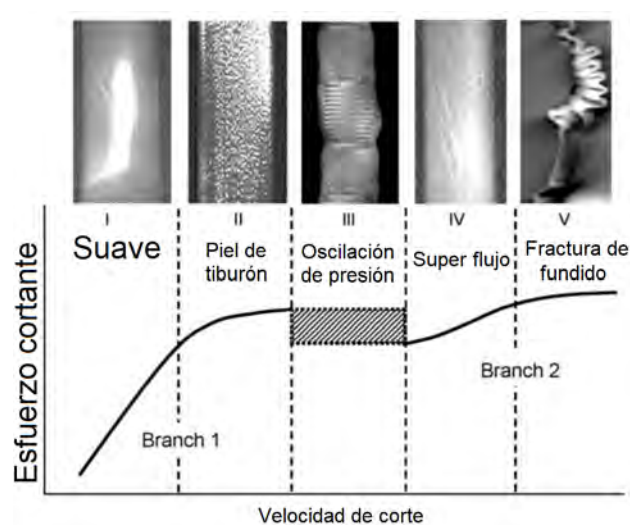
## 4.2. Diseño de cabezal

En el diseño de cabezales de extrusión se requiere de información amplia y clara sobre la naturaleza del producto a trabajar, el material y los equipos utilizados, permitiendo establecer el rango de productos similares capaces de producir. De esta forma se define el tipo de cabezal diseñado, los materiales procesados y requerimientos de los equipos para utilizarlos, también los kilogramos por hora del equipo de extrusión o las tinas de enfriamiento de dimensiones adecuadas para dimensiones menores o mayores de tubería producida (Kainth, 2018).

### 4.2.1. Productos

En el diseño del cabezal es importante definir el rango de tuberías que se procesarán con él, por ejemplo, los diámetros y espesores específicos. Algunos productos requieren recubrimientos adicionales, multicapas o detalles específicos que hacen necesario adaptaciones en el cabezal para conseguirlo. Es decir, un cabezal diseñado

para diámetros de 100 mm, es capaz de producir tubería de (50-125) mm, pero no es capaz de producir tubería de 10 mm o 200 mm sin sacrificar cualidades de la tubería debido al tiempo de residencia, esfuerzos cortantes, velocidad de corte de material, la caída de presión, la compresión del material provocado por especificaciones de los ángulos del pin y del dado. Por ejemplo, utilizar un cabezal diseñado para diámetros pequeños para fabricar diámetros grandes provoca el estancamiento de material en el cabezal, así un aumento del tiempo de residencia, pequeños valores de tasa de cizalladura, altos valores de esfuerzo cortante y alta presión de material debido a la pequeña área de flujo, pudiendo provocar degradación en los materiales o deformaciones. Específicamente para el PVC la degradación provoca la formación de gases tóxicos que dañan el ambiente e inclusive el cabezal, además, altos valores de esfuerzo cortante genera fracturas del material fundido que se puede reflejar como un efecto de *piel de tiburón* en el producto terminado (Kainth, 2018). El efecto de *piel de tiburón* se puede observar en la Figura 4.58



**Figura 4.58.** Efectos de los esfuerzos cortantes en la apariencia de plástico fundido (Agassant *et al.*, 2006).

Entre las características del cabezal que varían con el rango de productos a procesar se encuentran la geometría del dado y el pin, las características del material fundido, la capacidad instalada y el costo de fabricación del cabezal. Estas variables se deben considerar mediante un análisis costo beneficio para diseñar los cabezales necesarios para los productos (Almeida *et al.*, 2006).

#### 4.2.2. Espesor de pared

Además de considerar los diámetros mínimos y máximos que un cabezal es capaz de producir, también se cuenta con el espesor de pared de las tuberías para determinar los cálculos de salida del material, su tiempo de retención, tiempo y geometrías del pin y dado (Kainth, 2018).

#### 4.2.3. Propiedades del Material

Debido a las diferentes condiciones que se pueden presentar dentro de un cabezal para el material que fluye en su interior, es importante considerar la información de las propiedades de este material a procesar, ya que un cabezal no necesariamente es útil para cualquier tipo de material por los diferentes efectos mencionados de esfuerzos mecánicos y sobrecalentamiento del material que puede llegar a descomponerse. Algunos materiales requieren de largas secciones de relajación después de las patas de araña que permita nuevamente la unión del material distribuido. De esta forma se diseña un cabezal capaz de procesar distintos tipos de material de acuerdo con las limitaciones reológicas y termodinámicas de los materiales. Para esto se utiliza la información entregada por el fabricante y de resultados de ensayos en laboratorio para determinar las mejores condiciones en que cada material puede ser procesado y conseguir mejores resultados de manufactura (Kainth, 2018).

**Información Reológica:** el estudio de la elasticidad, viscosidad y plasticidad son parte de la información reológica de particular importancia para definir las características de diseño del cabezal. Datos sobre elasticidad de acuerdo con la ley de Hooke, describen el comportamiento de deformación del material debido al esfuerzo cortante. La información sobre viscosidad derivada de la ley de Newton, describe el mismo comportamiento para el caso de fluidos. Estas propiedades evidencian la importancia de análisis reológicos de las mezclas a procesar para evitar productos defectuosos por desconocimiento de la naturaleza de las materias a utilizar (Almeida *et al.*, 2006).

#### 4.2.4. Equipo disponible

Es importante considerar que el equipo con el que se cuenta para la extrusión de tubería sea capaz de entregar el material requerido para el cabezal a diseñar y pueda también recibir el material que se obtiene de él, de otro modo, el cabezal no será adecuado para la aplicación a la que se pretende trabajar y diseñaría un cabezal inutilizable. Entre las consideraciones de equipo necesarias para el diseño de cabezal se encuentra el extrusor, calibrador, tinas de enfriamiento, jalador, estación de corte, carrete de enrollado, entre otros (Kainth, 2018).

**Extrusor:** entre las características más importantes con las que es necesario contar son:

- Relación de longitud diámetro ( $L/D$ ), la razón de compresión, entre otras.
- Tipo de tornillo de extrusión, ya sea monohusillo o gemelo.
- Rendimiento de kilogramos por hora.
- Zonas de calentamiento.
- Capacidad de sujeción de cabezales.
- Anillo rompedor de dirección de flujo.

**Calibrador:** generalmente el calibrador de extrusión es diseñado en conjunto con el cabezal, sin embargo, para casos en los que ya existe el calibrador es necesario conocer sus características de modo que sea compatible con el nuevo cabezal, el tamaño y el rendimiento de extrusión.

**Tinas de enfriamiento:** las dimensiones de las tinas de enfriamiento se consideran para contar con la concepción clara de la capacidad frigorífica máxima y mínima con la que se cuenta para el tamaño de la tubería a procesar en el equipo para el cual se diseña el cabezal, ya que la capacidad frigorífica disponible limita la capacidad de rendimiento de un equipo.

**Jaladora, estación de corte y enrollador:** estas etapas del proceso de extrusión limitan el tamaño del producto a conseguir en un equipo, por lo que también se debe considerar para no diseñar partes de extrusión que no se logren utilizar o genere productos no conformes.

### 4.3. Diseño ideal de cabezal para el producto Presión Blanco

Como ya se explicó el primer paso de diseño de un cabezal corresponde a definir las características del producto final, los materiales a utilizar, su información reológica, información termodinámica, detalles de extrusor, características del calibrador, dimensiones y capacidad frigorífica en la tina de enfriamiento, la jaladora, estación de corte y enrollador, por lo que estas características se muestran en el Cuadro 4.11 como resumen de estas características para el producto Presión Blanco. Se pretende diseñar el cabezal ideal para este producto y atender las diferencias con el existente como mejoras para conseguir mayores rendimientos del producto terminado manteniendo una apariencia interna conforme.

Las partes críticas de un cabezal corresponden al dado y al pin, ya que en esta sección el material se une nuevamente por completo eliminando las marcas de fluido que puedan permanecer en el material fundido al atravesar las patas de araña. Por lo tanto, el análisis de cabezal se centra en esta sección describiendo el “*die land*” o planchado de las paredes del producto que mejoran la apariencia de superficies (Almeida *et al.*, 2006).

Para el diseño de esta sección es importante tomar en cuenta que el pin y el dado que forma la parte interior y exterior de la tubería respectivamente, no se diseñan con las mismas dimensiones que las deseadas debido a que el material sufre un hinchamiento por el calentamiento; además, la tubería después de salir del cabezal es expuesto a diferentes factores que influyen en su hinchamiento y encogimiento como el jalador, el enfriamiento y el vacío en el calibrador, por lo que debe considerarse un balance de relación de reducción (DRB) que relaciona las secciones transversales entre el anillo del dado y pin y el anillo de la tubería fabricada. Según la literatura es común utilizar valores de 1. Ambos anillos también se relacionan por medio de la relación de reducción (DDR), la cual se genera a partir de experimentación del

**Cuadro 4.11.** Resumen de información requerida para diseño de cabezal.

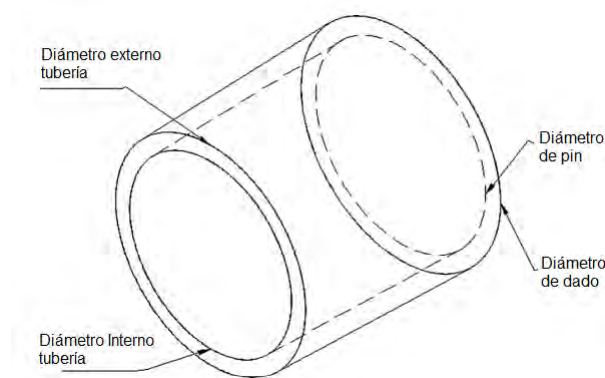
Consideraciones	Información
Producto	Tubería para presión
Diámetro	152.4 mm
SDR	17
Material	Mezcla de tubería para presión PVC
Información Reológica	Información de Brabender
Momento de torsión final de flujo	17 Nm
Temperatura final de flujo	200 °C
Información Termodinámica	Información de Literatura
Densidad de material	1 373 kg/m <sup>2</sup>
Capacidad calorífica	0.97 kJ/(kg · K)
Información de extrusor	
Tipo de tornillo	Tornillo gemelo
Diámetro de tornillo	108 mm
Rendimiento de extrusión	540 kg/h
Tinas de enfriamiento	(6 000×500 × 500)mm
Otra información	
Capacidad frigorífica máx	30 ton
Jaladora, calibrador, estación de corte y enrollador	Capaces de procesar la tubería a fabricar

comportamiento de hinchamiento y encogimiento de los materiales. En la Figura 4.59 se muestra la relación entre los diámetros internos y externos del dado y pin, y tubería.

#### 4.3.1. Balance de relación de reducción (DRB)

Esta relación entre el espesor de tubería y el anillo de dado y pin considera las diferencias de la velocidad del fundido en la superficie interior del dado y exterior del pin debido a la geometría en la sección cónica dentro del cabezal. Esta relación está dada por la Ecuación 31.

$$DRB = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{d_1}{d_2} \quad (31)$$



**Figura 4.59.** Relaciones de dimensiones de tubería, pin y dado (Kainth, 2018)

Donde,

$DRB$  : Balance de relación de reducción [adim]

$D_1$  : Diámetro interior del dado [mm]

$D_2$  : Diámetro exterior del pin [mm]

$d_2$  : Diámetro exterior de la tubería [mm]

$d_1$  : Diámetro interior de la tubería [mm]

Generalmente, un valor de DRB igual a 1 es satisfactorio debido a que la relación de diámetros de los anillos debería ser la misma de acuerdo con el SDR utilizado, en ocasiones que el DRB es mayor que la unidad se debe a una predicción de hinchamiento del material por lo que el anillo transversal entre el dado y el pin se diseña menor al anillo de la tubería y en el caso contrario que se espere una contracción el anillo dado-pin se diseña mayor.

#### 4.3.2. Relación de reducción (DDR)

Esta relación compara las secciones transversales del dado-pin y la tubería considerando las propiedades de elongación de los materiales utilizados y también que la apertura no genere una caída de presión importante y tampoco aumente los esfuerzos cortantes del material en esta sección. Por ejemplo, el PVC presenta un menor encogimiento que las poliamidas, debido a que el PVC es más rígido, por esta razón la relación de las poliamidas es 4 veces mayor que la del PVC. Para el PVC se reporta un valor de 5 %. La relación DDR se muestra en la Ecuación 32.



$$DDR = \frac{D_1^2 - D_2^2}{d_1^2 - d_2^2} \quad (32)$$

Donde,

$DDR$ : Relación de reducción [adim]

El producto Presión Blanco posee un diámetro exterior de 152.4 mm y SDR 17, por lo cuál el diámetro interno es 134.5 mm, con esto se requiere una relación de reducción y balance de relación como se muestra en la Ecuación 34.

$$DRB = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{d_1}{d_2} = \frac{D_1}{D_2} \times \frac{152.4}{134.5} = 1.00 \quad (33)$$

$$DDR = \frac{D_1^2 - D_2^2}{d_1^2 - d_2^2} = \frac{134.5^2 - 152.4^2}{d_1^2 - d_2^2} = 1.05 \quad (34)$$

De estas dos ecuaciones se obtiene las dimensiones para los diámetros del dado y del pin teóricos para procesar el producto Presión Blanco que se muestran en el Cuadro 4.12.

**Cuadro 4.12.** Dimensiones de dado y pin para procesamiento del producto Presión Blanco.

Dimensión	Valor
Diámetro interior del dado, $D_1$ /(mm)	156.2
Diámetro exterior del pin, $D_2$ /(mm)	137.8
Diámetro exterior de la tubería, $d_1$ /(mm)	152.4
Diámetro interior de la tubería, $d_2$ /(mm)	134.5

### 4.3.3. Die land o planchado

En la Figura 4.60 se observa la zona de planchado de tubería, esta sección corresponde a la abertura paralela entre el dado y el pin al final del cabezal que brinda la forma y apariencia final al producto extruido. Técnicamente se recomienda que posee una longitud de 10 a 30 veces la abertura del anillo dado-pin, una longitud mayor provoca mayores caídas de presión e incremento del tiempo de residencia del

material fundido que puede generar descomposición o decoloración; el efecto contrario se consigue si se disminuye esta longitud. En algunas ocasiones la zona de planchado es manipulada para corregir discrepancias de diseño para los productos que provocan distribución no uniforme de material. Sin embargo, se tiene que tener presente que entre mayor longitud de esta zona la caída de presión es mayor aumentando los esfuerzos cortantes del material fundido que pueden provocar fracturas o una apariencia de *piel de tiburón* (Kainth, 2018).

Por lo tanto, para el diseño de cabezal para el producto Presión Blanco se tiene una abertura de  $(156.2-137.8)/2 = 9.17$  mm por lo que la zona de planchado debe tener una distancia entre  $(91.7-275.1)$  mm, puede elegirse la menor para ahorrar costos de materiales por lo que se define en 95.0 mm.

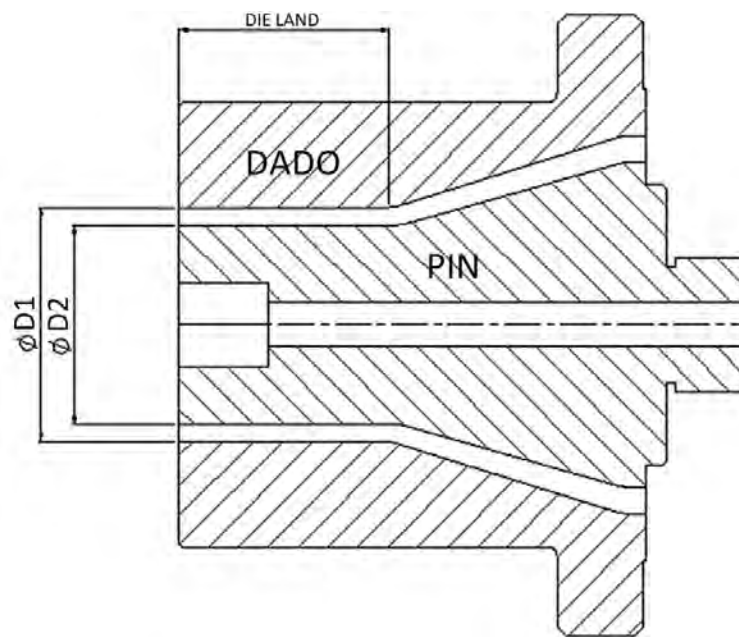
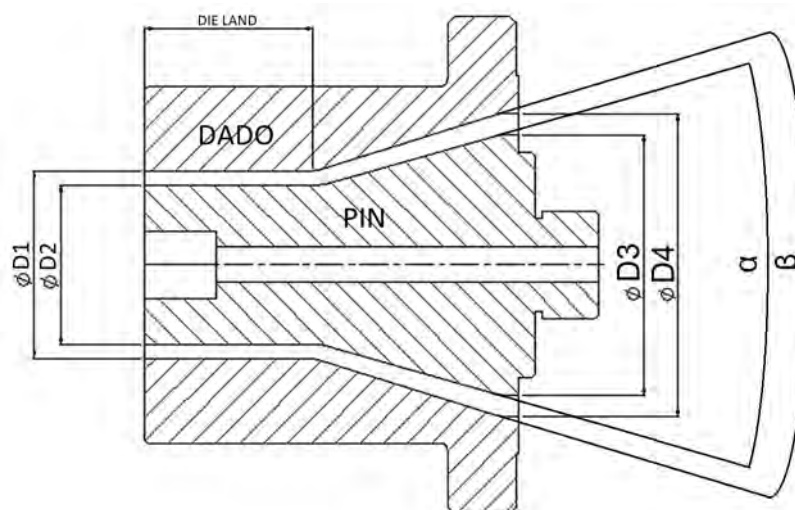


Figura 4.60. Sección dado y pin del cabezal (Kainth, 2018)

#### 4.3.4. Sección de convergencia

La última característica de diseño para el dado-pin es la sección de convergencia que corresponde a la sección donde se conecta el material fundido del mandril posterior en el cabezal y la zona de planchado. Esta sección resulta ser una de las más importantes debido a que brinda una transición preferiblemente suave entre las

partes, pasando de un diámetro mayor de anillo al diámetro de anillo final, para evitar tensiones en el producto final. El diámetro de la sección de convergencia se diseña 1.5 a 2 veces más grande que el diámetro de la sección de planchado y una apertura inicial de 1.5 a 3 veces mayor, utilizando ángulos de convergencia de entre 30 y 60 (Kainth, 2018).



