

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**TESIS**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE  
CONTROL PARA UN MODELO NO LINEAL APLICADO A  
UN SISTEMA MULTITANQUES EN PROCESOS  
INDUSTRIALES, BASADO EN ALGORITMOS  
GENÉTICOS”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECATRÓNICO**

**ELABORADO POR:  
JOSÉ ANTONIO TOLENTINO VELIZ**

**ASESOR:  
M.Sc. RICARDO RODRÍGUEZ BUSTINZA  
LIMA - PERÚ  
2019**

**Dedicado a mis padres y mi hermano**  
José, Olga y José Luis

Quienes me brindaron su apoyo incondicional para seguir adelante con mi carrera profesional.

## **ABSTRACT**

The hands-on training within which peruvian college students are put on into practice with training modules in the automation and control fields, has to be reinforced due to the rapid technological changes, and even more this fact is emphasized when the development of the industry 4.0 in Peru, begins to grow in short steps but with a sure predisposition of change. Thus, it has been proposed the construction and implementarion of an industrial control training module, that can be used in the areas of Mechatronics Engineering, Process Control and Automation. This apparatus can serve as a training module for students of the faculty of mechanical engineering, who will be guided by an assistant and a professor of the subjects regarding to control and related courses. The mechanical, electronic and electrical parts that make up this module, have been designed to provide an integral system, offering multiple control systems for the analysis and study of the various control algorithms which can be implemented with two controllers embedded in the system itself. This fact enables the use of multiple programming languages during the control process, such as the softwares: Labview, Matlab and C#. The sensors and actuators used to measure the variables involved in the control process, are industrial, allowing the student to learn to configure, calibrate and program each device. The didactic purpose presented in this training module for the level control, also aims to study the types of algorithms that improve the performance of every control process.

## **ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>PRÓLOGO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. Productos y soluciones comerciales en módulos de control .....	3
1.1.2. Trabajos académicos .....	8
<b>1.2. Planteamiento de la realidad problemática .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	13
<b>1.4. Hipótesis .....</b>	<b>13</b>
1.4.1. Hipótesis General .....	13
1.4.2. Hipótesis Específicas .....	13
1.4.3. Justificación de la investigación.....	13
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Estudio de las ecuaciones en un Volumen de Control (VC) .....</b>	<b>15</b>
2.1.1. Ecuación de Bernoulli en base al análisis diferencial en un VC .....	15
2.1.1.1. Ecuación de la continuidad.....	17

2.1.1.2. Componente en el sentido de la corriente de la ecuación del Momentum .....	18
<b>2.2. Sensores transductores y Actuadores.....</b>	<b>20</b>
2.2.1. Clasificación de sensores .....	24
2.2.2. Sensor de nivel SITRANS Probe LU .....	30
2.2.2.1. Datos importantes para su operación .....	32
2.2.3. Válvulas hidráulicas de acuerdo al método de control .....	39
2.2.4. Servomotor .....	44
<b>2.3. Microcontroladores para adquisición de datos.....</b>	<b>47</b>
<b>2.4. Electrobomba de agua .....</b>	<b>49</b>
<b>2.5. Método de Linealización por series de Taylor .....</b>	<b>52</b>
<b>2.6. Controladores en Tiempo Continuo .....</b>	<b>54</b>
2.6.1. Sistemas de control automático.....	54
2.6.1.1. Acción de control de dos posiciones <i>on-off</i> .....	56
2.6.1.2. Acción de control proporcional .....	59
2.6.1.3. Acción de control integral.....	60
2.6.1.4. Acción de control derivativo .....	60
2.6.1.5. Acción de control proporcional-integral.....	61
2.6.1.6. Acción de control proporcional-integral-derivativa.....	62
2.6.1.7. Sistema en lazo cerrado sujeto a perturbación .....	63
2.6.2. Eficiencia del Controlador .....	64
<b>2.7. Control digital.....</b>	<b>68</b>
2.7.1. Estructura de un sistema de control digital .....	68
2.7.2. Sistemas en tiempo discretos .....	70

2.7.3. El teorema de muestreo .....	72
2.7.4. Selección de la frecuencia de muestreo .....	74
2.7.5. Modelado de sistemas de control digital .....	77
2.7.5.1. Modelo del DAC .....	79
2.7.5.2. Función de transferencia de ZOH.....	80
<b>2.8. Sintonización del controlador PID con Algoritmos Genéticos.....</b>	<b>82</b>
2.8.1. Algoritmos genéticos .....	82
<b>2.9. Estudio del tiempo de descarga de un fluido en recipientes sin fricción..</b>	<b>87</b>
2.9.1. En un prisma triangular recto .....	90
2.9.2. En un prisma de base elíptica.....	92
2.9.3. En un paralelepípedo.....	94
<b>2.10. Estudio del tiempo de descarga de un fluido en recipientes con fricción .</b>	<b>95</b>
2.10.1. En un prisma triangular recto .....	97
2.10.2. En un prisma de base elíptica.....	98
2.10.3. En un paralelepípedo.....	98
<b>CAPÍTULO III CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS...</b>	<b>99</b>
<b>3.1. DISEÑO MECÁNICO .....</b>	<b>99</b>
3.1.1. Diseño Mecánico del sistema de tanques .....	99
3.1.1.1. Reservorio Rectangular .....	100
3.1.1.2. Reservorio cilíndrico .....	101
3.1.1.3. Tanque Rectangular .....	102
3.1.1.4. Tanque Elíptico .....	103
3.1.1.5. Tanque Triangular .....	104

3.1.1.6. Estructura soporte .....	105
3.1.2. Diseño del ensamblaje del sistema de tanques.....	107
3.1.2.1. Ensamblaje de los tanques y reservorios en la estructura.....	107
3.1.2.1.1. Acople de niples en los tanques y reservorios .....	107
3.1.2.1.2. Acople de los tanques y reservorios en la estructura ....	110
3.1.2.2. Ubicación de la bomba de agua .....	112
3.1.2.3. Ubicación de las cajas eléctricas .....	114
3.1.3. Diseño Mecánico de accesorios adicionales .....	115
3.1.3.1. Sistema de tuberías .....	115
3.1.3.2. Soporte para el sensor de nivel.....	120
3.1.3.3. Servoválvula .....	123
3.1.3.3.1. Diseño del acople entre servomotor y válvula .....	123
3.1.3.3.2. Diseño de la caja de acople para la servoválvula.....	128
3.1.4. Diseño del ensamblaje de los accesorios adicionales, los sensores y los actuadores .....	132
3.1.4.1. Ensamblaje de las servoválvulas.....	132
3.1.4.2. Ensamblaje de los sensores y sus soportes .....	133
3.1.4.3. Ensamblaje del sistema de tuberías .....	134
3.1.5. Análisis del diseño mecánico .....	135
3.1.5.1. Simulación para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la estructura de soporte .....	135
<b>3.2. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA .....</b>	<b>142</b>
3.2.1. Fabricación del sistema de tanques.....	142
3.2.1.1. Reservorios de agua .....	142

3.2.1.2. Tanques de nivel .....	144
3.2.1.3. Fabricación de la estructura soporte .....	145
3.2.2. Ensamblaje del sistema de tanques .....	148
3.2.2.1. Instalación de los tanque en la estructura.....	148
3.2.2.2. Acople de los reservorios .....	148
3.2.2.3. Acople de los tanques .....	150
3.2.2.4. Instalación de la bomba fijada .....	152
3.2.3. Fabricación de accesorios adicionales .....	153
3.2.3.1. Fabricación de la servoválvula y sus accesorios .....	153
3.2.3.1.1. Impresión 3D del acople servomotor-válvula .....	153
3.2.3.1.2. Impresión 3D de la caja de acople servomotor-válvula .	155
3.2.3.1.3. Ensamble de los accesorios de la servoválvula.....	156
3.2.4. Ensamblaje de los accesorios adicionales.....	158
3.2.4.1. Acople del sistema de tuberías.....	158
3.2.4.2. Acople de las cajas de poder .....	160
3.2.4.3. Ensamble del soporte del sensor de nivel .....	162
3.2.4.4. Montaje del sensor de nivel .....	163
3.2.4.5. Montaje de la servoválvula.....	164
<b>3.3. DISEÑO ELECTRÓNICO .....</b>	<b>165</b>
3.3.1. Diseño de los circuitos electrónicos de los sensores y actuadores .....	165
3.3.1.1. Circuito electrónico de los sensores .....	166
3.3.1.2. Circuito electrónico de las válvulas proporcionales .....	168
3.3.1.3. Circuito electrónico de las servoválvulas.....	169
3.3.2. Diseño del PCB .....	170

3.3.3. Análisis del diseño electrónico .....	173
3.3.3.1. Simulación térmica de las tarjetas electrónicas PCB .....	173
<b>3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ELECTRÓNICO .....</b>	<b>179</b>
3.4.1. Impresión de las tarjetas electrónicas .....	179
3.4.2. Soldado de componentes en las tarjetas electrónicas .....	179
<b>3.5. DISEÑO ELÉCTRICO .....</b>	<b>180</b>
3.5.1. Diseño del panel de control.....	181
3.5.1.1. Secciones del panel del control .....	184
3.5.1.2. Funcionamiento del panel de control .....	185
3.5.2. Diseño del cableado interno en el panel de control.....	189
3.5.3. Diseño del cableado externo de los sensores y actuadores .....	191
<b>3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ELÉCTRICO.....</b>	<b>193</b>
3.6.1. Implementación del panel de control.....	193
3.6.1.1. Perforación del tablero del panel de control.....	193
3.6.1.2. Acople de Rieles y borneras .....	193
3.6.1.3. Acople del los controladores: Myrio y Raspberry Pi .....	194
3.6.1.4. Acople del controlador DSP TMDSDOCK28335 .....	194
3.6.2. Cableado externo de los sensores y actuadores .....	197
3.6.2.1. Conexión de los sensores.....	197
3.6.2.2. Conexión de los actuadores .....	199
3.6.2.3. Etiquetado de los cables y sujeción de los tubos corrugados ...	200
3.6.3. Cableado interno del panel de control.....	201
3.6.4. Instalación de accesorios adicionales en el panel de control .....	202
<b>3.7. CONTROL DEL PROCESO .....</b>	<b>204</b>