**Figura 4.61.** Sección de convergencia de dado-pin (Kainth, 2018).

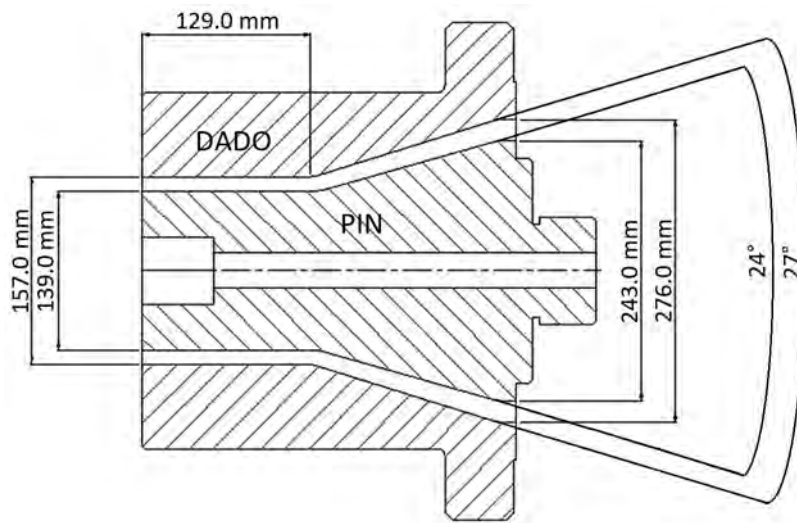
Para el producto Presión Blanco se diseña una sección de convergencia con una apertura en el inicio de 1.5 veces la apertura final del cabezal ( $156.2-137.8 = 18.4$ ), resultando 29.4 mm, el diámetro interno del cabezal y externo del pin se consiguen al multiplicar los diámetros de la zona de planchado por 1.6 y se obtiene respectivamente 249.9 mm y 220.5 mm.

#### 4.4. Dimensionamiento de cabezal actual para el producto Presión Blanco en Amanco/Wavin

Para responder a una de las posibles causas raíz de la oportunidad de mejora en los indicadores financiero y operacional, se evalúa el diseño actual del cabezal con el cual se produce el producto Presión Blanco en comparación con un diseño ideal para las características deseadas del producto terminado. En el gráfico de Pareto realizado para determinar el producto con mayor desperdicio en la planta que influye significativamente en los indicadores de desempeño, se muestra el producto Presión

Blanco y entre las estrategias que pueden mejorar este producto y así los indicadores, se considera la modificación del cabezal de extrusión para fabricar este producto.

Se realiza un dibujo técnico de las dimensiones del cabezal actual que se muestra en la Figura 4.62 para evaluar si corresponden a las recomendadas por la teoría al considerar las características del material fundido; las especificaciones se resumen en el Cuadro 4.13.



**Figura 4.62.** Dimensiones de cabezal actual utilizado para producto Presión Blanco.

En el Cuadro 4.13 se muestra el diseño teórico, el diseño actual del cabezal y el rango recomendado por la literatura.

#### 4.5. Modificación de cabezal actual

Con el diseño actual y el diseño ideal para el cabezal para producto Presión Blanco se puede observar que existen diferencias en los ángulos de convergencia que no se encuentran dentro de los rangos aceptables y además la longitud de planchado está cerca del mínimo con posibilidad de aumentarse para incrementar el tiempo de residencia. Es importante considerar que la diferencia con otras formulaciones con los mismos diámetros que trabajan bien en el equipo es la formulación y observando la respuesta reológica de la fórmula en el capítulo 2, los esfuerzos cortantes podrían estar afectando la apariencia interna del producto.

**Cuadro 4.13.** Dimensiones de dado y pin para procesamiento del producto Presión Blanco.

Dimensión	Teórico	Actual	Rango
Diámetro interior del dado, $D_1$ /(mm)	156.2	157.0	N/A
Diámetro exterior del pin, $D_2$ /(mm)	137.8	139.0	N/A
Diámetro exterior de la tubería, $d_1$ /(mm)	152.4	152.4	N/A
Diámetro interior de la tubería, $d_2$ /(mm)	134.5	134.5	N/A
Diámetro exterior de convergencia, $D_3$ /(mm)	249.9	276.0	234.3-312.4
Diámetro exterior de convergencia, $D_4$ /(mm)	220.5	243.9	206.7-275.6
Longitud de planchado, $L_p$ /(mm)	95.0	129.0	91.7-275.1
Abertura inicial, $ap$ /(mm)	29.4	27.0	27.6-55.2
Ángulo interno de convergencia, $\alpha$ /(°)	32.0	24.0	30-60
Ángulo externo de convergencia, $\beta$ /(°)	36.0	27.0	30-60

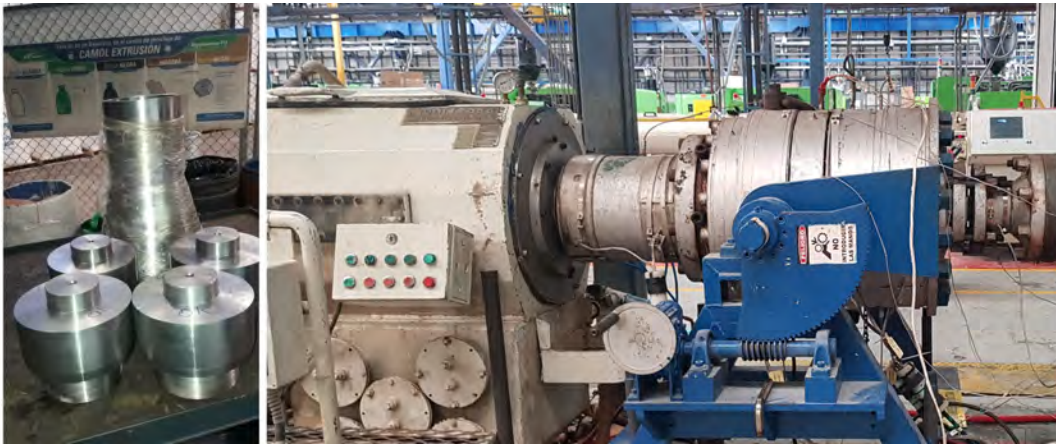
Durante la reunión de evaluación de la oportunidad de mejora se propone modificar el cabezal existente para aumentar su longitud de planchado. Dado que con el mismo cabezal se producen otros productos sin presentar problemas de apariencia se propone diseñar un dado-pin con capacidad de intercambiar piezas que incrementen y disminuyan la longitud de planchado como sea requerido para el producto a producir. La modificación y nuevas dimensiones se observan en la Figura 4.63.

Para esta modificación se requirió recortar la sección final del cabezal existente 25 mm que permiten agregar un acople roscado que sirve para montar y desmontar las piezas intercambiables fácilmente. Estas piezas intercambiables son de longitudes (25, 50, 100) mm que consiguen un alargamiento del pin conveniente para conseguir la longitud del diseño ideal para la producción del producto Presión Blanco y los demás productos que se fabrican con este cabezal.

## 4.6. Instalación Nuevo Cabezal

El cabezal modificado se instala en la Línea TS-108 para validar su funcionamiento y cuánto mejora el rendimiento de la producción con la modificación realizada. Se arranca con la producción del producto Presión Blanco con el nuevo cabezal y se consigue un rendimiento de 520 kg/h el cual era el valor meta de la empresa, ya que

otros productos de dimensiones similares con diferentes formulaciones conseguían dicho rendimiento en el mismo equipo, mientras que el producto en cuestión tenía que producirse en 470 kg/h para evitar la mala apariencia interna de la tubería, la mejora se observa en la Figura 4.64.



**Figura 4.63.** Pin modificado del cabezal para mejoras.

#### 4.7. Análisis costo-beneficio de modificar cabezal

La modificación y creación de partes para la modificación del cabezal generó un costo de 1 233 560 colones, mientras que los costos asociados a la calidad por producto defectuoso asciende hasta los 3 000 000 de colones mensuales en los que se contempla el tiempo de disponibilidad de los equipos, el desperdicio generado y los rechazos por productos no conformes. De esta manera el costo de la modificación representa el 41 % de los costos de calidad, por lo que realizar esta inversión genera ganancia significativa para la empresa.



**Figura 4.64.** Mejora en la apariencia interna del producto Presión Blanco.

Esta mejora consiguió un producto con apariencia interna lisa que es necesario para conseguir coeficientes de fricción pequeños y garantizar menores pérdidas por fricción en el trasiego de fluidos por las tuberías. Esta característica específica es de especial atención por parte de los clientes, ya que reconocen que mayores rugosidades provocan mayores consumos de potencia de bombas para el movimiento de fluidos.

La mejora en la apariencia interna consigue una disminución en el producto no conforme, mejorando el uso del tiempo disponible y la capacidad de producción de la empresa que consigue una mejora en el indicador global de efectividad.

Además, la mejora de este producto aumenta la confiabilidad en las operaciones de la planta de producción en recuperar la inversión en activos, logrando un mejor apoyo para invertir en nuevos proyectos.





# CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

## 4.1. CONCLUSIONES

- La empresa presenta una excelencia operacional aceptable con una buena competitividad en sus procesos demostrado con su OEE entre 75 % y 84 %.
- El proceso de enfriamiento corresponde a uno de los factores de mayor costo para la empresa al presentar un 31 % del consumo energético de la planta en el análisis del costo de transformación en el desempeño de los recursos.
- El relleno en la formulación de productos de PVC obstruye el flujo de la moléculas, aumentando la viscosidad y los esfuerzos cortantes en la mezcla fundida y los lubricantes un efecto contrario.
- La mejor región de trabajo se encuentra entre 1 y 5 partes de  $\text{CaCO}_3$ , 0.4 a 0.5 de lubricante interno y 0.8 a 1.0 de lubricante externo.
- Se obtiene un sobredimensionamiento del 76 % de la capacidad frigorífica instalada en la planta que demuestra la necesidad de análisis de eficiencia de intercambio calórico.
- La resistencia de transferencia de energía por conducción contribuye en un 87 % a la resistencia equivalente para tuberías y un 57 % para perfiles justificando las diferencias en los sistemas de enfriamiento para cada tipo de producto.
- Los tiempos de producción permiten un aprovechamiento del 30 % de la capacidad frigorífica justificando el sobredimensionamiento de la planta, aumentando los tiempos se puede conseguir un 88 %.
- El diseño adecuado del cabezal de extrusión permite disminuir los esfuerzos cortantes que generan imperfecciones en el producto terminado.
- Las secciones más importantes para el acabado final de las tuberías son el dado y el pin en los que se define la zona de planchado y zona de convergencia de material.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Es necesaria la implementación de un análisis de datos más eficiente para identificar con mayor agilidad los componentes involucrados que más afectan los indicadores de desempeño para priorizar su intervención.
- Dado que el relleno y lubricantes tienen efectos contrarios en respuesta a los esfuerzos cortantes de la mezcla y en el costo de formulación, es necesario un análisis de formulación respecto al costo de fórmula que permita optimizar las composiciones para un menor costo y esfuerzos adecuados en la mezcla fundida.
- Cuantificar el ahorro en la factura de consumo eléctrico por las mejoras en aprovechamiento de enfriamiento.
- Aumentar la temperatura de agua helada al aumentar la longitud característica para evidenciar disminución de consumo eléctrico de la planta.
- Evaluar la instalación de alternativas de almacenamiento de energía de enfriamiento térmico como bancos de agua helada, bancos de hielo o sistemas de cambio de fase de otros materiales, que permiten reducir la demanda energética durante periodos punta y desplazar carga a periodos de menor costo energético.
- Validar el rendimiento y propiedades de la nueva formulación obtenida mediante la producción de un lote de validación.
- Es necesario garantizar el rompimiento de la capa límite de transferencia alrededor de las paredes de los productos para evitar la restricción de transferencia, aún cuando se cuente con una masa de agua helada suficientemente fría y un gradiente de temperatura alto.
- Analizar la transferencia de energía individualmente por producto para determinar la mejora adecuada para cada uno que mejor aproveche la capacidad frigorífica de la planta.

# NOMENCLATURA

## Acrónimos

*OEE* Efectividad global de los equipos

*RC* Razón de calidad

*RD* Razón de disponibilidad

*RR* Razón de rendimiento

## Griegas

$\Delta$  Indica un cambio

$\epsilon$  Emisividad de superficie

$\mu$  Viscosidad dinámica kg/m · s

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

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann

$\varepsilon$  Error de estimación

## Mayúsculas

$\dot{Q}$  Energía transferida W

$A$  Aumento de torsión de carga N · m

$A$  Área m<sup>2</sup>

$B$  Aumento de torsión mínimo N · m

$C_f$  Capacidad frigorífica ton

$D$  Diámetro de anillo de cabezal mm

$d$  Diámetro de tubería mm

$DDR$  Relación de reducción adim

$DRB$	Balance de relación de reducción	adim
$L$	Límite inferior	
$Nu$	Número de Nusselt	adim
$O$	Valor objetivo	
$P$	Producción	kg
$Pr$	Número de Prandtl	adim
$R$	Rendimiento	kg/h
$Re$	Número de Reynolds	adim
$T$	Temperatura	K
$U$	Energía interna	J
$V$	Velocidad del fluido	m/s
$W$	Ponderación promedio de respuestas	
$X$	Aumento de torsión máximo	N · m
$Y$	Variable dependiente	

### Minúsculas

$\alpha$	Ángulo interno de convergencia	°
$\beta$	Parámetro constante del modelo	
$\beta$	Ángulo externo de convergencia	°
$\dot{q}$	Energía transferida por unidad de área	W/m <sup>2</sup>
$ap$	Abertura inicial	mm
$c$	Calor específico	J/kg · K
$d$	Deseabilidad	

$g$	Ponderación en maximización de deseabilidad	
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$W/m^2 \cdot K$
$k$	Conductividad térmica	$W/m \cdot K$
$l$	Espesor de capa	m
$L_p$	Longitud de planchado	mm
$m$	Masa	kg
$r$	Hace referencia al radio de un cilindro	m
$s$	Ponderación en minimización de deseabilidad	
$t$	Tiempo	h
$w$	Importancia de respuesta	
$x$	Variable independiente	
$y$	Valor de respuesta	

### Superíndices

1	Interior
2	Exterior

### Subíndices

$\infty$	Hace referencia a muy lejano
$\perp$	Hace referencia a dirección perpendicular
$alr$	Hace referencia a los alrededores de un sistema
$c$	Hace referencia a conforme
$ca$	Hace referencia a una propiedad característica
$cil$	Hace referencia a un cilindro

<i>Cond</i>	Hace referencia a la transferencia de energía por conducción
<i>Cv</i>	Hace referencia a la transferencia de energía por convección
<i>d</i>	Hace referencia a disponible
<i>est</i>	Hace referencia a estándar
<i>ext</i>	Hace referencia a la parte externa
<i>f</i>	fusión
<i>i</i>	Hace referencia al i-ésimo objeto
<i>int</i>	Hace referencia a la parte interna
<i>nc</i>	Hace referencia a no conforme
<i>Rad</i>	Hace referencia a la transferencia de energía por radiación
<i>S</i>	Hace referencia a una característica de superficie
<i>tr</i>	Hace referencia a trabajado
<i>f</i>	Hace referencia a película de fluido

## BIBLIOGRAFÍA

- Agassant, J., Arda, D., Combeaud, C., Merten, A., Münstedt, H., Mackley, M., Robert, L., y Vergnes, B. (2006). Polymer processing extrusion instabilities and methods for their elimination or minimisation. *Carl Hanser Verlag*, 21(3):239–255. <https://doi.org/10.3139/217.0084>.
- Almeida, B., Alves, M., Rosa, P., Brito, A., y Martins, P. (2006). Expansion and reduction of thin-walled tubes using a die: Experimental and theoretical investigation. *Machine Tools Manufacture*, 46(1):1643–1652. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.08.018>.
- Amanco-Wavin (2020). *Manual Técnico de Tubosistemas*. Amanco Wavin, <https://www.wavin.com/es-cr/soluciones>.
- Anaya, J. (2007). *Logística integral: la gestión operativa de la empresa*. ESIC Editorial.
- ASTM International (2018). *D2538-18. Standard Practice for Fusion of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Compounds Using a Torque Rheometer*. ASTM INTERNATIONAL, <https://www.astm.org/d2538-18.html> edición.
- AWWA (2002). *PVC Pipe - Design and Installation*. American Water Association, <https://doi.org/10.12999/AWWA.M23ed3>.
- Bacio, L. (2007). *Optimización Multi-Objetivo en el Problema de Metodología de Superficie Multi-Respuesta*. Centro de Investigación en Matemáticas, <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/69/2/TE%20221.pdf>.
- Beltrán, M. (2011). *Tipos de plásticos, aditivación y mezclado*. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/16893>.
- Billmeyer, F. (2004). *Ciencia de los polímeros*. Reverté.
- Blasco, B., Blasco, E., Fernández, J., Losada, J., y Viñas, C. (2008). *Fundamentos físicos de la edificación*. Delta Publicaciones.

- Brabender Gmbh (2017). *Brabender Measuring Mixers for Material Research and Quality Control*. <https://webport.brabender.com/s9MqLziYXN>.
- Brabender Gmbh (2019). *Brabender Instruments Overview for Material Research and Quality Control*. <https://webport.brabender.com/C3WZS4Bsen>.
- Buezas, N. (2010). *Guía: Plásticos y Fuego*. Programa de fomento de la innovación en institutos tecnológicos, <https://www.observatorioplastico.com/ficheros/publicaciones/126155543>  
*Guia\_plasticos\_fuego\_2010\_encrip.pdf*.
- Buitrago, F., Molina, J., y Noriega, V. (2014). *Repotenciación del cuarto para conservación de alimentos del laboratorio de refrigeración y aire acondicionado del bloque 2*. Tecnológico Pascual Bravo, <http://repositorio.pascualbravo.edu.co:8080/jspui/handle/pascualbravo/265>.
- Cengel, Y. y Cimbala, J. (2018). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill, 4a edición.
- Cengel, Y. y Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill, 4a edición.
- Cengel, Y., Granados, I., Kanoglu, M., Boles, M., Laurencio, A., Rojas, A., Navarro, R., Astorga, E., Evangelista, G., y Soto, R. (2019). *Termodinámica*. McGraw Hill, 9a edición.
- Cruelles, J. (2009). *La Teoría de la Medición del Despilfarro*. Zadecon.
- De la Vara, R. y Domínguez, J. (2017). *Definitive Screening Designs with Added Two-Level Categorical Factors*, *Journal of Quality Technology*, 45(2):121–129. <https://doi.org/10.1080/00224065.2013.11917921>.
- Deler, A. (2018). *El principio de Pareto: Optimice su negocio con la regla del 80/20*. 50Minutos.es, <https://www.50minutos.es/libro/el-principio-de-pareto/>.
- Giles, H., Wagner, J., y Mount, E. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. William Andrew.



- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F: McGraw Hill, 2a edición.
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2013). *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma*. México D.F: McGraw Hill, 3a edición.
- Hawkins, T. (1982). Evaluation of pvc compound on the brabender torque rheometer. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 4(3):110–114.
- Hernández, J., Salinas, E., Blanco, A., Cerecedo, E., y Rodríguez, E. (2014). *Carbonato de Calcio en México*. Omnia Publisher, <https://doi.org/10.1002/vnl.730040306>.
- IASC (2003). Normas internacionales de contabilidad 2: Inventarios. Technical Report NIC 2, Comité de Normas Internacionales de Contabilidad. <https://www.nicniif.org/home/descargar-documento/2608-13;inventarios.html>.
- Jacobs, R. y Chase, R. (2019). *Administración de Operaciones Producción y Cadena de Suministros*. McGraw Hill, <https://doi.org/10.1002/vnl.730040306>, 15a edición.
- Kainth, S. (2018). *Die Design for Extrusion of Plastic Tubes and Pipes: A Practical Guide*. HANSER, <https://doi.org/10.3139/9781569906736>.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Education, 4a edición.
- Lind, D., Marchal, W., y Wahlen, S. (2012). *Estadística aplicada a los negocios y economía*. McGraw Hill.
- MiniTab LLC (2020). *Informe técnico de diseño de experimentos*. [https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/media/pdfs/translate/Asistente\\_Dise%C3%B1o\\_de\\_experimentos.pdf](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/media/pdfs/translate/Asistente_Dise%C3%B1o_de_experimentos.pdf).
- Mott, R., Untener, J., Cárdenas, R., y Murrieta, J. (2015). *Mecánica de Fluidos*. PEARSON, 7a edición.
- Mousa, A., Halim, N., y Al-Robaidi, A. (2007). Rheological and mechanical properties of clay thermoplastic elastomers derived from pvc and nbr. *Polymer-plastic technology and engineering*, 45(4):513–518. <https://doi.org/10.1080/03602550600553747>.

- Olsson, J. (2015). *Water and Energy: Threats and Opportunities*. IWA Publishing, 2a edición.
- Parmenter, D. (2010). *Key Performance Indicators*. USA: Wiley, 2a edición.
- Pintelon, L. y Nganga, P. (2010). *Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion*, Reino Unido: Taylor Francis Group 46(13):3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>.
- Prat, A., Tort, X., Grima, P., y Pozueta, L. (2004). *Métodos estadísticos: Control y mejora de la calidad*. POLITECNOS. <http://hdl.handle.net/2099.3/36717>.
- Pérez, E. y García, M. (2014). *Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en FANAL*, Tecnología en Marcha 27(3):88–106. <https://doi.org/10.18845/tm.v27i3.2070>.
- Quoc-Hung, N. y Ngoc-Diep, N. (2012). *Incompressible Non-Newtonian Fluid Flows, Continuum Mechanics - Progress in Fundamentals and Engineering Applications*. Dr. Yong Gan, INTECH, <https://doi.org/10.5772/26091>.
- Ross, S., Westerfield, R., y Jaffe, J. (2012). *Finanzas Corporativas*. McGraw Hill, 9 edición.
- Rubio, L. (2019). *Optimización multirespuesta de la concentración de solución osmótica, temperatura y tiempo de inmersión sobre humedad final y ganancia de sólidos del espárrago verde deshidratado osmóticamente.*, Ciencia y Tecnología, 15(1):113–124. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/2379>.
- Santiago, H. (2018). *Herramientas para la Gestión de la Calidad*. Círculo Rojo, <https://gestiondecualidadhome.files.wordpress.com/2018/12/HERRAMIENTAS-PARA-LA-GESTION-DE-CALIDAD-S-HECTOR-SANTIAGO.pdf>.
- Schweigger, E. (2005). *Manual de pinturas y recubrimientos plásticos*. Ediciones Díaz de Santos.

- Stanford, H. (2012). *HVAC Water Chillers and Cooling Towers, Fundamentals, Application and Operation*. CRC Press.
- Subramanian, N. (2010). *Update on Troubleshooting the PVC Extrusion Process*. Smit-hers.
- Thomas, E. y Philip, R. (2019). *Physical Chemistry: Thermodynamics, Statistical Thermodynamics, and Kinetics*. Pearson Education, 4a edición.
- Vanaja, K. y Shobha, R. (2014). Design of experiments: Concept and applications of plackett burman design. *Clinical Research and Regulatory Affairs*, 24(1):1–23. <https://doi.org/10.1080/10601330701220520>.
- Wolfgang, B. y Westfall, G. (2011). *Física para ingeniería y ciencias*. McGraw Hill.
- Wypich, G. (2016). *Handbook of Polymers*. ChemTec, <https://www.elsevier.com/books/handbook-of-polymers/wypich/978-1-895198-92-8>.



# APÉNDICES

## A. Datos experimentales

**Cuadro A.1.** Proporción mensual del costo de transformación.

Factor	Ene /(%)	Feb /(%)	Mar /(%)	Abr /(%)	May /(%)	Jun /(%)	Jul /(%)	Ago /(%)	Sept /(%)
Personal	11	11	12	12	11	11	11	12	14
Energía	19	23	27	18	29	26	24	26	24
Equipos	25	25	22	31	24	24	28	24	26
Insumos	45	40	38	40	36	39	37	38	36

**Cuadro A.2.** Consumo energético de las principales áreas de la empresa.

Área de consumo	Porcentaje / (%)
Enfriamiento	32
Extrusores	26
Inyectores	21
Aire comprimido	19
Pegamentos	17

**Cuadro A.3.** Producción promedio mensual de perfiles en extrusión.

Producto	Producción, $P_c$ /(kg)	Área superficial, $A_S$ /(m <sup>2</sup> )	Rendimiento, $R$ /(kg/h)	Masa unitaria, $m$ /(kg)
Canoa	109 438	2.64	240	4
Perfil 1	28 612	0.88	220	3
Perfil 2	35 738	0.88	280	2

**Cuadro A.4.** Porcentaje de desperdicio en los principales productos de extrusión.

Producto	Porcentaje / (%)
SDR 13.5	2,9
SDR 17.0	2,7
SDR 26.0	2,4
SDR 32.5	2,3
SDR 41.0	2.0

**Cuadro A.5.** Valores obtenidos de producción conforme para cada equipo.

Línea	Ene /(kg)	Feb /(kg)	Mar /(kg)	Abr /(kg)	May /(kg)	Jun /(kg)	Jul /(kg)	Ago /(kg)	Sept /(kg)	Total /(kg)
DEKUMA	0	109.469	50.929	119.564	20.758	77.762	28.872	102.245	0	509.598
DSK 62-3	0	0	77.918	80.841	101.199	83.642	59.291	0	0	402.891
KMD 114-2	27.459	46.258	80.270	49.054	52.125	34.194	38.230	33.869	49.433	410.892
KMD 114-3	304.597	215.370	218.142	242.271	250.255	234.291	329.080	240.306	257.947	2.292.259
KMD 75	96.318	127.708	107.734	131.307	148.435	103.033	178.936	123.535	106.994	1.124.001
KMD 90-1	167.825	174.474	193.661	185.180	163.576	156.894	177.555	136.834	138.846	1.494.846
KMD 90-2	264.889	228.691	245.559	239.060	121.592	157.646	140.534	175.209	186.083	1.759.262
TREX 90-1	121.548	84.559	16.152	69.957	97.243	128.660	132.866	64.905	110.546	826.435
TS 100-2	169.491	186.888	182.415	147.846	182.984	168.056	174.531	150.227	146.801	1.509.239
TS 108	209.175	185.281	228.972	163.346	236.614	174.406	175.262	160.580	158.300	1.691.936
TS 80-1	28.237	68.314	111.860	88.851	93.624	134.558	114.006	44.725	46.731	730.905
Total	1.389.539	1.427.010	1.513.611	1.517.277	1.468.405	1.453.143	1.549.163	1.232.435	1.201.681	12.752.265

**Cuadro A.6.** Valores obtenidos de producción no conforme para cada equipo.

Línea	Ene /(kg)	Feb /(kg)	Mar /(kg)	Abr /(kg)	May /(kg)	Jun /(kg)	Jul /(kg)	Ago /(kg)	Sept /(kg)	Total /(kg)
DEKUMA	0	5.244	4.054	8.395	2.067	3.297	2.145	6.114	0	31.316
DSK 62-3	0	0	1.636	1.329	2.894	6.100	3.640	0	0	15.599
KMD 114-2	2.920	2.875	2.938	2.062	1.449	1.555	1.831	1.209	2.974	19.814
KMD 114-3	16.327	14.301	15.226	11.072	11.487	12.130	16.520	15.812	14.884	127.758
KMD 75	6.613	7.650	5.807	5.019	6.873	7.909	9.215	4.707	3.905	57.697
KMD 90-1	9.845	9.491	5.984	5.851	7.901	7.461	7.262	6.992	7.581	68.368
KMD 90-2	12.457	10.876	10.052	11.501	8.518	7.202	7.343	8.141	5.794	81.885
TREX 90-1	7.708	6.722	674	6.158	4.862	8.979	7.733	3.291	5.947	52.074
TS 100-2	14.434	9.307	14.374	11.646	12.626	8.640	11.449	7.196	7.751	97.424
TS 108	32.895	19.667	18.982	16.060	9.752	10.095	11.931	10.495	7.071	136.948
TS 80-1	949	3.798	4.586	4.916	5.224	6.459	9.098	2.317	4.159	41.507
Total	104.147	89.931	84.313	84.009	73.653	79.825	88.168	66.274	60.067	730.388

**Cuadro A.7.** Valores obtenidos de tiempo trabajado para cada línea.

Línea	Ene /(h)	Feb /(h)	Mar /(h)	Abr /(h)	May /(h)	Jun /(h)	Jul /(h)	Ago /(h)	Sept /(h)	Total /(h)
DEKUMA	0	338	163	378	63	216	91	313	0	1.561
DSK 62-3	0	0	456	421	571	485	339	0	0	2.271
KMD 114-2	107	124	243	167	172	112	145	115	157	1.342
KMD 114-3	481	356	357	384	412	385	541	341	401	3.658
KMD 75	348	420	426	433	544	352	551	390	360	3.825
KMD 90-1	561	523	580	531	535	484	523	409	431	4.576
KMD 90-2	488	393	414	406	218	275	261	311	399	3.166
TREX 90-1	446	365	59	295	316	467	504	257	431	3.140
TS 100-2	505	532	497	428	510	497	512	435	432	4.348
TS 108	506	435	510	398	561	438	478	453	455	4.234
TS 80-1	105	301	449	323	348	495	439	165	215	2.840
Total	3.547	3.786	4.154	4.164	4.248	4.207	4.385	3.189	3.282	34.961



**Cuadro A.8.** Valores obtenidos de tiempo disponible para trabajar para cada línea.

Línea	Ene /(h)	Feb /(h)	Mar /(h)	Abr /(h)	May /(h)	Jun /(h)	Jul /(h)	Ago /(h)	Sept /(h)	Total /(h)
DEKUMA	0	467	245	514	100	306	137	400	0	2.169
DSK 62-3	0	0	505	495	713	682	441	0	0	2.837
KMD 114-2	124	142	258	194	232	125	159	124	249	1.606
KMD 114-3	591	391	395	416	450	413	594	382	455	4.087
KMD 75	368	586	471	519	683	478	633	416	399	4.554
KMD 90-1	708	655	746	656	750	635	643	567	658	6.018
KMD 90-2	692	561	668	587	311	385	373	449	466	4.492
TREX 90-1	610	503	160	421	393	593	628	290	466	4.063
TS 100-2	570	588	646	595	659	638	644	503	553	5.395
TS 108	698	717	947	747	950	699	896	617	660	6.931
TS 80-1	124	345	514	365	421	614	540	192	253	3.369
Total	4.484	4.956	5.555	5.509	5.663	5.568	5.689	3.940	4.158	45.522

**Cuadro A.9.** Valores obtenidos de rendimiento estándar de producción para cada equipo.

Línea	Ene /(kg/h)	Feb /(kg/h)	Mar /(kg/h)	Abr /(kg/h)	May (kg/h)	Jun /(kg/h)	Jul /(kg/h)	Ago /(kg/h)	Sept /(kg/h)	Total /(kg/h)
DEKUMA	0	324	312	317	331	360	318	327	0	327
DSK 62-3	0	0	171	192	177	173	175	0	0	148
KMD 114-2	255	328	311	294	303	306	264	294	316	297
KMD 114-3	633	605	610	631	608	609	608	601	601	612
KMD 75	297	304	253	303	273	292	325	317	297	296
KMD 90-1	300	334	334	349	306	324	339	335	322	327
KMD 90-2	518	501	498	530	545	505	490	542	480	512
TREX 90-1	272	232	275	237	308	275	264	252	245	262
TS 100-2	336	352	367	345	359	338	341	345	340	347
TS 108	542	582	594	588	558	573	539	563	466	556
TS 80-1	283	195	216	256	269	272	259	256	218	247
Total	3.437	3.756	3.940	4.042	4.037	4.026	3.921	3.832	3.283	3.930

**Cuadro A.10.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER.

Tiempo, $t/$ (s)	D1, $\tau /$ (N · m)	D2, $\tau /$ (N · m)	D3, $\tau /$ (N · m)	D4, $\tau /$ (N · m)	D5, $\tau /$ (N · m)	R, $\tau /$ (N · m)
0	1.63	1.09	1.68	1.68	1.30	1.54
2	3.06	3.23	4.50	2.55	3.33	6.11
4	8.12	6.47	10.43	8.40	8.91	14.62
6	12.51	9.48	15.01	13.52	14.39	23.18
8	13.88	13.84	20.08	14.41	19.46	26.40
10	11.48	19.15	20.38	11.63	19.51	20.30
12	10.70	21.21	17.83	10.43	17.07	17.56
14	10.07	19.79	16.34	9.83	15.90	15.84
16	9.67	18.39	15.18	9.29	14.75	14.65
18	9.36	17.23	14.39	8.86	14.07	13.62
20	9.25	16.33	13.74	8.48	13.47	12.90
22	9.12	15.95	13.30	8.67	13.09	12.14
24	8.72	15.57	13.30	7.86	12.76	11.67
26	8.85	15.66	13.20	8.21	12.95	11.28
28	9.34	15.81	13.38	8.40	13.09	11.06
30	9.34	15.92	13.55	8.80	13.27	10.86
32	9.67	16.12	13.55	8.89	13.63	11.00
34	9.99	15.87	14.09	9.43	13.93	11.13
36	10.48	16.01	14.09	9.65	14.04	11.26
38	10.93	15.92	14.28	10.19	14.07	11.50
40	10.82	15.98	13.90	10.46	13.95	11.75
42	11.28	15.52	13.98	10.89	13.93	11.97
44	11.67	15.14	13.90	11.06	13.93	11.92
46	11.64	14.89	13.61	11.14	13.76	12.02
48	11.83	14.43	13.84	11.20	13.69	12.08
50	11.80	14.27	13.61	11.38	13.38	11.90
52	12.02	13.89	13.74	11.22	13.33	12.19
54	12.05	13.60	13.61	11.43	13.15	12.15
56	12.02	13.35	13.15	11.20	13.03	12.22
58	12.07	12.94	13.15	11.25	12.87	12.15

**Cuadro A.11.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $\tau$ / (N · m)	D2, $\tau$ / (N · m)	D3, $\tau$ / (N · m)	D4, $\tau$ / (N · m)	D5, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
60	11.91	13.08	12.79	11.17	12.69	12.18
62	11.96	12.81	13.01	10.92	12.46	12.21
64	11.96	12.71	12.87	11.11	12.30	12.18
66	11.13	12.51	12.76	10.92	12.27	12.28
68	11.77	12.37	12.58	10.97	12.20	12.19
70	11.61	12.25	12.38	11.03	12.03	12.21
72	11.56	12.68	12.30	11.00	11.98	12.22
74	11.53	12.03	12.09	10.78	11.71	12.19
76	11.61	11.86	12.20	10.62	11.66	12.25
78	11.50	11.89	12.12	10.84	11.52	12.35
80	11.50	11.86	11.92	10.60	11.41	12.21
82	11.53	11.73	11.81	10.57	11.41	12.16
84	11.47	11.75	12.06	10.49	11.30	12.03
86	11.37	11.54	11.74	10.29	11.27	12.00
88	11.16	11.65	11.60	10.35	10.68	11.96
90	11.31	11.37	11.63	10.35	11.17	11.88
92	11.31	11.43	11.38	10.29	11.00	11.93
94	11.28	11.34	11.41	10.22	11.03	11.86
96	11.04	11.16	11.30	10.38	11.00	11.68
98	11.10	11.32	11.30	10.17	10.92	11.72
100	10.99	11.05	11.30	10.27	11.06	11.66
102	10.91	11.13	11.11	9.92	10.75	11.51
104	10.85	11.05	11.14	10.05	10.71	11.47
106	10.80	10.94	11.08	10.11	10.62	11.40
108	10.67	10.97	11.03	9.89	10.68	11.38
110	10.93	10.77	10.97	10.05	10.65	11.32
112	10.61	10.89	10.84	10.00	10.51	11.25
114	10.56	10.67	10.84	9.92	10.60	11.22
116	10.42	10.77	10.84	9.86	10.40	11.14
118	10.45	10.51	10.81	9.65	10.40	11.06
120	10.50	10.65	10.62	9.68	10.35	10.99
122	10.18	10.24	10.54	9.62	9.78	10.89
124	10.21	10.13	10.57	9.81	9.73	10.88
126	10.13	10.24	10.38	9.32	9.81	10.75
128	10.13	10.19	10.05	9.02	10.05	10.53

**Cuadro A.12.** Datos de corridas 1 a 5 obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $\tau$ / (N · m)	D2, $\tau$ / (N · m)	D3, $\tau$ / (N · m)	D4, $\tau$ / (N · m)	D5, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
130	9.91	10.32	10.00	8.48	10.03	10.36
132	10.04	10.10	10.25	8.89	10.08	10.39
134	10.31	10.21	10.14	8.89	9.97	10.54
136	9.99	10.10	10.19	9.02	10.05	10.40
138	9.88	10.13	10.11	9.00	9.89	10.30
140	9.72	10.24	9.97	8.91	9.81	10.30
142	9.72	10.08	10.11	8.97	10.00	10.26
144	9.67	10.05	9.94	8.89	9.86	10.22
146	9.69	9.97	10.08	9.00	9.54	10.27
148	9.53	9.88	9.97	9.02	9.71	10.25
150	9.72	10.02	10.00	8.80	9.71	10.24
152	9.72	9.75	10.00	9.05	9.68	10.20
154	9.47	9.83	9.78	8.97	9.59	10.20
156	9.36	9.91	10.08	8.65	9.59	10.01
158	9.34	9.75	9.71	8.80	9.62	10.25
160	9.25	9.75	9.68	8.83	9.65	9.94
162	8.93	9.77	9.59	8.97	9.73	10.00
164	8.50	9.62	9.75	8.78	9.37	9.87
166	9.12	9.80	9.68	8.73	9.32	9.93
168	8.82	9.86	9.54	8.59	9.35	9.77
170	9.07	9.67	9.65	8.54	9.40	9.76
172	9.15	9.67	9.35	8.45	9.26	9.67
174	8.88	9.62	9.59	8.48	9.43	9.67
176	8.90	9.59	9.35	8.54	9.26	9.67
178	9.04	9.48	9.46	8.40	9.13	9.63
180	9.31	9.51	9.32	8.37	9.16	9.71
182	8.96	9.45	9.32	8.34	9.13	9.53
184	8.79	9.42	9.46	8.34	9.11	9.50
186	8.88	9.48	9.26	8.21	9.16	9.48
188	8.72	9.37	9.22	8.29	8.89	9.34
190	8.64	9.45	9.19	8.21	9.00	9.35
192	8.67	9.48	9.08	8.16	9.05	9.29
194	8.82	9.21	9.11	8.16	8.94	9.47
196	8.69	9.21	9.02	8.13	8.89	9.30
198	8.64	9.13	9.02	8.13	8.83	9.35

**Cuadro A.13.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $\tau$ / (N · m)	D2, $\tau$ / (N · m)	D3, $\tau$ / (N · m)	D4, $\tau$ / (N · m)	D5, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
200	8.69	9.34	9.08	8.13	8.91	9.25
202	8.75	9.18	9.29	8.13	8.86	9.25
204	8.53	9.21	8.94	8.05	8.80	9.08
206	8.55	9.29	8.91	8.10	8.83	9.17
208	8.50	9.02	8.80	7.88	8.65	9.11
210	8.53	9.13	8.89	8.05	8.73	9.03
212	8.39	8.94	8.86	7.97	8.59	9.05
214	8.53	9.05	8.75	7.86	8.78	8.94
216	8.42	8.99	8.80	8.05	8.67	8.98
218	8.31	9.21	8.67	7.91	8.70	8.91
220	8.28	8.96	8.78	7.86	8.62	8.91
222	8.21	9.21	8.70	7.83	8.40	8.98
224	8.25	8.99	8.45	7.77	8.51	8.88
226	8.21	8.88	8.59	7.77	8.48	8.86
228	7.90	8.88	8.51	7.70	8.70	8.78
230	8.18	9.21	8.62	7.70	8.45	8.78
232	8.21	8.88	8.94	7.75	8.54	8.75
234	8.21	8.85	8.65	7.77	8.54	8.78
236	8.12	8.85	8.37	8.10	8.65	8.64
238	8.10	8.70	8.65	7.70	8.26	8.73
240	7.93	9.02	8.56	7.73	8.48	8.69
242	8.10	8.73	8.40	7.77	8.40	8.64
244	8.12	8.75	8.45	7.62	8.73	8.67
246	8.09	8.85	8.45	7.53	8.40	8.65
248	8.04	8.83	8.70	7.53	8.43	8.58
250	8.07	8.67	8.56	7.62	8.29	8.56
252	7.85	8.75	8.43	7.51	8.24	8.48
254	7.90	8.67	8.21	7.64	8.32	8.69
256	7.90	8.61	8.43	7.51	8.24	8.60
258	7.93	8.75	8.29	7.48	8.26	8.57
260	7.85	8.53	8.51	7.37	8.26	8.49
262	7.99	8.75	8.21	7.37	8.32	8.48
264	7.50	8.34	8.34	7.31	8.16	8.27
266	7.82	8.53	8.34	7.40	8.26	8.34
268	7.87	8.56	8.34	7.48	8.10	8.34

**Cuadro A.14.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $\tau$ / (N · m)	D2, $\tau$ / (N · m)	D3, $\tau$ / (N · m)	D4, $\tau$ / (N · m)	D5, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
270	7.79	8.99	8.24	7.34	7.88	8.41
272	7.75	8.50	8.24	7.48	8.19	8.36
274	8.04	8.56	8.32	7.42	8.19	8.49
276	7.69	8.50	8.08	7.24	8.10	8.46
278	7.85	8.53	8.29	7.37	8.08	8.34
280	7.85	8.53	8.19	7.26	8.13	8.33
282	7.76	8.39	8.05	7.37	7.99	8.22
284	7.76	8.48	8.19	7.37	8.10	8.34
286	7.69	8.37	8.16	7.34	8.08	8.26
288	7.55	8.48	8.24	7.34	8.02	8.29
290	7.72	8.45	8.26	7.31	8.10	8.34
292	7.55	8.50	8.08	7.37	7.94	8.16
294	7.72	8.18	8.13	7.18	8.13	8.24
296	7.64	9.05	8.10	7.29	8.21	8.13
298	7.69	8.26	8.13	7.24	8.05	8.16
300	7.69	8.26	8.09	7.24	7.99	8.17

**Cuadro A.15.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER.

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $\tau$ / (N · m)	D7, $\tau$ / (N · m)	D8, $\tau$ / (N · m)	D9, $\tau$ / (N · m)	D10, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
0	1.25	1.41	1.32	2.22	1.19	1.54
2	4.18	5.86	5.35	4.68	5.26	6.11
4	9.75	13.40	15.29	13.59	13.12	14.62
6	14.53	16.49	15.84	22.28	12.50	23.18
8	14.98	13.48	15.47	25.69	9.93	26.40
10	12.20	12.05	11.45	21.36	8.72	20.30
12	11.43	11.24	10.22	18.42	7.94	17.56
14	10.54	10.72	9.86	16.93	7.42	15.84
16	9.94	10.20	9.37	15.85	6.42	14.65
18	9.57	9.93	8.66	14.67	6.45	13.62
20	9.40	9.76	8.48	14.05	6.02	12.90
22	8.94	9.84	8.02	13.45	5.67	12.14
24	8.67	10.01	8.41	13.59	5.34	11.67
26	8.56	10.58	8.14	13.48	4.91	11.28
28	9.13	10.88	8.10	13.85	4.80	11.06

**Cuadro A.16.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t / (s)$	D6, $\tau /$ (N · m)	D7, $\tau /$ (N · m)	D8, $\tau /$ (N · m)	D9, $\tau /$ (N · m)	D10, $\tau /$ (N · m)	R, $\tau /$ (N · m)
30	8.62	11.47	7.87	14.10	4.67	10.86
32	8.89	12.24	7.89	14.45	4.62	11.00
34	8.83	12.70	8.04	14.88	4.34	11.13
36	9.19	12.88	7.96	15.18	4.26	11.26
38	9.26	13.10	7.85	15.13	4.26	11.50
40	9.19	12.75	8.13	15.16	4.16	11.75
42	9.54	12.91	8.47	15.21	4.37	11.97
44	9.59	12.94	8.51	15.13	3.91	11.92
46	9.78	12.80	8.61	15.16	3.91	12.02
48	10.03	12.64	8.59	14.91	3.80	12.08
50	9.97	12.48	8.86	14.99	3.77	11.90
52	10.29	12.31	8.70	14.37	3.59	12.19
54	10.19	12.18	8.97	14.50	3.70	12.15
56	10.03	11.99	8.82	14.45	3.75	12.22
58	10.14	11.93	8.80	14.31	3.62	12.15
60	10.05	11.77	8.75	13.59	3.67	12.18
62	10.22	11.67	9.03	13.85	3.59	12.21
64	9.68	11.18	8.74	13.34	3.45	12.18
66	10.22	11.15	8.94	13.53	3.54	12.28
68	10.11	11.04	8.75	13.48	3.48	12.19
70	10.19	11.07	8.57	13.18	3.65	12.21
72	10.05	11.04	8.59	13.05	3.59	12.22
74	9.92	10.79	8.69	13.05	3.51	12.19
76	10.00	10.72	8.73	12.73	3.54	12.25
78	9.92	10.44	8.63	12.75	3.65	12.35
80	9.94	10.47	8.45	12.56	3.54	12.21
82	9.97	10.39	8.50	12.53	3.45	12.16
84	9.83	10.39	8.33	12.40	3.54	12.03
86	9.78	10.36	8.57	12.64	3.45	12.00
88	9.75	10.39	8.33	12.34	3.59	11.96
90	9.81	10.36	8.49	12.24	3.56	11.88
92	9.71	10.75	8.56	12.21	3.51	11.93
94	9.73	10.20	8.36	12.05	3.56	11.86
96	9.75	10.12	8.44	12.05	3.70	11.68
98	10.14	10.07	8.33	11.91	3.73	11.72



**Cuadro A.17.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $\tau$ / (N · m)	D7, $\tau$ / (N · m)	D8, $\tau$ / (N · m)	D9, $\tau$ / (N · m)	D10, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
100	9.75	10.20	8.26	11.73	3.77	11.66
102	9.62	10.07	8.29	11.53	3.89	11.51
104	9.71	10.23	8.49	11.59	3.75	11.47
106	9.54	10.15	8.30	11.48	3.80	11.40
108	9.57	9.72	8.06	11.13	3.86	11.38
110	9.81	10.04	8.22	11.51	3.80	11.32
112	9.37	10.01	8.20	11.48	3.94	11.25
114	9.54	9.95	8.06	11.37	3.91	11.22
116	9.43	9.90	8.29	11.51	4.16	11.14
118	9.46	9.98	8.02	11.26	3.97	11.06
120	9.37	9.93	8.15	11.19	4.05	10.99
122	9.32	9.90	8.09	11.10	3.83	10.89
124	9.26	9.74	8.10	11.05	3.86	10.88
126	9.19	9.66	8.06	11.02	3.80	10.75
128	9.26	9.63	8.03	11.05	4.08	10.53
130	8.94	9.61	7.82	10.75	4.13	10.36
132	8.94	9.61	7.99	11.10	4.05	10.39
134	8.51	9.58	7.74	10.75	4.19	10.54
136	8.29	9.49	7.93	10.86	4.05	10.40
138	8.32	9.23	7.60	10.64	4.22	10.30
140	8.08	9.03	7.79	10.59	4.19	10.30
142	8.67	9.14	7.83	10.64	4.26	10.26
144	8.73	9.09	7.64	10.53	4.26	10.22
146	8.56	9.17	7.72	10.59	4.26	10.27
148	8.73	9.12	7.63	10.48	4.13	10.25
150	8.54	9.17	7.66	10.37	4.05	10.24
152	8.54	9.09	7.67	10.37	4.24	10.20
154	8.54	8.87	7.71	10.42	4.37	10.20
156	8.56	9.06	7.54	10.37	4.32	10.01
158	8.48	8.87	7.45	10.31	4.37	10.25
160	8.48	8.87	7.55	10.40	4.56	9.94
162	8.48	9.14	7.47	10.37	4.45	10.00
164	8.37	9.01	7.35	10.10	4.19	9.87
166	8.34	9.03	7.33	9.86	4.54	9.93
168	8.78	8.87	7.55	9.91	4.48	9.77

**Cuadro A.18.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $\tau$ / (N · m)	D7, $\tau$ / (N · m)	D8, $\tau$ / (N · m)	D9, $\tau$ / (N · m)	D10, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
170	8.19	8.90	7.42	9.83	4.54	9.76
172	8.29	8.76	7.56	9.97	4.48	9.67
174	8.16	8.87	7.36	9.48	4.29	9.67
176	8.29	8.84	7.61	9.77	4.34	9.67
178	8.05	8.79	7.41	10.31	4.62	9.63
180	8.13	8.81	7.53	9.86	4.45	9.71
182	8.10	8.74	7.26	9.73	4.54	9.53
184	8.05	8.63	7.35	9.73	4.65	9.50
186	8.02	8.63	7.33	9.75	4.13	9.48
188	7.99	8.38	7.17	9.59	4.80	9.34
190	8.16	8.90	7.43	9.73	4.56	9.35
192	7.97	8.66	7.20	9.56	4.70	9.29
194	7.97	8.63	7.33	9.70	4.54	9.47
196	7.97	8.71	7.13	9.56	4.67	9.30
198	7.70	8.66	7.19	9.51	4.48	9.35
200	7.88	8.35	7.22	9.54	4.80	9.25
202	7.83	8.46	7.17	9.54	4.70	9.25
204	7.80	8.49	6.93	9.45	5.26	9.08
206	7.86	8.55	6.69	9.31	4.73	9.17
208	7.75	8.55	6.98	9.59	4.83	9.11
210	7.75	8.60	6.68	9.29	4.24	9.03
212	7.62	8.63	6.70	8.91	4.80	9.05
214	7.62	8.46	6.56	8.43	4.83	8.94
216	7.67	8.41	6.75	9.26	4.77	8.98
218	7.59	8.55	6.79	9.21	4.80	8.91
220	7.59	8.35	6.90	9.29	4.77	8.91
222	7.99	8.46	6.80	9.21	4.83	8.98
224	7.62	8.52	6.85	9.21	4.75	8.88
226	7.48	8.44	6.95	9.34	4.83	8.86
228	7.34	8.35	6.67	9.13	4.56	8.78
230	7.45	8.17	6.80	9.13	4.91	8.78
232	7.45	8.27	6.83	9.21	5.08	8.75
234	7.53	8.30	6.65	9.02	4.77	8.78
236	7.42	8.25	6.93	9.16	4.88	8.64
238	7.45	8.30	6.79	9.08	4.91	8.73

**Cuadro A.19.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $\tau$ / (N · m)	D7, $\tau$ / (N · m)	D8, $\tau$ / (N · m)	D9, $\tau$ / (N · m)	D10, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
240	7.34	8.30	6.66	8.86	4.88	8.69
242	7.24	8.20	6.87	9.02	4.86	8.64
244	7.34	8.17	6.64	8.86	4.65	8.67
246	7.26	8.17	6.77	8.91	4.80	8.65
248	7.34	8.20	6.63	8.83	4.80	8.58
250	7.16	8.32	6.75	8.88	4.73	8.56
252	7.40	8.17	6.56	8.73	4.91	8.48
254	7.31	8.27	6.77	8.88	4.91	8.69
256	7.31	8.17	6.79	8.99	4.80	8.60
258	7.24	8.17	6.58	8.83	4.77	8.57
260	7.21	7.89	6.74	8.94	4.77	8.49
262	7.16	8.17	6.56	8.88	4.86	8.48
264	7.21	7.91	6.41	8.70	4.86	8.27
266	7.16	8.14	6.48	8.65	4.73	8.34
268	7.13	8.25	6.70	8.83	4.77	8.34
270	7.18	8.17	6.43	8.65	4.70	8.41
272	7.21	8.38	6.57	8.73	4.65	8.36
274	7.07	8.00	6.41	8.59	4.77	8.49
276	7.05	8.27	6.51	8.65	4.62	8.46
278	7.10	8.06	6.40	8.54	4.56	8.34
280	7.13	8.03	6.84	8.62	4.80	8.33
282	7.05	8.00	6.58	8.51	4.59	8.22
284	7.10	8.30	6.65	9.05	4.56	8.34
286	7.13	8.03	6.30	8.51	4.77	8.26
288	6.99	8.06	6.46	8.56	4.77	8.29
290	6.99	8.00	6.34	8.48	4.65	8.34
292	6.91	8.06	6.49	8.65	4.70	8.16
294	7.05	8.09	6.20	8.48	4.62	8.24
296	6.94	8.00	6.73	8.91	4.51	8.13
298	6.99	8.09	6.22	8.62	4.37	8.16
300	6.99	8.03	6.35	8.63	4.41	8.17

**Cuadro A.20.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER.

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $\tau$ / (N · m)	D12, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
0	1.54	1.35	1.54
2	6.11	2.47	6.11
4	14.62	7.99	14.62
6	23.18	12.44	23.18
8	26.40	11.87	26.40
10	20.30	9.86	20.30
12	17.56	8.83	17.56
14	15.84	8.37	15.84
16	14.65	7.62	14.65
18	13.62	7.13	13.62
20	12.90	6.64	12.90
22	12.14	6.50	12.14
24	11.67	6.10	11.67
26	11.28	5.82	11.28
28	11.06	5.36	11.06
30	10.86	5.39	10.86
32	11.00	5.42	11.00
34	11.13	5.15	11.13
36	11.26	5.15	11.26
38	11.50	5.01	11.50
40	11.75	4.99	11.75
42	11.97	4.88	11.97
44	11.92	4.88	11.92
46	12.02	4.85	12.02
48	12.08	4.79	12.08
50	11.90	4.61	11.90
52	12.19	4.66	12.19
54	12.15	4.72	12.15
56	12.22	4.67	12.22
58	12.15	4.66	12.15
60	12.18	4.63	12.18
62	12.21	4.72	12.21
64	12.18	4.53	12.18
66	12.28	4.53	12.28
68	12.19	4.50	12.19