3.7.1. Sistemas de control en el Proceso .....	204
3.7.2. Proceso de Funcionamiento .....	209
<b>3.8. Modelamiento del sistema .....</b>	<b>214</b>
3.8.1. Consideraciones previas .....	215
3.8.2. Linealización con Series de Taylor .....	224
<b>3.9. Planta según los diferentes puntos de operación .....</b>	<b>228</b>
<b>3.10. Diseño del control PI .....</b>	<b>230</b>
3.10.1. Implementación del control PI .....	232
3.10.2. Estabilidad del sistema con el controlador PID de autotune .....	236
<b>3.11. Diseño del control PI con Algoritmos genéticos .....</b>	<b>239</b>
 <b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>241</b>
<b>4.1. Implementación física del control.....</b>	<b>241</b>
4.1.1. Sintonización del PI con Algoritmos Genéticos .....	244
4.1.2. Sintonización del PI con Pidtune .....	249
<b>4.2. Comparación de los dos métodos de control.....</b>	<b>253</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>256</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>258</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>259</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>260</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Module PCT-MM22.....	4
Figura 1.2.	Interfaz del módulo PCT-M2 .....	5
Figura 1.3.	Aparato de tanques acoplados- CE105.....	6
Figura 1.4.	Adquisición de datos personalizada en LabView-VDAS .....	8
Figura 2.1.	Análisis del momentum en un flujo .....	17
Figura 2.2.	Sensor de nivel: Sitrans Probe Lu.....	30
Figura 2.3.	Montaje y disposición del sensor de nivel .....	33
Figura 2.4.	Circuito en lazo cerrado del sensor de nivel .....	35
Figura 2.5.	Control de mano modelo del sensor de nivel .....	36
Figura 2.6.	Lineas de referencia del sensor de nivel .....	38
Figura 2.7.	Válvulas hidráulicas .....	39
Figura 2.8.	Válvula proporcional Danfoss .....	42
Figura 2.9.	Series de válvulas proporcionales Danfoss .....	43
Figura 2.10.	Rangos de P y T para la válvula de corriente Danfoss .....	44
Figura 2.11.	Servomotor SAVÖX .....	45
Figura 2.12.	Brazos o hélices de los servomotores .....	46
Figura 2.13.	Ciclo de operación del servomotor SAVÖX .....	47
Figura 2.14.	FPGA: MyRio .....	48
Figura 2.15.	Bomba de agua PKM60-1 .....	49

Figura 2.16.	Diagrama de bloques de un control industrial .....	55
Figura 2.17.	Diagrama de bloques de un controlador <i>on-off</i> .....	57
Figura 2.18.	Diagrama de bloques de un controlador con salto diferencial ..	58
Figura 2.19.	Sistema de control de nivel de líquidos .....	58
Figura 2.20.	Curva de nivel con respecto al tiempo .....	59
Figura 2.21.	Relación entre la entrada y la salida de un controlador proporcional .....	59
Figura 2.22.	Relación entre la entrada y la salida un controlador integral....	60
Figura 2.23.	Relación entre la entrada y la salida de un controlador derivativo	61
Figura 2.24.	Diagrama de bloques de un controlador PID .....	62
Figura 2.25.	Sistema en lazo cerrado, sujeto a perturbaciones .....	63
Figura 2.26.	Diagrama de bloques simplificado del controlador PID .....	65
Figura 2.27.	Respuesta de un controlador proporcional a una entrada escalón unitario.....	66
Figura 2.28.	Respuesta de un controlador proporcional-integral a una entrada escalón unitario.....	67
Figura 2.29.	Respuesta de un controlador PID a una entrada escalón unitario	68
Figura 2.30.	Sistema de un control digital para la dosis de medicamentos ...	70
Figura 2.31.	Diferentes formas de onda con muestras idénticas .....	73
Figura 2.32.	Teorema del muestreo.....	75
Figura 2.33.	Configuración de un sistema de control digital.....	78
Figura 2.34.	Modelo de un muestreador ideal ADC .....	78
Figura 2.35.	Modelo de DAC como un retenedor de orden cero .....	79
Figura 2.36.	Magnitud de la respuesta en la frecuencia .....	81

Figura 2.37. Cadena de valores con predominancia .....	84
Figura 2.38. Ejemplo de <i>crossover</i> .....	85
Figura 2.39. Ejemplo de mutación .....	86
Figura 2.40. Drenaje de un tanque cilíndrico .....	87
Figura 2.41. Tanque prismático de base triangular para el drenaje de agua ..	91
Figura 2.42. Tanque prismático de base elíptica para el drenaje de agua.....	93
Figura 3.1. Secuencia del Diseño Mecánico.....	99
Figura 3.2. Diseño del reservorio rectangular .....	100
Figura 3.3. Diseño del reservorio cilíndrico .....	101
Figura 3.4. Diseño del tanque rectangular .....	102
Figura 3.5. Diseño del tanque elíptico .....	103
Figura 3.6. Diseño del tanque triangular.....	104
Figura 3.7. Diseño de la estructura soporte .....	106
Figura 3.8. Vista inferior de las barras del soporte .....	107
Figura 3.9. Agujeros de 1/2” para tanques y reservorios.....	108
Figura 3.10. Agujeros en el reservorio rectangular .....	108
Figura 3.11. Tanque triangular con niples.....	109
Figura 3.12. Tanque triangular con indicador de nivel y válvula manual ensamblados .....	110
Figura 3.13. Acople del reservorio cilíndrico en los puntos de apoyo $P_i$ .....	111
Figura 3.14. Ensamblaje de los tanques de nivel y el reservorio cilíndrico ..	112
Figura 3.15. Agujero para el suministro de agua del reservorio hacia los tanques .....	113
Figura 3.16. Bomba de agua ubicada frente al reservorio .....	114