**Cuadro A.21.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $\tau$ / (N · m)	D12, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
70	12.21	4.44	12.21
72	12.22	4.58	12.22
74	12.19	4.58	12.19
76	12.25	4.58	12.25
78	12.35	4.55	12.35
80	12.21	4.55	12.21
82	12.16	4.50	12.16
84	12.03	4.44	12.03
86	12.00	4.55	12.00
88	11.96	4.44	11.96
90	11.88	4.61	11.88
92	11.93	4.96	11.93
94	11.86	4.69	11.86
96	11.68	4.88	11.68
98	11.72	4.75	11.72
100	11.66	4.72	11.66
102	11.51	4.66	11.51
104	11.47	4.69	11.47
106	11.40	4.75	11.40
108	11.38	4.82	11.38
110	11.32	4.75	11.32
112	11.25	4.90	11.25
114	11.22	4.75	11.22
116	11.14	5.01	11.14
118	11.06	5.18	11.06
120	10.99	5.23	10.99
122	10.89	4.99	10.89
124	10.88	4.76	10.88
126	10.75	4.69	10.75
128	10.53	4.90	10.53
130	10.36	5.21	10.36
132	10.39	5.15	10.39
134	10.54	5.01	10.54
136	10.40	4.96	10.40
138	10.30	5.34	10.30

**Cuadro A.22.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $\tau$ / (N · m)	D12, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
140	10.30	4.99	10.30
142	10.26	4.99	10.26
144	10.22	5.21	10.22
146	10.27	5.12	10.27
148	10.25	5.21	10.25
150	10.24	5.10	10.24
152	10.20	5.01	10.20
154	10.20	5.23	10.20
156	10.01	5.18	10.01
158	10.25	5.10	10.25
160	9.94	5.15	9.94
162	10.00	5.15	10.00
164	9.87	5.10	9.87
166	9.93	5.18	9.93
168	9.77	5.21	9.77
170	9.76	5.12	9.76
172	9.67	5.45	9.67
174	9.67	5.34	9.67
176	9.67	5.25	9.67
178	9.63	5.21	9.63
180	9.71	5.42	9.71
182	9.53	5.28	9.53
184	9.50	5.18	9.50
186	9.48	5.23	9.48
188	9.34	5.28	9.34
190	9.35	5.36	9.35
192	9.29	5.25	9.29
194	9.47	5.39	9.47
196	9.30	5.31	9.30
198	9.35	5.31	9.35
200	9.25	5.42	9.25
202	9.25	5.28	9.25
204	9.08	5.45	9.08
206	9.17	5.42	9.17
208	9.11	5.56	9.11

**Cuadro A.23.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $\tau$ / (N · m)	D12, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
210	9.03	5.28	9.03
212	9.05	5.25	9.05
214	8.94	5.39	8.94
216	8.98	5.28	8.98
218	8.91	5.39	8.91
220	8.91	5.31	8.91
222	8.98	5.34	8.98
224	8.88	5.45	8.88
226	8.86	5.39	8.86
228	8.78	5.25	8.78
230	8.78	5.31	8.78
232	8.75	5.25	8.75
234	8.78	5.12	8.78
236	8.64	5.28	8.64
238	8.73	5.18	8.73
240	8.69	5.25	8.69
242	8.64	5.18	8.64
244	8.67	5.10	8.67
246	8.65	5.10	8.65
248	8.58	5.04	8.58
250	8.56	5.07	8.56
252	8.48	5.07	8.48
254	8.69	5.01	8.69
256	8.60	5.04	8.60
258	8.57	4.99	8.57
260	8.49	5.21	8.49
262	8.48	5.01	8.48
264	8.27	4.99	8.27
266	8.34	4.93	8.34
268	8.34	4.79	8.34
270	8.41	4.96	8.41
272	8.36	5.01	8.36
274	8.49	4.96	8.49
276	8.46	4.96	8.46
278	8.34	4.88	8.34

**Cuadro A.24.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $\tau$ / (N · m)	D12, $\tau$ / (N · m)	R, $\tau$ / (N · m)
280	8.33	4.76	8.33
282	8.22	4.90	8.22
284	8.34	4.96	8.34
286	8.26	4.79	8.26
288	8.29	4.72	8.29
290	8.34	4.75	8.34
292	8.16	4.88	8.16
294	8.24	4.82	8.24
296	8.13	4.85	8.13
298	8.16	4.75	8.16
300	8.17	4.96	8.17

**Cuadro A.25.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER.

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $T$ / (°C)	D2, $T$ / (°C)	D3, $T$ / (°C)	D4, $T$ / (°C)	D5, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
0	198	200	198	198	200	198
2	159	176	162	163	164	176
4	154	169	156	156	159	165
6	149	164	154	149	157	157
8	147	161	153	148	154	151
10	148	160	153	148	154	149
12	150	160	153	150	154	151
14	154	162	155	154	156	153
16	158	163	158	157	160	157
18	162	166	162	160	164	159
20	164	169	165	163	167	162
22	167	171	168	165	169	164
24	169	173	171	167	171	166
26	171	175	173	170	174	169
28	173	177	175	172	176	171



**Cuadro A.26.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $T$ / (°C)	D2, $T$ / (°C)	D3, $T$ / (°C)	D4, $T$ / (°C)	D5, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
30	175	179	177	174	178	173
32	177	181	179	177	180	175
34	179	182	181	179	181	177
36	181	184	182	181	183	178
38	182	186	184	182	185	180
40	184	188	183	184	187	182
42	185	189	186	186	188	183
44	187	190	188	187	189	185
46	188	190	189	189	190	186
48	189	191	190	189	190	187
50	189	192	191	189	191	188
52	190	193	191	189	191	188
54	190	193	192	190	192	189
56	191	195	192	191	193	190
58	191	195	192	191	193	191
60	191	196	193	191	193	191
62	192	196	193	191	194	191
64	192	196	194	192	195	191
66	192	197	195	192	195	192
68	192	197	195	192	196	192
70	193	198	195	193	196	192
72	193	198	196	192	196	193
74	193	198	196	193	197	193
76	193	198	196	194	198	193
78	193	198	196	194	197	193
80	193	199	196	193	197	194
82	194	199	196	193	197	194
84	194	199	197	194	198	194
86	194	199	197	194	198	195
88	194	199	197	194	198	195
90	195	199	197	194	198	195
92	194	200	197	195	198	196
94	195	200	198	195	198	196
96	195	200	198	195	198	196
98	195	200	198	195	198	196

**Cuadro A.27.** Datos de corridas 1 a 5 obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $T$ / (°C)	D2, $T$ / (°C)	D3, $T$ / (°C)	D4, $T$ / (°C)	D5, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
100	195	200	198	195	198	197
102	195	200	198	195	199	196
104	195	200	198	195	199	197
106	195	200	198	195	199	197
108	196	200	198	195	199	197
110	196	200	198	195	199	197
112	196	200	198	195	199	197
114	196	201	199	196	200	197
116	196	201	199	196	200	197
118	196	201	199	196	200	197
120	196	201	199	196	200	198
122	197	201	199	197	200	198
124	197	202	199	197	200	198
126	197	202	200	197	200	198
128	197	202	200	197	201	198
130	197	202	200	198	200	198
132	198	202	200	199	201	199
134	198	202	200	199	201	199
136	198	202	200	199	201	199
138	198	202	200	199	201	199
140	198	202	200	199	201	199
142	199	202	200	199	201	199
144	199	202	200	199	201	199
146	199	202	201	199	201	199
148	199	203	201	199	201	199
150	199	203	201	199	201	200
152	199	203	201	199	202	200
154	200	203	201	199	202	200
156	200	203	201	200	202	200
158	200	203	201	200	202	200
160	200	203	201	200	202	200
162	200	203	201	200	202	201
164	200	203	202	200	202	201
166	200	203	202	200	202	201
168	200	203	202	200	202	201

**Cuadro A.28.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $T$ / (°C)	D2, $T$ / (°C)	D3, $T$ / (°C)	D4, $T$ / (°C)	D5, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
170	200	204	202	200	202	201
172	200	204	202	200	203	201
174	200	204	202	201	203	201
176	200	204	202	201	203	201
178	200	204	202	201	203	202
180	200	204	202	201	203	202
182	200	204	202	201	203	202
184	200	204	203	201	203	202
186	200	204	203	201	203	202
188	200	204	203	202	203	202
190	201	204	203	202	204	202
192	201	204	203	202	204	203
194	201	205	203	202	204	203
196	201	204	203	202	204	203
198	201	205	203	202	204	203
200	201	205	203	202	204	203
202	201	205	204	202	204	203
204	201	205	204	202	204	203
206	201	205	204	202	204	203
208	202	205	204	202	204	203
210	202	205	204	203	204	204
212	202	205	204	203	205	203
214	202	205	204	203	205	204
216	202	205	204	203	205	204
218	202	205	204	203	205	204
220	202	205	204	203	205	204
222	202	205	204	203	205	204
224	202	205	204	203	205	204
226	202	205	204	203	205	204
228	202	205	205	203	205	204
230	203	205	204	204	205	204
232	203	205	205	203	205	204
234	203	205	205	204	205	204
236	203	205	205	204	205	204
238	203	206	205	204	205	204

**Cuadro A.29.** Datos de corridas 1 a 5, obtenidos de ensayos de reología en BRA-BENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D1, $T$ / (°C)	D2, $T$ / (°C)	D3, $T$ / (°C)	D4, $T$ / (°C)	D5, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
240	203	206	205	204	205	204
242	203	205	205	204	205	205
244	203	205	205	204	205	205
246	203	206	205	204	205	205
248	203	206	205	204	205	205
250	203	206	205	204	205	205
252	204	206	205	204	205	205
254	204	206	205	204	205	205
256	204	206	205	204	205	205
258	204	206	205	204	205	205
260	204	206	205	204	205	205
262	204	206	205	204	205	205
264	204	206	205	204	205	205
266	204	206	205	204	206	205
268	204	206	205	204	206	205
270	204	206	205	204	205	205
272	204	206	205	204	205	205
274	204	206	205	204	206	205
276	204	206	205	204	205	205
278	204	206	205	204	205	205
280	204	206	205	204	206	205
282	204	206	205	204	206	205
284	204	206	205	204	206	205
286	204	206	205	204	206	205
288	204	206	205	204	205	205
290	204	206	205	204	205	205
292	204	206	205	204	206	205
294	204	206	205	205	205	205
296	204	206	205	205	206	205
298	204	206	205	205	206	205
300	204	206	205	205	206	205

**Cuadro A.30.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER.

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $T$ / (°C)	D7, $T$ / (°C)	D8, $T$ / (°C)	D9, $T$ / (°C)	D10, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
0	198	199	200	200	199	198
2	160	167	181	166	159	176
4	153	157	160	157	150	165
6	150	151	154	152	142	157
8	149	151	152	151	144	151
10	150	153	151	151	148	149
12	151	156	151	152	151	151
14	155	159	154	155	152	153
16	158	162	157	159	156	157
18	161	164	161	162	160	159
20	164	166	164	165	162	162
22	167	169	166	167	164	164
24	169	171	169	169	167	166
26	171	174	172	171	169	169
28	173	176	174	173	171	171
30	175	178	175	176	173	173
32	177	181	177	177	176	175
34	178	183	179	180	177	177
36	180	185	181	181	179	178
38	182	187	182	183	180	180
40	183	189	184	185	182	182
42	185	190	186	186	183	183
44	186	191	187	187	184	185
46	187	192	189	188	185	186
48	188	193	190	189	187	187
50	189	193	191	190	187	188
52	190	194	192	191	188	188
54	191	195	193	191	188	189
56	191	196	194	192	189	190
58	192	196	195	192	189	191
60	192	197	195	193	190	191
62	193	197	195	193	190	191
64	193	198	195	194	191	191
66	193	198	195	195	191	192
68	193	198	195	195	191	192

**Cuadro A.31.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $T$ / (°C)	D7, $T$ / (°C)	D8, $T$ / (°C)	D9, $T$ / (°C)	D10, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
70	193	198	196	195	192	192
72	193	199	196	195	192	193
74	193	199	196	196	192	193
76	193	199	196	196	192	193
78	194	200	196	196	192	193
80	193	200	196	196	192	194
82	193	200	196	196	192	194
84	193	200	196	197	192	194
86	193	200	196	197	192	195
88	193	200	196	197	193	195
90	193	200	196	197	193	195
92	194	200	196	197	193	196
94	194	200	196	197	193	196
96	194	200	196	197	193	196
98	194	201	196	198	194	196
100	194	201	196	198	194	197
102	194	201	196	198	194	196
104	195	201	196	198	194	197
106	194	201	196	198	194	197
108	194	201	196	198	195	197
110	195	201	196	198	195	197
112	195	202	197	199	195	197
114	195	202	197	199	195	197
116	195	202	197	199	195	197
118	195	202	197	199	195	197
120	195	202	197	199	195	198
122	195	202	197	199	195	198
124	195	202	197	200	195	198
126	195	202	197	200	195	198
128	196	202	198	200	195	198
130	196	202	198	200	195	198
132	196	203	198	200	195	199
134	196	203	198	200	195	199
136	196	203	198	201	195	199
138	196	203	198	201	195	199

**Cuadro A.32.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $T$ / (°C)	D7, $T$ / (°C)	D8, $T$ / (°C)	D9, $T$ / (°C)	D10, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
140	197	203	198	201	195	199
142	197	203	198	201	195	199
144	197	203	198	201	195	199
146	197	203	199	201	195	199
148	197	203	199	202	195	199
150	197	204	199	202	195	200
152	197	204	199	202	196	200
154	197	204	199	202	196	200
156	197	204	199	202	196	200
158	197	204	200	202	196	200
160	197	204	200	202	196	200
162	198	204	200	202	196	201
164	198	204	200	202	197	201
166	198	204	200	202	196	201
168	198	204	200	202	196	201
170	198	204	200	203	197	201
172	198	204	200	203	197	201
174	198	204	201	202	197	201
176	198	204	201	202	197	201
178	198	204	201	202	197	202
180	198	204	201	202	197	202
182	198	205	201	203	197	202
184	198	205	201	203	197	202
186	199	205	201	203	197	202
188	199	205	201	203	197	202
190	199	205	201	203	197	202
192	199	205	201	203	196	203
194	199	205	201	203	197	203
196	199	205	201	203	196	203
198	200	205	201	203	197	203
200	200	205	202	203	196	203
202	200	205	202	203	196	203
204	200	205	202	203	196	203
206	200	205	202	203	196	203
208	200	205	202	204	197	203

**Cuadro A.33.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $T$ / (°C)	D7, $T$ / (°C)	D8, $T$ / (°C)	D9, $T$ / (°C)	D10, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
210	200	205	202	204	197	204
212	200	205	202	204	196	203
214	200	205	202	204	197	204
216	201	205	202	204	197	204
218	201	205	201	204	197	204
220	201	205	201	204	197	204
222	201	205	201	204	197	204
224	201	205	201	204	198	204
226	201	206	201	204	197	204
228	201	206	201	204	198	204
230	201	206	201	204	198	204
232	201	206	201	204	198	204
234	201	206	201	204	197	204
236	202	206	201	204	198	204
238	202	206	201	204	198	204
240	202	206	201	205	198	204
242	202	206	201	205	198	205
244	202	206	201	205	198	205
246	202	206	201	205	198	205
248	202	206	201	205	198	205
250	202	206	201	205	198	205
252	202	206	201	205	198	205
254	202	206	201	205	198	205
256	202	206	201	205	198	205
258	202	206	201	205	198	205
260	202	206	201	205	198	205
262	202	206	201	205	198	205
264	202	206	202	205	198	205
266	202	206	202	205	198	205
268	202	206	202	205	198	205
270	202	206	202	205	198	205
272	202	206	202	205	198	205
274	202	206	202	205	198	205
276	202	206	202	205	198	205
278	202	206	202	205	198	205



**Cuadro A.34.** Datos de corridas 6 a 10, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D6, $T$ / (°C)	D7, $T$ / (°C)	D8, $T$ / (°C)	D9, $T$ / (°C)	D10, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
280	203	206	202	205	198	205
282	203	206	202	205	198	205
284	203	206	202	205	198	205
286	203	206	202	205	198	205
288	203	206	202	205	198	205
290	203	206	202	205	198	205
292	203	206	202	205	198	205
294	203	206	202	205	198	205
296	203	206	202	205	198	205
298	203	206	202	205	198	205
300	203	206	202	205	198	205

**Cuadro A.35.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER.

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $T$ / (°C)	D12, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
0	198	200	198
2	176	163	176
4	165	157	165
6	157	151	157
8	151	148	151
10	149	149	149
12	151	151	151
14	153	154	153
16	157	157	157
18	159	160	159
20	162	163	162
22	164	165	164
24	166	168	166
26	169	170	169
28	171	172	171

**Cuadro A.36.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $T$ / (°C)	D12, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
30	173	174	173
32	175	176	175
34	177	178	177
36	178	179	178
38	180	181	180
40	182	182	182
42	183	183	183
44	185	185	185
46	186	186	186
48	187	187	187
50	188	188	188
52	188	189	188
54	189	190	189
56	190	191	190
58	191	191	191
60	191	192	191
62	191	192	191
64	191	192	191
66	192	192	192
68	192	192	192
70	192	192	192
72	193	193	193
74	193	193	193
76	193	193	193
78	193	193	193
80	194	193	194
82	194	194	194
84	194	195	194
86	195	195	195
88	195	195	195
90	195	195	195
92	196	195	196
94	196	195	196
96	196	195	196
98	196	195	196

**Cuadro A.37.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $T$ / (°C)	D12, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
100	197	195	197
102	196	195	196
104	197	195	197
106	197	195	197
108	197	195	197
110	197	195	197
112	197	195	197
114	197	195	197
116	197	196	197
118	197	196	197
120	198	196	198
122	198	196	198
124	198	196	198
126	198	196	198
128	198	197	198
130	198	197	198
132	199	197	199
134	199	197	199
136	199	197	199
138	199	197	199
140	199	197	199
142	199	197	199
144	199	197	199
146	199	197	199
148	199	197	199
150	200	197	200
152	200	197	200
154	200	197	200
156	200	196	200
158	200	196	200
160	200	196	200
162	201	196	201
164	201	196	201
166	201	196	201
168	201	196	201