Figura 3.17. Cajas de poder y control para la bomba y el sistema general ...	115
Figura 3.18. Esbozo de la tubería.....	116
Figura 3.19. Primer recorrido del sistema de tuberías .....	117
Figura 3.20. Sistema de tuberías global .....	119
Figura 3.21. Sensor de nivel Sitrans Probe LU .....	121
Figura 3.22. Ensamble del sensor y su soporte .....	122
Figura 3.23. Ubicación del sensor y su soporte con respecto al tanque triangular .....	122
Figura 3.24. Válvula de bola y servomotor .....	124
Figura 3.25. Válvula con manija corbata y servomotor con <i>horn</i> tipo estrella	125
Figura 3.26. Acoples con diferentes tolerancias .....	127
Figura 3.27. Acople servomotor-servoválvula .....	128
Figura 3.28. Tuercas de 1/2' de la válvula de bola .....	129
Figura 3.30. Caja de acople para el servomotor y la válvula.....	131
Figura 3.31. Caja de la servoválvula .....	132
Figura 3.32. Ensamble de servoválvulas en los tanques.....	133
Figura 3.33. Ensamble de las servoválvulas en los tanques de nivel .....	134
Figura 3.34. Ensamble del sistema de tuberías .....	135
Figura 3.35. Cordones de soldadura .....	136
Figura 3.36. Configuración del tipo de material .....	137
Figura 3.37. Cargas verticales y horizontales en la estructura .....	138
Figura 3.38. Mallado de la simulación .....	139
Figura 3.39. Esfuerzos y deformaciones en la estructura.....	140
Figura 3.40. Factor de seguridad a plena carga .....	141

Figura 3.41. Reservorio rectangular de latón .....	143
Figura 3.42. Reservorio cilíndrico de latón .....	143
Figura 3.43. Cara lateral del tanque paralelepípedo .....	144
Figura 3.44. Parte angular y oblicua de los tanques .....	145
Figura 3.45. Barras cuadrangulares de la estructura soporte .....	146
Figura 3.46. Soldadura en los vértices de unión en las barras del soporte....	146
Figura 3.47. Estructura general de soporte.....	147
Figura 3.48. Estructura empernada al suelo.....	147
Figura 3.49. Sistema de tanques ensamblado en el estructura .....	149
Figura 3.50. Reservorio cilíndrico soldado en la estructura .....	149
Figura 3.51. Tanque rectangular soldado en la estructura .....	150
Figura 3.52. Tanque triangular soldado en la estructura.....	151
Figura 3.53. Tanque elíptico soldado en la estructura .....	151
Figura 3.54. Bomba de agua instalada frente al reservorio rectangular .....	152
Figura 3.55. Bomba empernada en el pavimento .....	153
Figura 3.56. Impresión del acople entre servo y válvula .....	154
Figura 3.57. Ensamble del acople entre servomotor y válvula .....	154
Figura 3.58. Impresión de las 2 piezas de la caja de la servoválvula .....	155
Figura 3.59. Piezas que componen la caja de la servoválvula .....	156
Figura 3.60. Ensamblaje de la servoválvula .....	156
Figura 3.61. Servoválvula ensamblada.....	157
Figura 3.62. Tubo transversal situado por debajo de los tanques .....	158
Figura 3.63. Barra transversal de soporte de la tubería.....	159
Figura 3.64. Abrazadera de la tubería longitudinal .....	159

Figura 3.65. Orejas de sujeción del panel de control .....	160
Figura 3.66. Caja de control para la bomba de agua.....	161
Figura 3.67. Barra transversal de soporte de la caja de poder general .....	161
Figura 3.68. Cajas eléctricas ensambladas en la estructura .....	162
Figura 3.69. Soporte del sensor de nivel soldado .....	163
Figura 3.70. Montaje del sensor de nivel.....	164
Figura 3.71. Servoválvula instalada en el drenaje del tanque triangular.....	165
Figura 3.72. Secuencia del Diseño Electrónico .....	165
Figura 3.73. Circuito del sensor de nivel.....	167
Figura 3.74. Interruptores de activación para los microcontroladores .....	168
Figura 3.75. Circuito electrónico de las válvulas proporcionales .....	169
Figura 3.76. Circuito electrónico de las servoválvulas .....	170
Figura 3.77. Circuito esquemático del circuito para un tanque .....	171
Figura 3.78. Diseño del primer PCB .....	171
Figura 3.79. Diseño del segundo PCB .....	172
Figura 3.80. Primera tarjeta electrónica ensamblada .....	172
Figura 3.81. Segunda tarjeta electrónica ensamblada .....	173
Figura 3.82. Configuración de los materiales de cada componente electrónico	174
Figura 3.83. Configuración de la potencia consumida .....	176
Figura 3.84. Configuración del coeficiente de convección.....	177
Figura 3.85. Mallado fino para la simulación térmica.....	178
Figura 3.86. Temperaturas alcanzadas por los componentes electrónicos....	178
Figura 3.87. Tarjeta electrónica PCB impresa .....	179
Figura 3.88. Secuencia del Diseño Eléctrico.....	180

Figura 3.89. Circuito eléctrico general .....	180
Figura 3.90. División del panel de control .....	182
Figura 3.91. Diseño del Panel de control.....	183
Figura 3.92. Función de la sección de alimentación .....	185
Figura 3.93. Función de la sección de las tarjetas PCB .....	186
Figura 3.94. Función de la sección de los microcontroladores.....	188
Figura 3.95. Cableado interno del panel de control.....	190
Figura 3.96. Cableado externo del panel de control .....	191
Figura 3.97. Resultado del diseño del Módulo de control.....	192
Figura 3.98. Taladrado del tablero con brocas de 4mm .....	193
Figura 3.99. Disposición de las rieles en el tablero .....	194
Figura 3.100. Diseño de las muescas de sujeción del DSP .....	195
Figura 3.101. Impresión de las muescas .....	195
Figura 3.102. DSP acoplado con las muescas en el tablero .....	196
Figura 3.103. Ensamblaje parcial del tablero.....	197
Figura 3.104. Cableado del sensor del tanque con tubo corrugado .....	198
Figura 3.105. Protección de cables con tubos corrugados .....	198
Figura 3.106. Convergencia de tubos corrugados .....	199
Figura 3.107. Tubo corrugado en el cable de alimentación de la bomba .....	199
Figura 3.108. Etiqueta del sensor de nivel.....	200
Figura 3.109. Cintillos de sujeción .....	201
Figura 3.110. Panel de control perforado para ensamble de accesorios.....	202
Figura 3.111. Accesorios instalados en el panel de control.....	203
Figura 3.112. Cableado interno del panel de control.....	203

Figura 3.113. Módulo de control de nivel .....	204
Figura 3.114. Proceso general de operación.....	209
Figura 3.115. Diagrama P&ID del sistema de tanques de nivel .....	212
Figura 3.116. Esbozo del tanque 1 .....	214
Figura 3.117. Parámetros geométricos de los tanques de nivel.....	215
Figura 3.118. Descarga del tanque elíptico desde 0.5m de altura a 100% de apertura de la válvula .....	218
Figura 3.119. Caudal vs $h_1$ a 100% de apertura de la válvula .....	219
Figura 3.120. Descarga del tanque elíptico desde 0.5m de altura a 50% de apertura de la válvula .....	220
Figura 3.121. Caudal vs $h_1$ a 50% de apertura de la válvula .....	221
Figura 3.122. Caudal vs $h_1$ a 50% de apertura de la válvula .....	224
Figura 3.123. Lazo de control.....	227
Figura 3.124. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	232
Figura 3.125. Implementación del control PI con una válvula de disturbio 100% abierta .....	234
Figura 3.126. Implementación del control PI con una válvula de disturbio 50% abierta .....	235
Figura 3.127. Planta discreta para un <i>setpoint</i> de 20cm y válvula de 50% de apertura .....	237
Figura 4.1. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	242

Figura 4.2.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	244
Figura 4.3.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	246
Figura 4.4.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	247
Figura 4.5.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	249
Figura 4.6.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	250
Figura 4.7.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	251
Figura 4.8.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	253
Figura 4.9.	Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico .....	254

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Clasificaciones de sensores según los criterios exhaustivos ....	27
Tabla 2.2.	Sensores usuales y métodos de sensado 1 .....	28
Tabla 2.3.	Sensores usuales y métodos de sensado 2 .....	29
Tabla 2.4.	Configuración del sensor según la forma del tanque .....	34
Tabla 2.5.	Efectos de los tipos de ganancias.....	63
Tabla 3.1.	Sistemas SISO.....	205
Tabla 3.2.	Sistemas MISO.....	206
Tabla 3.3.	Sistemas MIMO .....	207
Tabla 3.4.	Equivalencia de nombres y etiquetas.....	213
Tabla 3.5.	Plantas con válvula de disturbio abierta en 100% y <i>setpoint</i> cada 5cm.....	228
Tabla 3.6.	Plantas con válvula de disturbio abierta en 75% y <i>setpoint</i> cada 5cm .....	229
Tabla 3.7.	Plantas con válvula de disturbio abierta en 50% y <i>setpoint</i> cada 5cm .....	229
Tabla 3.8.	Plantas con válvula de disturbio abierta en 25% y <i>setpoint</i> cada 5cm .....	230

## **PRÓLOGO**

La presente tesis describe la construcción e implementación de un sistema de control de nivel aplicado a un conjunto de tanques donde se utilizan equipos industriales para el control de un proceso donde se comparan la eficiencia de dos métodos de control digital. El primer capítulo describe el estado del arte donde se menciona los productos ya existentes que son más parecidos al propuesto en este proyecto de investigación, después se plantea la realidad problemática donde se explica la orientación de este proyecto en relación con la Facultad de Ingeniería Mecánica y seguidamente se establecen los objetivos e hipótesis, los cuales están resumidos adicionalmente en una matriz de consistencia.

El segundo capítulo proporciona información sobre la mecánica de fluidos concerniente a los procesos de descarga de agua, así como una descripción detallada de los procesos y métodos de control usados en las posteriores secciones. También se describe los equipos e instrumentos que serán utilizados.

En el tercer capítulo se realiza el diseño mecatrónico del módulo de control y posteriormente se describe la implementación según el diseño planteado. Después se ejecutan las pruebas de calibración de los sensores y actuadores, adquisición de datos y los algoritmos de control PI según los dos métodos elegidos, mediante la función Pidtune y con los Algoritmos Genéticos. El cuarto capítulo abarca la implementación

de los algoritmos de control para comparar los resultados obtenidos con los métodos de control propuestos. Finalmente se menciona las conclusiones y recomendaciones que sintetizan el resultado de un proceso de control de nivel utilizando el módulo en cuestión.