**Cuadro A.38.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $T$ / (°C)	D12, $T$ / (°C)	R, $T$ / (°C)
170	201	196	201
172	201	196	201
174	201	196	201
176	201	197	201
178	202	196	202
180	202	197	202
182	202	197	202
184	202	197	202
186	202	197	202
188	202	197	202
190	202	197	202
192	203	197	203
194	203	197	203
196	203	197	203
198	203	197	203
200	203	197	203
202	203	197	203
204	203	197	203
206	203	197	203
208	203	198	203
210	204	197	204
212	203	197	203
214	204	197	204
216	204	197	204
218	204	197	204
220	204	197	204
222	204	198	204
224	204	198	204
226	204	198	204
228	204	198	204
230	204	198	204
232	204	198	204
234	204	198	204
236	204	198	204
238	204	198	204

**Cuadro A.39.** Datos de corridas 11 a 12, obtenidos de ensayos de reología en BRABENDER (Continuación).

Tiempo, $t$ / (s)	D11, $T$ / ( $^{\circ}\text{C}$ )	D12, $T$ / ( $^{\circ}\text{C}$ )	R, $T$ / ( $^{\circ}\text{C}$ )
240	204	198	204
242	205	198	205
244	205	198	205
246	205	198	205
248	205	198	205
250	205	198	205
252	205	198	205
254	205	198	205
256	205	199	205
258	205	199	205
260	205	199	205
262	205	199	205
264	205	199	205
266	205	199	205
268	205	199	205
270	205	199	205
272	205	199	205
274	205	199	205
276	205	199	205
278	205	199	205
280	205	199	205
282	205	199	205
284	205	200	205
286	205	200	205
288	205	199	205
290	205	200	205
292	205	200	205
294	205	200	205
296	205	200	205
298	205	200	205
300	205	200	205

**Cuadro A.40.** Parámetros reológicos del diseño de cribado.

Corrida	Aumento de torsión de carga, $A /(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión mínimo, $B/(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión, máximo $X/(\text{N} \cdot \text{m})$	Tiempo de fusión, $T_f/(\text{s})$
D1	13.9	8.7	12.1	50
D2	21.2	15.6	16.1	20
D3	20.4	13.2	14.3	28
D4	14.4	7.9	11.4	46
D5	19.5	12.8	14.1	28
D6	15.0	8.6	10.3	44
D7	16.5	9.8	13.1	32
D8	15.8	7.9	9.0	56
D9	25.7	13.5	15.2	34
D10	13.1	4.3	5.3	200
D11	26.4	10.9	12.3	70
D12	12.4	5.1	5.6	202

**Cuadro A.41.** Parámetros reológicos del diseño de superficie.

Corrida	Aumento de torsión de carga, $A /(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión mínimo, $B/(\text{N} \cdot \text{m})$	Aumento de torsión, máximo $X/(\text{N} \cdot \text{m})$	Tiempo de fusión, $T_f/(\text{s})$
C1	16.0	12.1	12.5	26
C2	19.8	14.4	16.1	28
C3	17.2	10.6	12.8	40
C4	14.4	7.9	11.9	46
C5	14.7	8.5	10.5	48
C6	17.2	10.9	12.2	34
C7	17.2	10.7	11.9	40
C8	15.5	9.1	11.3	45
C9	16.2	7.4	10.7	35
C10	15.2	7.7	10.1	54
C11	39.0	12.1	11.8	28
C12	44.4	15.8	15.8	35
C13	17.8	9.2	9.8	34
C14	17.9	8.7	8.8	30
C15	24.5	12.4	11.5	30

**Cuadro A.42.** Parámetros reológicos del diseño de superficie.

Corrida	Aumento de torsión de carga, $A$ /( $N \cdot m$ )	Aumento de torsión mínimo, $B$ /( $N \cdot m$ )	Aumento de torsión, máximo $X$ /( $N \cdot m$ )	Tiempo de fusión, $T_f$ /(s)
C16	19.1	8.1	8.6	54
C17	12.4	5.8	6.8	202
C18	16.0	12.1	12.8	26
C19	17.0	12.5	13.7	28
C20	17.1	12.2	13.5	28
C21	16.3	9.7	12.7	46
C22	14.6	6.5	10.4	55

**Cuadro A.43.** Parámetros de trabajo para las sustancias a utilizar.

Propiedad	Agua	PVC	Unidades
Capacidad calorífica, $c$	4.184	0.97	kJ/kg K
Temperatura de película promedio, $T_f$	14	123	°C
Temperatura caliente, $T_H$	18	200	°C
Temperatura fría, $T_C$	10	45	°C
Cambio de temperatura, $\Delta T$	8	155	°C
Velocidad, $v$	0.20	N/A	m/s
Densidad, $\rho$	999.1	1 373	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad dinámica, $\mu$	0.001	N/A	kg/m $\cdot$ s
Número de Prandlt, $Pr$	8.090	N/A	adim
Conductividad térmica, $k$	5.89E-04	1.30E-04	kW/m K
Longitud característica, $L_c$	N/A	2	m

**Cuadro A.44.** Producción promedio mensual de tubería en extrusión.

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Producción conforme, $P_c/(\text{kg})$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	97 844	-	-	-	64 199	8 902
18	-	28 243	-	-	6 776	-
25	-	13 910	20 354	-	14 204	4 841
31	-	9 593	2 352	2 260	-	1 537
38	-	22 769	14 088	6 532	5 707	6 292
50	-	60 062	40 425	68 412	74 875	19 913
62	-	2 928	1 989	171	-	3 258
75	2 578	22 052	26 836	24 060	3 907	12 712
100	10 792	32 190	65 380	86 725	58 949	45 483
150	17 845	18 453	41 068	40 521	-	16 241
200	13 147	23 759	20 885	16 703	437	6 888
250	13 180	17 932	13 366	876	-	1 653
300	-	1 921	10 912	647	-	14 232
375	-	-	1 444	-	-	17 573



**Cuadro A.45.** Rendimiento de los productos de extrusión.

Diámetro, $d$ /(mm)	Rendimiento, $R$ /(kg/h)					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	163	-	-	-	132	110
18	-	156	-	-	-	-
25	-	159	168	-	151	-
31	-	204	185	178	-	191
38	-	203	193	182	159	203
50	-	409	347	295	289	202
62	-	391	415	-	-	334
75	247	474	447	410	319	312
100	314	490	496	458	382	407
150	323	532	562	515	-	544
200	348	554	575	528	539	553
250	355	617	614	473	-	590
300	-	311	650	144	-	605
375	-	-	546	-	-	600

**Cuadro A.46.** Masas de los productos de extrusión.

Diámetro, $d/si(mm)$	Masas, $m/(kg)$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	0.87	-	-	-	0.73	0.69
18	-	1.11	-	-	0.96	-
25	-	1.74	1.37	-	1.43	-
31	-	2.79	1.87	1.76	-	1.45
38	-	3.65	2.43	2.01	1.96	1.67
50	-	5.71	3.80	3.06	2.34	2.53
62	-	8.34	5.55	4.48	-	3.60
75	20.66	12.36	8.31	6.68	6.49	3.60
100	24.93	20.45	13.65	11.01	9.76	8.82
150	69.57	44.34	29.68	23.92	-	19.13
200	121.78	75.16	50.29	40.45	35.13	32.28
250	114.85	118.32	77.96	62.99	-	50.20
300	-	166.56	109.76	88.55	-	71.74
375	-	-	157.96	-	-	102.84

## B. Datos Intermedios

**Cuadro B.1.** OEE por producto producido en la línea TS-108.

Producto	OEE /( $\%$ )
SDR 13.5	65.8
SDR 17.0	76.3
SDR 26.0	83.6
SDR 32.5	88.4

**Cuadro B.2.** Valores obtenidos de Razón de rendimiento para cada equipo.

Línea	Ene /(%)	Feb /(%)	Mar /(%)	Abr /(%)	May /(%)	Jun /(%)	Jul /(%)	Ago /(%)	Sept /(%)	Total /(%)
DEKUMA	0.0	104.8	108.0	107.0	110.0	104.2	107.4	106.0	0.0	106.0
DSK 62-3	0.0	0.0	102.1	101.6	102.9	107.3	106.1	0.0	0.0	124.5
KMD 114-2	111.1	120.8	110.1	104.2	102.8	104.5	104.8	103.6	106.0	108.2
KMD 114-3	105.3	106.6	107.0	104.6	104.6	105.2	105.0	124.9	113.2	108.1
KMD 75	99.6	106.0	105.4	103.8	104.6	107.7	105.2	103.8	103.7	104.5
KMD 90-1	105.7	105.4	103.1	103.2	104.8	104.8	104.1	105.1	105.5	104.5
KMD 90-2	109.6	121.7	124.1	116.3	109.5	118.6	115.7	108.7	100.1	113.6
TREX 90-1	106.4	108.0	104.2	108.8	105.0	107.0	105.8	105.1	110.3	106.7
TS 100-2	108.5	104.9	107.9	107.9	106.9	105.1	106.6	104.8	105.3	106.5
TS 108	88.2	81.0	81.9	76.6	78.7	73.5	72.7	67.1	78.0	77.7
TS 80-1	98.2	123.1	120.3	113.4	105.6	104.8	108.0	111.6	108.9	110.1
Total	102.9	104.8	104.6	102.8	100.0	101.5	101.2	101.3	101.8	102.8

**Cuadro B.3.** Valores obtenidos de Razón de disponibilidad para cada equipo.

Línea	Ene /(%)	Feb /(%)	Mar /(%)	Abr /(%)	May /(%)	Jun /(%)	Jul /(%)	Ago /(%)	Sept /(%)	Total /(%)
DEKUMA	0.0	72.3	66.6	73.4	63.0	70.5	66.1	78.3	0.0	71.9
DSK 62-3	0.0	0.0	90.2	85.0	80.1	71.0	76.9	0.0	0.0	80.1
KMD 114-2	86.5	87.6	94.0	86.2	74.1	89.5	91.2	93.2	62.9	83.5
KMD 114-3	81.4	90.9	90.5	92.3	91.5	93.3	91.1	89.2	88.1	89.5
KMD 75	94.5	71.7	90.5	83.5	79.6	73.7	87.0	93.6	90.4	84.0
KMD 90-1	79.1	79.7	77.7	81.0	71.3	76.3	81.4	72.0	65.6	76.0
KMD 90-2	70.6	70.0	61.9	69.2	70.1	71.5	69.9	69.3	85.6	70.5
TREX 90-1	73.1	72.5	36.8	70.2	80.3	78.8	80.2	88.6	92.5	77.3
TS 100-2	88.7	90.4	77.0	72.0	77.3	77.9	79.5	86.5	78.2	80.6
TS 108	72.5	60.6	53.9	53.3	59.1	62.6	53.3	73.4	69.0	61.1
TS 80-1	84.9	87.3	87.3	88.4	82.5	80.6	81.4	85.7	85.0	84.3
Total	79.1	76.4	74.8	75.6	75.0	75.6	77.1	80.9	78.9	76.8

**Cuadro B.4.** Valores obtenidos de Razón de calidad para cada equipo.

Línea	Ene /(%)	Feb /(%)	Mar /(%)	Abr /(%)	May /(%)	Jun /(%)	Jul /(%)	Ago /(%)	Sept /(%)	Total /(%)
DEKUMA	0.0	95.4	92.6	93.4	90.9	95.9	93.1	94.4	0.0	94.2
DSK 62-3	0.0	0.0	97.9	98.4	97.2	93.2	94.2	0.0	0.0	96.3
KMD 114-2	90.4	94.1	96.5	96.0	97.3	95.7	95.4	96.6	94.3	95.4
KMD 114-3	94.9	93.8	93.5	95.6	95.6	95.1	95.2	93.8	94.5	94.7
KMD 75	93.6	94.3	94.9	96.3	95.6	92.9	95.1	96.3	96.5	95.1
KMD 90-1	94.5	94.8	97.0	96.9	95.4	95.5	96.1	95.1	94.8	95.6
KMD 90-2	95.5	95.5	96.1	95.4	93.5	95.6	95.0	95.6	97.0	95.6
TREX 90-1	94.0	92.6	96.0	91.9	95.2	93.5	94.5	95.2	94.9	94.1
TS 100-2	92.2	95.3	92.7	92.7	93.5	95.1	93.8	95.4	95.0	93.9
TS 108	86.4	90.4	92.3	91.0	96.0	94.5	93.6	93.9	95.7	92.5
TS 80-1	96.7	94.7	96.1	94.8	94.7	95.4	92.6	95.1	91.8	94.6
Total	93.0	94.1	94.7	94.8	95.2	94.8	94.6	94.9	95.2	94.6

**Cuadro B.5.** Valores obtenidos de la OEE para cada equipo.

Línea	Ene /(%)	Feb /(%)	Mar /(%)	Abr /(%)	May /(%)	Jun /(%)	Jul /(%)	Ago /(%)	Sept /(%)	Total /(%)
DEKUMA	0.0	72.3	66.6	73.4	63.0	70.5	66.1	78.3	0.0	71.8
DSK 62-3	0.0	0.0	90.2	85.0	80.1	71.0	76.9	0.0	0.0	96.0
KMD 114-2	86.9	99.6	99.9	86.2	74.1	89.5	91.2	93.2	62.9	86.2
KMD 114-3	81.4	90.9	90.5	92.3	91.5	93.3	91.1	104.6	94.3	91.7
KMD 75	88.0	71.7	90.5	83.5	79.6	73.7	87.0	93.6	90.4	83.5
KMD 90-1	79.0	79.7	77.7	81.0	71.3	76.3	81.4	72.0	65.6	76.0
KMD 90-2	73.9	81.4	73.8	76.8	71.7	81.2	76.9	72.0	83.1	76.5
TREX 90-1	73.2	72.5	36.8	70.2	80.3	78.8	80.2	88.6	96.9	77.6
TS 100-2	88.7	90.4	77.0	72.0	77.3	77.9	79.5	86.5	78.2	80.6
TS 108	55.2	44.4	40.7	37.2	44.6	43.5	36.3	46.2	51.5	43.9
TS 80-1	80.7	101.9	100.9	95.1	82.5	80.6	81.4	91.0	85.0	87.9
Total	75.7	75.3	74.1	73.6	71.4	72.7	73.8	77.8	76.5	74.7

**Cuadro B.6.** Deseabilidad calculada para los parámetros reológicos en el diseño de cribado.

Corrida	Deseabilidad				
	Compuesta	$A$	$B$	$X$	$t_F$
D1	0.88	0.85	0.87	0.85	0.98
D2	0.56	0.96	0.52	0.63	0.36
D3	0.81	0.97	0.73	0.92	0.64
D4	0.84	0.87	0.78	0.80	0.99
D5	0.83	0.98	0.77	0.96	0.64
D6	0.83	0.90	0.86	0.70	1.00
D7	0.91	0.95	0.98	0.94	0.76
D8	0.76	0.93	0.78	0.60	0.97
D9	0.78	0.89	0.71	0.77	0.81
D10	0.41	0.82	0.37	0.28	0.57
D11	0.90	0.88	0.93	0.88	0.93
D12	0.45	0.79	0.48	0.30	0.56

**Cuadro B.7.** Deseabilidad calculada para los parámetros reológicos en el diseño de superficie.

Corrida	Deseabilidad				
	Compuesta	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	$t_F$
D21	0.80	0.93	0.82	0.89	0.58
D22	0.67	0.97	0.63	0.63	0.64
D23	0.94	0.98	0.95	0.91	0.95
D24	0.86	0.87	0.78	0.84	0.99
D25	0.83	0.88	0.85	0.72	0.99
D26	0.89	0.98	0.92	0.87	0.81
D27	0.91	0.98	0.94	0.84	0.95
D28	0.88	0.92	0.91	0.79	0.99
D29	0.78	0.94	0.73	0.74	0.84
D30	0.79	0.91	0.77	0.69	0.97
D31	0.76	0.65	0.83	0.83	0.64
D32	0.62	0.50	0.50	0.68	0.84
D33	0.80	1.00	0.92	0.66	0.81
D34	0.73	1.00	0.87	0.58	0.70
D35	0.79	0.91	0.80	0.80	0.70
D36	0.76	0.98	0.81	0.56	0.97
D37	0.52	0.79	0.55	0.41	0.56
D38	0.81	0.93	0.82	0.91	0.58
D39	0.85	0.97	0.79	0.99	0.64
D40	0.85	0.97	0.81	0.97	0.64
D41	0.95	0.95	0.97	0.91	0.99
D42	0.76	0.88	0.63	0.71	0.97
R	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**Cuadro B.8.** Termodinámica de enfriamiento para perfiles ( $L_c = 2$  m).