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES**

##### **1.1.1. Productos y soluciones comerciales en módulos de control**

Module PCTPCT-MM2:

Es un modulo de entrenamiento creado por la empresa Bytronic, fabricante y proveedora de productos de sistemas de control. Su objetivo es la educación técnica y superior empleando módulos y cursos orientados en los campos de la Electrónica, el Control de Procesos, la Automatización, los Sistemas de control, los Controladores Lógicos Programables (PLC, por sus siglas en inglés), la Neumática, la Instrumentación y las Comunicaciones Programas de comunicación. Además de ofrecer productos específicos, tienen la capacidad de brindar sistemas o laboratorios completos, acompañados de capacitaciones didácticas para la enseñanza teórica y práctica concerniente a la manipulación de los instrumentos.

El modulo PCTPCT-M2, ver figura 1.1., permite el estudio del control de nivel y su respectivo monitoreo, a través un sistema constituido por tuberías de PVC y válvulas que regulan el flujo de salida de líquido suministrado desde una bomba de agua. El tipo de conexión desde el módulo hacia una computadora es

por USB.

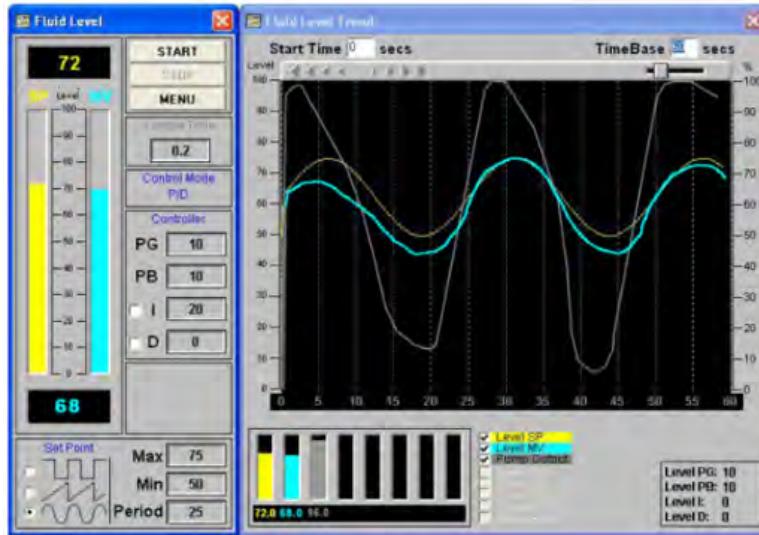


**Figura 1.1. Process Control Technology Level Module PCT–M2**

Fuente: <http://www.bytronic.net/wp-content/uploads/2015/04/PCT-M2-PL0114.pdf>  
Recuperado el 16 de junio de 2019

El módulo puede ser controlado desde una interfaz gráfica, mediante un software en donde se puede realizar un control PID. El proceso de control empieza cuando el nivel de agua se mide usando un transductor de presión y se abre una válvula de drenaje tipo aguja para simular los disturbios en el sistema, debido a que posee tubos transparentes al igual que los tanques, el estudiante puede observar cómo se desarrolla el proceso de control. El transductor de presión, alimentado por una fuente de 5 voltios en promedio, puede detectar presiones en un rango de 0 a 50 mmHg. A su vez, la válvula es alimentada con 24 voltios, esta es de tipo proporcional para poder regular el flujo de líquido de salida en un cierto porcentaje. En el software se puede observar mediante gráficos los niveles de los tanques y activar desde la interfaz el comienzo del

control de proceso a un determinado *setpoint*, eligiendo el modo de Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y además, teniendo la posibilidad de manipular las constantes de dicho controlador como se visualiza en la figura 1.2.



**Figura 1.2. Software del modulo PCT-M2**

Fuente: <http://www.bytronic.net/wp-content/uploads/2015/04/PCT-M2-PL0114.pdf>

Recuperado el 16 de junio de 2019

Las principales ventajas que ofrece este módulo son que dispone de un controlador PID y un sistema SCADA, ya embebidos en el sistema; adicionalmente se puede elegir entre los tipos de control Proporcional (P) y el control Proporcional-integral (PI). Con respecto al sistema físico, tanto los tanques, los tubos e indicadores de nivel, ofrecen una clara visualización de cada dispositivo durante las pruebas. Por otra parte, si se desea hacer cualquier tipo de prueba con este modulo es imprescindible usar el software que se provee, lo cual inhabilita la posibilidad de implementar otro tipo de control e incluso usar otro tipo de software para una libre implementación de un

algoritmo de control a decisión del usuario.

#### Coupled Tanks Apparatus - CE105:

Este sistema de control, ver figura 1.3., fue elaborado por la empresa TECQUIPMENT ACADEMIA, para facilitar la enseñanza práctica de los principios ingenieriles, otorgando a las universidades e instituciones en el campo de la ingeniería, un equipo de entrenamiento con el objetivo de desarrollar las habilidades necesarias en el ámbito que demanda el mercado laboral. Este módulo permite investigar los principios de ingeniería de control básicos y avanzados como también la lógica difusa. Esta conformado por una bomba de agua, un sistema de tuberías, unos tanques, válvulas y sensores electrónicos para medir el flujo de agua. El proceso general consiste en variar la velocidad de la bomba a fin de controlar el nivel del líquido en cada tanque.



**Figura 1.3. Aparato de tanques acoplados- CE105**

Fuente: <https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/CE105-Coupled-Tanks-Datasheet.pdf>  
Recuperado el 17 de junio de 2019

Los procedimientos involucrados con la experiencia de este modelo consiste en modelar a través de mediciones estáticas y transitorias el sistema, analizar el error en estado estable, estudiar la respuesta transitoria y el método de sintonización con método de Ziegler-Nichols. También se incluye en el aprendizaje, el proceso de calibración en cada sensor de nivel para verificar su funcionamiento adecuado. Las ventajas más resaltante en este módulo de entrenamiento yacen en el hecho que este equipo posee una interfaz digital, a la cual se le puede conectar diferentes tipos de controladores que sean capaces de recibir señales de entradas y salidas de 10 voltios. Debido a esta característica, se puede hacer un diseño de un control PID que el usuario considere conveniente utilizando para este propósito, incluso hasta un control avanzado. Particularmente se puede utilizar el propio controlador de este modulo denominado CE120; cuya interfaz digital llamada CE122, posibilita conectarlo a una variada Gama en microcontroladores disponibles en el mercado. En adición, la empresa Tecquipment ha desarrollado un software para respaldar y mejorar las capacidades experimentales de sus productos, este software proporciona una adquisición de datos personalizada (VDAS), ver figura 1.4., a fin de ofrecer una experimentación virtual adicional, gracias al software de la gama Structures. Así, se provee de un paquete de archivos en LabView donde se tiene diseñado ejemplos generales del uso y operación del modulo, los cuales se pueden editar a necesidad del usuario.



**Figura 1.4. Adquisición de datos personalizada en LabView-VDAS**

Fuente: <https://www.tecquipment.com/downloads>  
Recuperado el 17 de junio de 2019

### 1.1.2. Trabajos académicos

Hasta la fecha se han publicado diferentes trabajos académicos con respecto al control de nivel de tanques. Se ha hecho una elección de los trabajos y publicaciones más parecidos con el proyecto desarrollado en el presente trabajo, por tal motivo se mencionará algunos que puedan contribuir en dar una visión general de lo que se describirá posteriormente en este proyecto.

Senthilkumar S., y Lincon A. (2012). Design of Stabilizing PI Controller for Coupled Tank MIMO Process. En International Journal of Engineering Research and Development, 2278-067X, 3(10), 47-55, proponen un método novedoso para el cálculo de los controladores PI para estabilizar un proceso de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Su enfoque se basa en trazar el gráfico de Root-Locus para analizar el límite de estabilidad en el plano. Después de aplicar esta técnica, se hallan los parámetros del controlador PI que

estabilizan al sistema. La ventaja es que esta técnica no requiere un barrido sobre los parámetros y tampoco se necesita programación lineal que involucraría resolver un conjunto de desigualdades. Además de obtener todos los controladores PI, se obtienen aquellos cuya ganancia de margenes y fase pueden ser especificadas por el usuario.

Rosinová D., y Kozáková A. (2012). Decentralized Robust Control of MIMO Systems: Quadruple Tank Case Study. En IFAC Proceedings Volumes, 45(11), 72-77. Presentan algunos aspectos básicos del diseño de control descentralizado, relativos a la estabilidad y al rendimiento. Ilustran en su estudio el modelo virtual de un proceso de tanques cuádruples, donde se utiliza la selección de estructuras de control basadas en la matriz de ganancia relativa de rendimiento (PRGA, Hovd y Skogestad, 1992) y analizan su capacidad para evaluar el rendimiento alcanzable. En adición, consideran una condición de estabilidad robusta para el control descentralizado, la cual proporciona el nivel superior en los subsistemas obtenidos, esta última característica limita en cierta medida su rendimiento.

Prasad T. y Nagaraju N. (2015). Artificial Intelligence Based Liquid Level Control of Coupled Tanks using Fuzzy Logic Controller. En International Journal of latest trends in Engineering and Technology, 2278-621X, 5(2), investigan el uso de la Inteligencia Artificial usando el Controlador Lógico Difuso (FLC), para controlar el nivel de líquido en un tanque de una planta conformada por unos tanques acoplados. Este control se efectúa a través de la manipulación variable de la bomba de agua en el primer tanque. A diferencia de otros procesos, se desarrolla un modelamiento de los sistemas que implica el

estudio del modelo matemático obtenido mediante la aplicación de las leyes físicas fundamentales. A partir de ese análisis, se realizan estudios de simulación basados en el modelo desarrollado utilizando el módulo de Simulink proporcionado por el *software* MatlabR2012a. En este trabajo también se estudia el sistema de comportamiento en términos de respuesta en el tiempo. Por ejemplo, se analizan: al error de estado estacionario, el tiempo de subida y el sobreimpulso. Su conclusión se basa en la comparación de los controladores PID y el controlador FLC.