Producto	Cambio energía interna teórica $\Delta U / (\text{MJ})$	Resistencia térmica convección $R_{cv} / (\text{K/kW})$	Resistencia térmica Conducción $R_{cond} /$ $(\text{K/kW})$	Resistencia térmica equivalente $R_e / (\text{K/kW})$
Canoa	16 454	7.28	9.91	17.19
Perfil 1	4 302	21.85	29.72	51.57
Perfil 2	5 373	21.85	29.72	51.57



**Cuadro B.9.** Termodinámica de enfriamiento para perfiles ( $L_c = 6$  m).

Producto	Cambio energía interna teórica $\Delta U/(\text{MJ})$	Resistencia térmica convección $R_{cv}/(\text{K/kW})$	Resistencia térmica Conducción $R_{cond}/$ $(\text{K/kW})$	Resistencia térmica equivalente $R_e/(\text{K/kW})$
Canoa	16 454	4.20	3.30	7.51
Perfil 1	4 302	12.61	9.91	22.52
Perfil 2	5 373	12.61	9.91	22.52

**Cuadro B.10.** Transferencia de energía para perfiles ( $L_c = 2$  m).

Producto	Tasa de transferencia de energía, $\dot{Q}/(\text{kW})$	Tiempo disponible de transferencia, $t/(\text{s})$	Cambio de energía interna real, $\Delta U/(\text{MJ})$
Canoa	11.05	1 641 570	18 146
Perfil 1	3.68	468 196	1 725
Perfil 2	3.68	459 493	1 693

**Cuadro B.11.** Transferencia de energía para perfiles ( $L_c = 6$  m).

Producto	Tasa de transferencia de energía, $\dot{Q}/(\text{kW})$	Tiempo disponible de transferencia, $t/(\text{s})$	Cambio de energía interna real, $\Delta U/(\text{MJ})$
Canoa	25.31	1 641 570	41 551
Perfil 1	8.44	468 196	3 950
Perfil 2	8.44	459 493	3 877

**Cuadro B.12.** Cambio de energía interna para el enfriamiento de tuberías.

Diámetro, $d$ /(mm)	Cambio de energía interna, $\Delta U$ /(MJ)					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	14 711	-	-	-	9 652	1 338
18	-	4 246	-	-	1 019	-
25	-	2 091	3 060	-	2 136	728
31	-	1 442	354	340	-	231
38	-	3 423	2 118	982	858	946
50	-	9 030	6 078	10 286	11 257	2 994
62	-	440	299	26	-	490
75	388	3 315	4 035	3 617	587	1 911
100	1 623	4 840	9 830	13 039	8 863	6 838
150	2 683	2 774	6 175	6 092	-	2 442
200	1 977	3 572	3 140	2 511	66	1 036
250	1 982	2 696	2 010	132	-	249
300	-	289	1 641	97	-	2 140
375	-	-	217	-	-	2 642

**Cuadro B.13.** Resistencia térmica de transferencia por convección para tuberías ( $L_c = 2$  m).

Diámetro, $d$ /(mm)	Número de Reynolds, $Re/(10^3)$	Número de Nusselt, $Nu/(10)$	Área superficial, $A_S/(m^2)$	Coficiente de transfe- rencia, $h$ / (kW/m <sup>2</sup> · K)	Resistencia térmica de convección, $R_{cv}/(K/kW)$
12	2.11	5.77	0.08	2.83	4.68
18	3.16	7.14	0.11	2.33	3.79
25	4.39	8.49	0.16	2.00	3.18
31	5.44	9.53	0.19	1.81	2.84
38	6.67	10.6	0.24	1.65	2.54
50	8.78	12.4	0.31	1.46	2.19
62	10.9	13.9	0.39	1.32	1.94
75	13.2	15.5	0.47	1.22	1.75
100	17.6	18.2	0.63	1.07	1.48
150	26.3	23.1	0.94	0.91	1.17
200	35.1	27.4	1.26	0.81	0.99
250	43.9	31.4	1.57	0.74	0.86
300	52.7	35.2	1.88	0.69	0.77
375	65.8	40.6	2.36	0.64	0.67

**Cuadro B.14.** Resistencia térmica de transferencia por convección para tuberías ( $L_c = 6$  m).

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Número de Reynolds, $Re/(10^3)$	Número de Nusselt, $Nu/(10)$	Área superficial, $A_S/(\text{m}^2)$	Coefficiente de transfe- rencia, $h/$ ( $\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )	Resistencia térmica de convección, $R_{cv}/(\text{K}/\text{kW})$
12	2.11	5.77	0.23	2.83	1.56
18	3.16	7.14	0.34	2.33	1.26
25	4.39	8.49	0.47	2.00	1.06
31	5.44	9.53	0.58	1.81	0.95
38	6.67	10.6	0.72	1.65	0.85
50	8.78	12.4	0.94	1.46	0.73
62	10.9	13.9	1.17	1.32	0.65
75	13.2	15.5	1.41	1.22	0.58
100	17.6	18.2	1.88	1.07	0.49
150	26.3	23.1	2.83	0.91	0.39
200	35.1	27.4	3.77	0.81	0.33
250	43.9	31.4	4.71	0.74	0.29
300	52.7	35.2	5.65	0.69	0.26
375	65.8	40.6	7.07	0.64	0.22

**Cuadro B.15.** Resistencia térmica de transferencia por conducción para tuberías ( $L_c = 2$  m).

Relación estándar de diámetro, SDR $/(\text{adim})$	Resistencia térmica de conducción, $R_{cond}/(\text{K}/\text{kW})$
13.5	98.2
17.0	76.6
26.0	49.0
32.5	38.9
40.0	31.4
41.0	30.6

**Cuadro B.16.** Resistencia térmica de transferencia por conducción para tuberías ( $L_c = 6$  m).

Relación estándar de diámetro, SDR /(adim)	Resistencia térmica de conducción, $R_{cond}/$ (K/kW)
13.5	32.7
17.0	25.5
26.0	16.3
32.5	13.0
40.0	10.5
41.0	10.2

**Cuadro B.17.** Resistencia equivalente de transferencia para tuberías ( $L_c = 2$  m).

Diámetro, $d/$ (mm)	Resistencia equivalente, $R_e/$ (K/kW)					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	102.83	81.30	53.68	43.56	36.08	35.29
18	101.94	80.40	52.78	42.67	35.19	34.40
25	101.33	79.80	52.18	42.06	34.58	33.80
31	100.99	79.45	51.83	41.72	34.23	33.45
38	100.69	79.16	51.54	41.42	33.94	33.15
50	100.34	78.80	51.18	41.07	33.59	32.80
62	100.09	78.56	50.94	40.82	33.34	32.56
75	99.90	78.36	50.74	40.62	33.14	32.36
100	99.63	78.10	50.48	40.36	32.88	32.10
150	99.32	77.79	50.17	40.05	32.57	31.78
200	99.14	77.60	49.98	39.86	32.38	31.60
250	99.01	77.48	49.86	39.74	32.26	31.47
300	98.92	77.38	49.76	39.65	32.17	31.38
375	98.82	77.28	49.66	39.54	32.06	31.28

**Cuadro B.18.** Resistencia equivalente de transferencia para tuberías ( $L_c = 6$  m).

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Resistencia equivalente, $R_e/(\text{K/kW})$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	34.28	27.10	17.89	14.52	12.03	11.76
18	33.98	26.80	17.59	14.22	11.73	11.47
25	33.78	26.60	17.39	14.02	11.53	11.27
31	33.66	26.48	17.28	13.91	11.41	11.15
38	33.56	26.39	17.18	13.81	11.31	11.05
50	33.45	26.27	17.06	13.69	11.20	10.93
62	33.36	26.19	16.98	13.61	11.11	10.85
75	33.30	26.12	16.91	13.54	11.05	10.79
100	33.21	26.03	16.83	13.45	10.96	10.70
150	33.11	25.93	16.72	13.35	10.86	10.59
200	33.05	25.87	16.66	13.29	10.79	10.53
250	33.00	25.83	16.62	13.25	10.75	10.49
300	32.97	25.79	16.59	13.22	10.72	10.46
375	32.94	25.76	16.55	13.18	10.69	10.43

**Cuadro B.19.** Tasas de transferencia de energía para el enfriamiento de tubería ( $L_c = 2$  m).

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Resistencia equivalente, $R_e/(\text{K/kW})$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	1.85	2.34	3.54	4.36	5.27	5.38
18	1.86	2.36	3.60	4.45	5.40	5.52
25	1.87	2.38	3.64	4.52	5.49	5.62
31	1.88	2.39	3.67	4.55	5.55	5.68
38	1.89	2.40	3.69	4.59	5.60	5.73
50	1.89	2.41	3.71	4.63	5.66	5.79
62	1.90	2.42	3.73	4.65	5.70	5.84
75	1.90	2.42	3.74	4.68	5.73	5.87
100	1.91	2.43	3.76	4.71	5.78	5.92
150	1.91	2.44	3.79	4.74	5.83	5.98
200	1.92	2.45	3.80	4.77	5.87	6.01
250	1.92	2.45	3.81	4.78	5.89	6.04
300	1.92	2.46	3.82	4.79	5.91	6.05
375	1.92	2.46	3.83	4.80	5.93	6.07

**Cuadro B.20.** Tasas de transferencia de energía para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 6$  m).

Diámetro, $d$ /(mm)	Resistencia equivalente, $R_e$ /(K/kW)					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	1.85	2.34	3.54	4.36	5.27	5.38
18	1.86	2.36	3.60	4.45	5.40	5.52
25	1.87	2.38	3.64	4.52	5.49	5.62
31	1.88	2.39	3.67	4.55	5.55	5.68
38	1.89	2.40	3.69	4.59	5.60	5.73
50	1.89	2.41	3.71	4.63	5.66	5.79
62	1.90	2.42	3.73	4.65	5.70	5.84
75	1.90	2.42	3.74	4.68	5.73	5.87
100	1.91	2.43	3.76	4.71	5.78	5.92
150	1.91	2.44	3.79	4.74	5.83	5.98
200	1.92	2.45	3.80	4.77	5.87	6.01
250	1.92	2.45	3.81	4.78	5.89	6.04
300	1.92	2.46	3.82	4.79	5.91	6.05
375	1.92	2.46	3.83	4.80	5.93	6.07

**Cuadro B.21.** Tiempo disponible para transferencia de energía en extrusión.

Diámetro, $d$ /(mm)	Resistencia equivalente, $R_e$ /(K/kW)					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	2 165 230	-	-	-	1 752 996	290 440
18	-	651 131	-	-	-	-
25	-	314 182	437 127	-	338 009	-
31	-	169 339	45 743	45 772	-	29 024
38	-	404 459	262 872	128 877	129 285	111 518
50	-	528 479	419 476	835 249	931 307	355 539
62	-	26 941	17 261	-	-	35 141
75	37 528	167 390	215 949	211 335	44 080	146 505
100	123 705	236 579	474 820	682 393	555 528	401 972
150	198 975	124 873	263 294	283 150	-	107 457
200	135 853	154 383	130 736	113 924	2 917	44 848
250	133 737	104 707	78 324	6 669	-	10 094
300	-	22 235	60 418	16 225	-	84 681
375	-	-	9 511	-	-	105 483

**Cuadro B.22.** Cambio de energía interna con el tiempo disponible para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 2$  m).

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Resistencia equivalente, $R_e/(\text{K/kW})$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	4 001	-	-	-	9 231	1 564
18	-	1 539	-	-	-	-
25	-	748	1 592	-	1 857	-
31	-	405	168	208	-	165
38	-	971	969	591	724	639
50	-	1 274	1 557	3 864	5 269	2 059
62	-	65	64	-	-	205
75	71	406	809	988	253	860
100	236	576	1 787	3 212	3 210	2 380
150	381	305	997	1 343	-	642
200	260	378	497	543	17	270
250	257	257	298	32	-	61
300	-	55	231	78	-	513
375	-	-	36	-	-	641

**Cuadro B.23.** Cambio de energía interna con el tiempo disponible para el enfriamiento de tuberías ( $L_c = 6$  m).

Diámetro, $d/(\text{mm})$	Resistencia equivalente, $R_e/(\text{K/kW})$					
	SDR 13.5	SDR 17	SDR 26	SDR 33	SDR 40	SDR 41
12	12 002	-	-	-	27 694	4 691
18	-	4 616	-	-	-	-
25	-	2 244	4 775	-	5 571	-
31	-	1 215	503	625	-	495
38	-	2 912	2 907	1 774	2 171	1 917
50	-	3 823	4 671	11 593	15 806	6 178
62	-	195	193	-	-	615
75	214	1 218	2 426	2 965	758	2 581
100	708	1 727	5 362	9 637	9 630	7 139
150	1 142	915	2 992	4 030	-	1 927
200	781	1 134	1 491	1 629	51	809
250	770	770	895	96	-	183
300	-	164	692	233	-	1 538
375	-	-	109	-	-	1 922



## C. Muestra de cálculo

### ▪ Capítulo 1

#### C.1. Cálculo de la razón de rendimiento mensual (RR)

Para el cálculo de la razón de rendimiento mensual se utiliza la Ecuación 4:

$$RR = \frac{P_c + P_{nc}}{R_{est} \cdot t_{tr}} \quad (35)$$

Utilizando los valores para la línea DEKUMA del mes de febrero presentes en el Cuadro A.5, fila 2, columna 3, Cuadro A.6, fila 2, columna 3, Cuadro A.7, fila 2, columna 3 y Cuadro A.9, fila 2, columna 3, se obtiene:

$$RR = \frac{109.469 \text{ kg} + 5.244 \text{ kg}}{(338 \text{ h}) \cdot (324 \text{ kg/h})} \cdot 100 = 104.8 \% \quad (C.1)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.2, fila 2, columna 3. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la razón de rendimiento mensual para cada línea, los resultados se muestran en el Cuadro B.2.

#### C.2. Cálculo de la razón de disponibilidad mensual (RD)

Para el cálculo de la razón de disponibilidad mensual se utiliza la ecuación siguiente:

$$RD = \frac{t_{tr}}{t_d} \cdot 100 \quad (C.2)$$

Utilizando los valores para la línea DEKUMA del mes de febrero presentes en el Cuadro A.7, fila 2, columna 3 y Cuadro A.8, fila 2, columna 3.

$$RD = \frac{338 \text{ h}}{467 \text{ h}} \cdot 100 = 72.3 \% \quad (C.3)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.3, fila 2, columna 3. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la razón de disponibilidad mensual para cada línea, los resultados se muestran en el Cuadro B.3.

### C.3. Cálculo de la razón de calidad mensual (RC)

Para el cálculo de la razón de calidad mensual se utiliza la ecuación siguiente:

$$RC = \frac{P_c}{P_c + P_{nc}} \cdot 100 \quad (C.4)$$

Utilizando los valores para la línea DEKUMA del mes de febrero presentes en el Cuadro A.5, fila 2, columna 3 y Cuadro A.6, fila 2, columna 3.

$$RC = \frac{109.469 \text{ kg}}{109.469 \text{ kg} + 5.244 \text{ kg}} \cdot 100 = 95,4 \% \quad (C.5)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.4, fila 2, columna 3. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la razón de calidad mensual para cada línea, los resultados se muestran en el Cuadro B.4.

### C.4. Cálculo de la efectividad global de los procesos (OEE):

Para el cálculo de la razón de la OEE se utiliza la ecuación siguiente:

$$OEE = RR \cdot RD \cdot RC \quad (C.6)$$

Utilizando los valores para la línea DEKUMA del mes de febrero presentes en el Cuadro B.2, fila 2, columna 3, Cuadro B.3, fila 2, columna3 y Cuadro B.4, fila 2, columna 3.

$$OEE = 104.8 \% \cdot 72.3 \% \cdot 95,4 \% = 72.3 \% \quad (C.7)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.5, fila 2, columna 3. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la OEE de cada mes para cada línea, los resultados se muestran en el Cuadro B.5.

## ■ Capítulo 2

El análisis de diseño de experimentos se desarrolló utilizando el software estadístico MiniTab 19. A continuación se describe el procedimiento con imágenes para llevar a cabo el análisis de cribado y caracterización de los aditivos de fórmula.

Al ingresar al programa se utiliza el asistente de MiniTab para realizar un diseño de experimentos, para esto se ingresa en Planear y Crear como aparece en la Figura 7.65

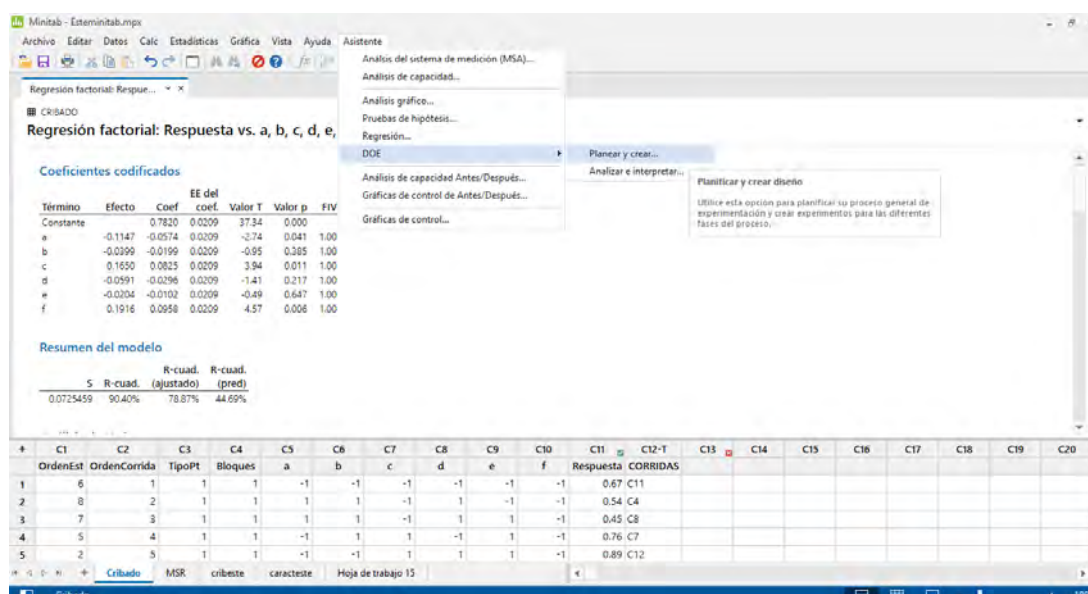


Figura 7.65. Paso 1 para el desarrollo del diseño de experimentos.

Posteriormente, se siguen las recomendaciones del asistente y se selecciona la opción de cribado como se muestra en la Figura 7.66

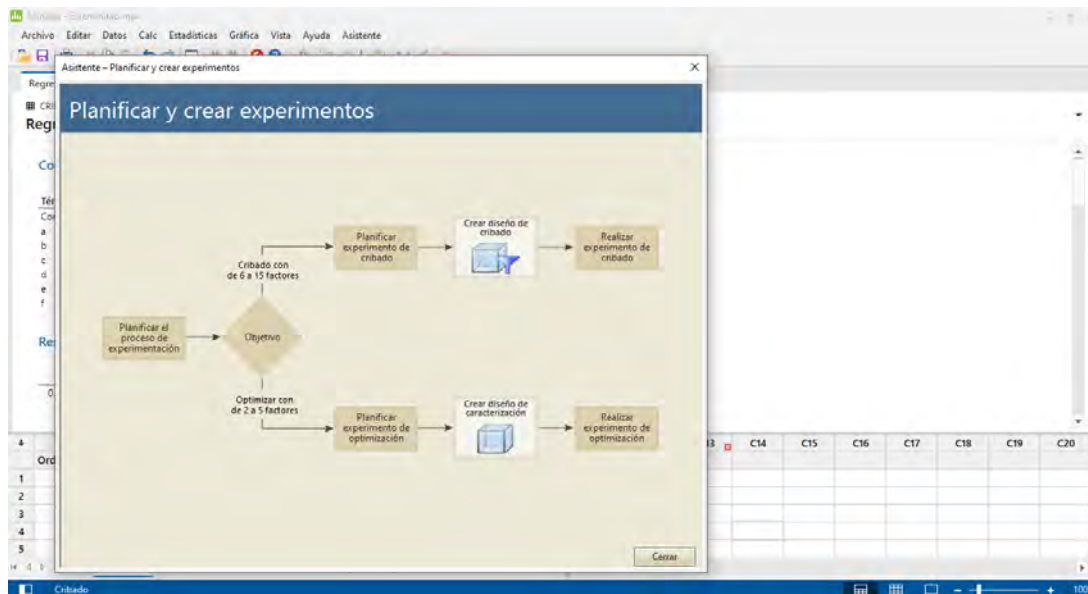


Figura 7.66. Paso 2 para el desarrollo del diseño de experimentos.

Se selecciona la cantidad de factores para el cribado y sus niveles de estudio como se muestra en la Figura 7.67.

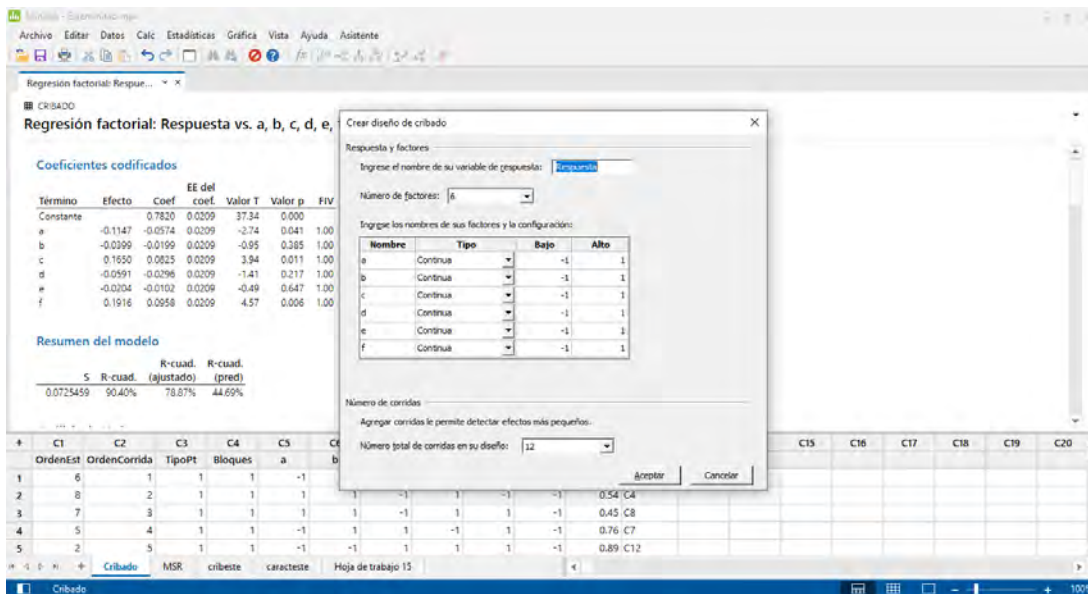


Figura 7.67. Paso 3 para el desarrollo del diseño de experimentos.

Después de generado el experimento se completa con los resultados de la variable respuesta como en la Figura 7.68 y se selecciona "Ajuste de modelo lineal".

Luego se Planea y Crea un diseño de caracterización en el asistente y se definen

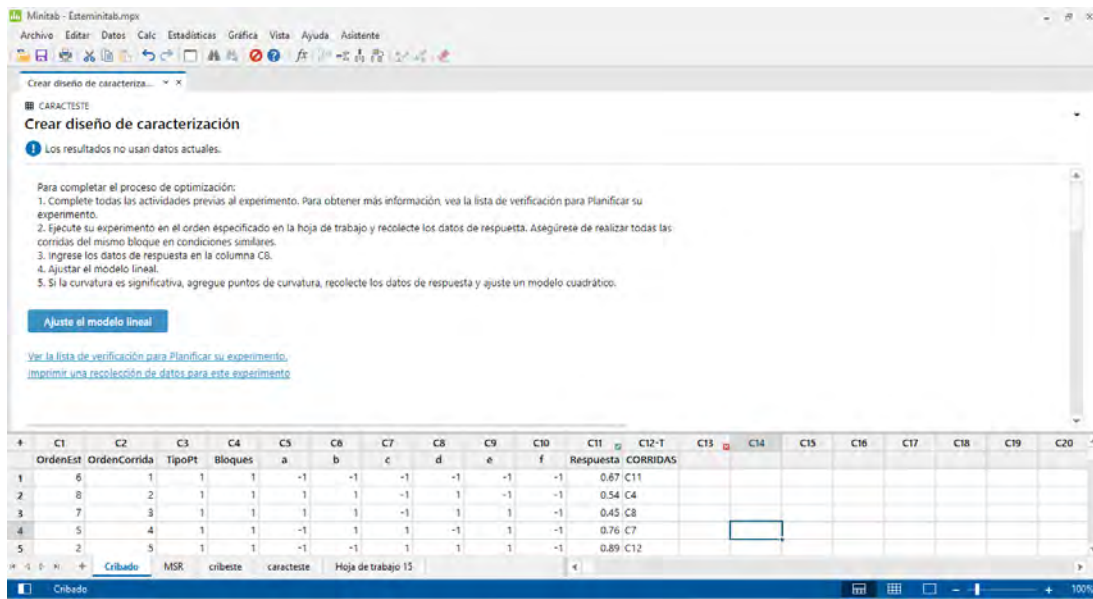


Figura 7.68. Paso 4 para el desarrollo del diseño de experimentos.

los niveles de los factores p con efecto significativo como se muestran en la Figura 7.69

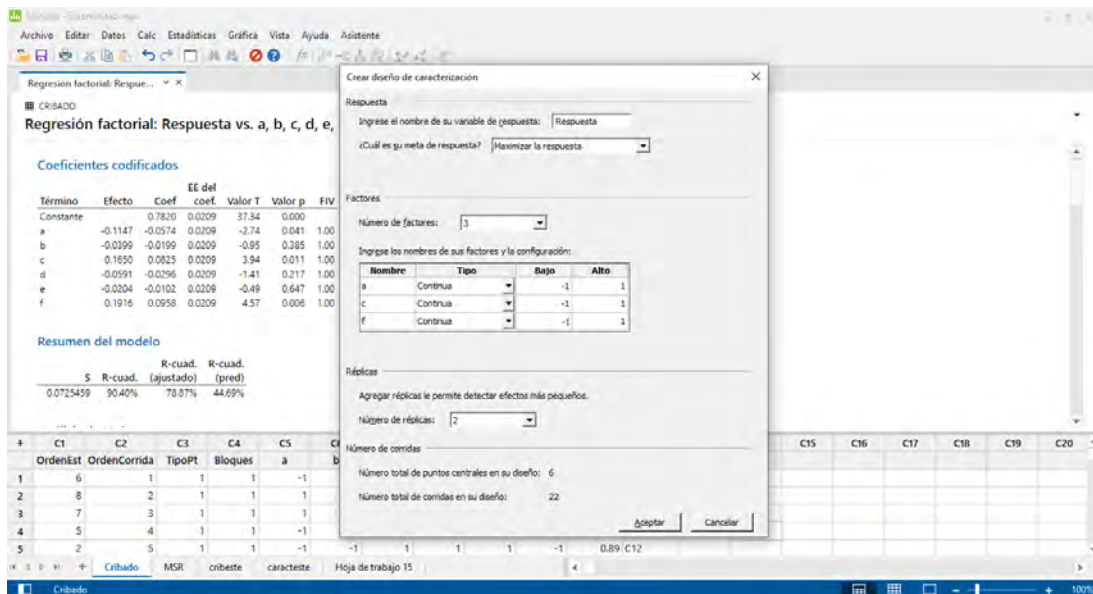


Figura 7.69. Paso 5 para el desarrollo del diseño de experimentos.

Por último, después de agregar la información de la variable respuesta se selecciona la opción Crear diseño de caracterización como se muestra en la Figura 7.70.

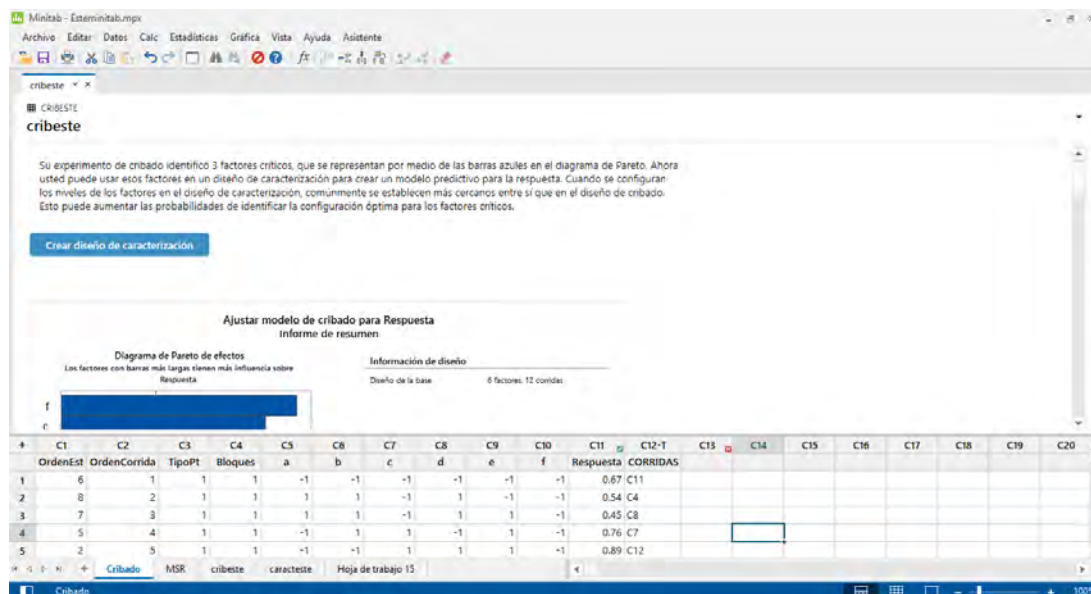


Figura 7.70. Paso 6 para el desarrollo del diseño de experimentos.

### ■ Capítulo 3

#### C.5. Cálculo de la temperatura de película promedio:

Para el cálculo de la temperatura de película promedio se utiliza la Ecuación 23:

$$T_f = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (\text{C.8})$$

Utilizando los valores para el agua presentes en el Cuadro A.43, fila 3 y 4, columna 2.

$$T_f = \frac{18\text{ °C} + 10\text{ °C}}{2} = 14\text{ °C} \quad (\text{C.9})$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.43, fila 3, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la temperatura de película promedio del PVC, el resultado se muestra el Cuadro A.43.

### C.6. Cálculo del cambio de energía interna de los productos de extrusión:

Para el cálculo del cambio de energía interna de los productos de extrusión se utiliza la Ecuación 13:

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{C.10})$$

Utilizando los valores para la tubería con diámetro 12 mm y SDR 13.5 presentes en el Cuadro A.44, fila 2, columna 2, y las propiedades termodinámicas del Cuadro A.43, fila 2 y 6, columna 3.

$$\Delta U = 97\,844 \text{ kg} \cdot 0.97 \cdot 155 \text{ }^\circ\text{C} = 14\,711 \text{ MJ} \quad (\text{C.11})$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.12, fila 2, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la energía interna para diámetro y SDR, los resultados se muestran en el Cuadro B.12.

### C.7. Cálculo del número de Reynolds:

Para el cálculo del número de Reynolds para la transferencia de energía por convección se utiliza la Ecuación 18:

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (36)$$

Utilizando las propiedades termodinámicas para el agua de enfriamiento de tubería presentes en el Cuadro A.43, fila 7, 8 y 9, columna 2.

$$Re = \frac{999.1 \cdot 0.20}{0.001} = 2.11\text{E}+03 \quad (37)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14, fila 2, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener el número de Reynolds para los diferentes

diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.14.

### C.8. Cálculo del número de Nusselt:

Para el cálculo del número de Nusselt para la transferencia de energía por convección se utiliza la Ecuación 21:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}} \left( 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right)^{4/5} \quad (38)$$

Utilizando las propiedades termodinámicas para el agua de enfriamiento de tubería presentes en el Cuadro A.43, fila 10, columna 2 y número de Reynolds para diámetro 12 mm en Cuadro B.14.

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot (2.11E+03)^{1/2} 8.090^{1/3}}{(1 + (0.4/8.090)^{2/3})^{1/4}} \left( 1 + \left( \frac{2.11E+03}{282000} \right)^{5/8} \right)^{4/5} = 5.77E+01 \quad (39)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14, fila 2, columna 3. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener el número de Nusselt para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.14.

### C.9. Cálculo del coeficiente de transferencia por convección:

Para el cálculo del coeficiente de transferencia por convección se utiliza la Ecuación 17, despejada:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (40)$$

Utilizando las propiedades de transferencia presentes en el Cuadro B.14, fila 2, columna 1 y 3 y las propiedades termodinámicas del Cuadro A.43, fila 11, columna 3.

$$h = \frac{5.77E+01 \cdot 1.30E-04 \text{ kW/m K}}{0.012 \text{ m}} = 2.83 \quad (41)$$



Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14, fila 2, columna 5. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener el coeficiente de transferencia por convección para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.14.

### C.10. Cálculo de la resistencia térmica por convección:

Para el cálculo del coeficiente de transferencia por convección se utiliza el inverso de los parámetros de la Ecuación 15:

$$R_{cv} = \frac{1}{h \cdot A_S} \quad (42)$$

Utilizando los valores calculados presentes en el Cuadro B.14, fila 2, columna 4 y 5.

$$R_{cv} = \frac{1}{2.83 \cdot 0.08} = 4.68 \quad (43)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.14, fila 2, columna 6. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener el coeficiente de transferencia por convección para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.14.

### C.11. Cálculo de la resistencia térmica por conducción:

Para el cálculo de la resistencia térmica por conducción se utiliza el inverso de los parámetros de la Ecuación 30:

$$R_{Cond} = \frac{\ln\left(\frac{SDR}{SDR-2}\right)}{2\pi Lk} \quad (44)$$

Utilizando los parámetros presentes en el Cuadro A.43, fila 11 y 12, columna 3 y valores del Cuadro B.16 fila 2, columna 1.

$$R_{Cond} = \frac{\ln\left(\frac{13.5}{13.5-2}\right)}{2\pi 2 \text{ m} \cdot 1.30\text{E-}04 \text{ kW/m K}} = 32.7 \quad (45)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.16, fila 2, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la resistencia térmica por conducción para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.16.

### C.12. Cálculo de la resistencia térmica equivalente:

Para el cálculo de la resistencia térmica equivalente se utiliza el inverso de los parámetros de la Ecuación 25:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (46)$$

Utilizando la resistencia por convección presente en el Cuadro B.14, fila 2, columna 6 y la resistencia por convección presente en el Cuadro B.16 fila 2, columna 2.

$$R_e = 4.68 + 98.2 = 102.83 \quad (47)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.18, fila 2, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la resistencia térmica equivalente para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.18.

### C.13. Cálculo de las tasas de transferencia de energía:

Para el cálculo de la resistencia térmica equivalente se utiliza el inverso de los parámetros de la Ecuación:

$$\dot{Q} = R_e \cdot \Delta T \quad (48)$$

Utilizando la resistencia térmica equivalente por convección presente en el Cuadro B.18, fila 2, columna 2 y el cambio de temperatura de la tubería presente en el Cuadro A.43 fila 6, columna 3.

$$\dot{Q} = \frac{155 \text{ K}}{102.83 \text{ kW/K}} = 1.51 \text{ kW} \quad (49)$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.20, fila 2, columna 2. El mismo cálculo se llevó a cabo para obtener la tasa de transferencia de energía para los diferentes diámetros de tubería, los resultado se muestran el Cuadro B.20.



## ANEXOS

### A. Procedimiento experimental para el desarrollo de fórmula en plastógrafo Brabender

1. Encender el equipo capturador de datos (PC).
2. Colocar el mezclador tipo 2.
3. Cerrar la cámara de pruebas ajustando prensas de sujeción.
4. Encender el controlador de temperatura, configurar su temperatura en 100 °C y esperar que alcance esta temperatura.
5. Encender plastógrafo.
6. Configurar revoluciones del plastógrafo a 60 rpm.
7. Colocar cargador de muestras sobre la cámara de pruebas.
8. Iniciar corrida desde el capturador de datos.
9. Añadir la muestra por el cargador de muestras.
10. Insertar el pistón de 15 kg en el cargador de muestras.
11. Abrir cámara de pruebas retirando las prensas de sujeción.
12. Retirar mezcla fundida.
13. Limpiar minuciosamente toda la cámara y cavidades para evitar acumulación de material.
14. Desechar la mezcla fundida en el depósito correspondiente.
15. Esperar calentamiento a 100 °C nuevamente y volver a comenzar en 1.

## **B. Procedimiento de ensayo de momento de torsión y temperatura en plastógrafo Brabender**

1. Encender el equipo capturador de datos (PC).
2. Colocar el mezclador tipo 1.
3. Cerrar la cámara de pruebas ajustando prensas de sujeción.
4. Encender el controlador de temperatura, configurar su temperatura en 197 °C y esperar que alcance esta temperatura.
5. Encender plastógrafo.
6. Configurar revoluciones del plastógrafo a 60 rpm.
7. Colocar cargador de muestras sobre la cámara de pruebas.
8. Iniciar corrida desde el capturador de datos.
9. Añadir la muestra por el cargador de muestras.
10. Insertar el pistón de 15 kg en el cargador de muestras.
11. Abrir cámara de pruebas retirando las prensas de sujeción.
12. Retirar mezcla fundida.
13. Limpiar minuciosamente toda la cámara y cavidades para evitar acumulación de material.
14. Desechar la mezcla fundida en el depósito correspondiente.
15. Esperar calentamiento a 197 °C nuevamente y volver a comenzar en 1.