Owa K., Sharma S., y Sutton R. (2015). A Wavelet Neural Network Based Non-linear Model Predictive Controller for a Multi-variable Coupled Tank System. En International Journal of Automation and Computing, 12(2), 156-170, diseñan un controlador predictivo de un modelo no lineal en el tiempo (NMPC) para un sistema de tanques acoplados multivariados (CTS), los cuales son altamente no lineales y están presentes en una diversidad amplia de aplicaciones en procesos industriales. Los autores introducen un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), lo cual hace que el diseño de un controlador efectivo sea una tarea compleja, porque primero los sistemas MIMO tienen acoplamientos inherentes; es decir, interacciones entre las variables de entrada y salida del proceso y segundo porque generalmente poseen una estructura interna compleja. Su objetivo general fue diseñar, simular e implementar un nuevo NMPC para un CTS multivariable con la ayuda de técnicas de sistema inteligentes. Los autores citan que tuvieron dificultades para obtener el modelo no lineal que formará una red compleja no convexa, donde se evite quedar atrapado en una solución mínima local. Por otro

lado, para la optimización lineal en el tiempo real (RIO) de la variable que manipularon en cada tiempo de muestreo, seleccionaron una red neuronal de ondícula (WNN) con alta precisión de predicción y característica de localización de tiempo-frecuencia para un modelo MIMO. A su vez utilizaron, un algoritmo de gradiente de ondas graduales estocástico para el entrenamiento inicial de la red. Y para complementar, utilizaron un algoritmo genético para obtener los parámetros optimizados del WNN y del RTO durante la estrategia NMPC. Sus resultados concluyentes según su estrategia propuesta, tuvo un buen rendimiento tanto en simulación como en tiempo real en un MIMO CTS. Además que evidenciaron como el WNN proporcionó una mejor regulación de la trayectoria con menos error cuadrático medio y energía de control promedio en comparación con una red neuronal artificial.

## **1.2. Planteamiento de la realidad problemática**

En la actualidad, la industria peruana requiere más profesionales calificados que puedan hacerle frente a los cambios tecnológicos actuales, este hecho se traduce en la modernización de los equipos industriales adquiridos por tanto las empresas públicas y privadas en los sectores de mayor desarrollo industrial en el Perú, como en las áreas de: Manufactura(16.52%), Minería e Hidrocarburos (14.36%), y Construcción (5.1%), según los resultados estadísticos en la Evolución del Índice Mensual de la Producción Nacional para finales del año 2017 elaborado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Sin embargo, la modernización de los sectores industriales ha venido creciendo lentamente, esto se refleja en el parque de robots industriales en el Perú que ha

crecido tan solo en un 2% en el periodo 2013-2017, mientras que a nivel nacional también hay presente una escasez de profesionales especializados en este ámbito, con alrededor de 1000-1500 profesionales capacitados. Por esta razón las empresas privadas han visto en la necesidad de contratar técnicos extranjeros especialistas con experiencia en dichos campos de industria.

Según el Ingeniero Manuel Góngora, con experiencia en el ámbito industrial y educativo, afirma, en su entrevista concedida al diario nacional La República, que si una empresa desea automatizar toda una línea de producción debe invertir aproximadamente entre 100,000 y 500,000 dolares dependiendo del tamaño y el sector al que pertenece, lo cual demanda a su vez profesionales con la capacidad de implementar y maniobrar equipos muy específicos. Añade también que la industria nacional todavía no aprovecha las capacidades de los profesionales peruanos para llevar a cabo una modernización en la producción, no por su potencial sino por el grado de su especialización.

En este sentido, se puede deducir que las capacidades que poseen los estudiantes de pregrado a nivel nacional, en las áreas de ingeniería en automatización y control, no se ha explotado en su totalidad a causa de no contar con los equipos necesarios para el entrenamiento académico y práctico.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Brindar un módulo de entrenamiento para el uso en los cursos de control y afines dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema mecatrónico que cumpla con el rol de adquisición de datos, control y monitoreo del nivel de líquido sobre un sistema multitanques acoplados de estructura variable.
- Diseñar e implementar dos algoritmos de control en el modulo de entrenamiento para comparar la eficiencia de cada control.

## 1.4. Hipótesis

### 1.4.1. Hipótesis General

- Los módulos industriales de control de nivel pueden ser adaptados para el entrenamiento y estudio de un sistema de control; así como para la implementación de diversas estrategias y métodos de control.

### 1.4.2. Hipótesis Específicas

- Las conexiones de sensores y actuadores requerirán un diseño eléctrico y electrónico que sirva de interfaz entre los controladores y los dispositivos mencionados.
- La eficiencia de los algoritmos de control dependerán de la manipulación adecuada y la limitación de las variables de ganancia.

### 1.4.3. Justificación de la investigación

Al usar varios tipos de microcontroladores en el módulo de entrenamiento, es posible su utilización en sendos cursos referidos al área de control. Este hecho

implica que se usen diversos *softwares* para la adquisición de los datos. Esta ultima tarea, afianzaría el entrenamiento práctico, con un sistema real ya implementado y listo para su operación. Así, la utilidad que tanto los profesores y alumnos le puedan dar, es en beneficio pleno del desarrollo académico de la escuela de Ingeniería Mecatrónica.

Por otro lado, el resultado práctico de este proyecto consiste en tener un módulo completamente provisto del *hardware* y *software* necesarios, para que el usuario pueda conectar su computadora personal y hacer el estudio del sistema en cuestión. Además, se dispone de una computadora individual en el laboratorio para la operación de dicho módulo, con los programas y ejemplos de uso del equipo pre-instalados.

Además, sin dejar de lado el valor teórico, el sistema se presta para el modelamiento matemático y obtención de la planta a través del estudio de los fluidos, lo cual refuerza el fundamento teórico que los estudiantes adquirieron previamente.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

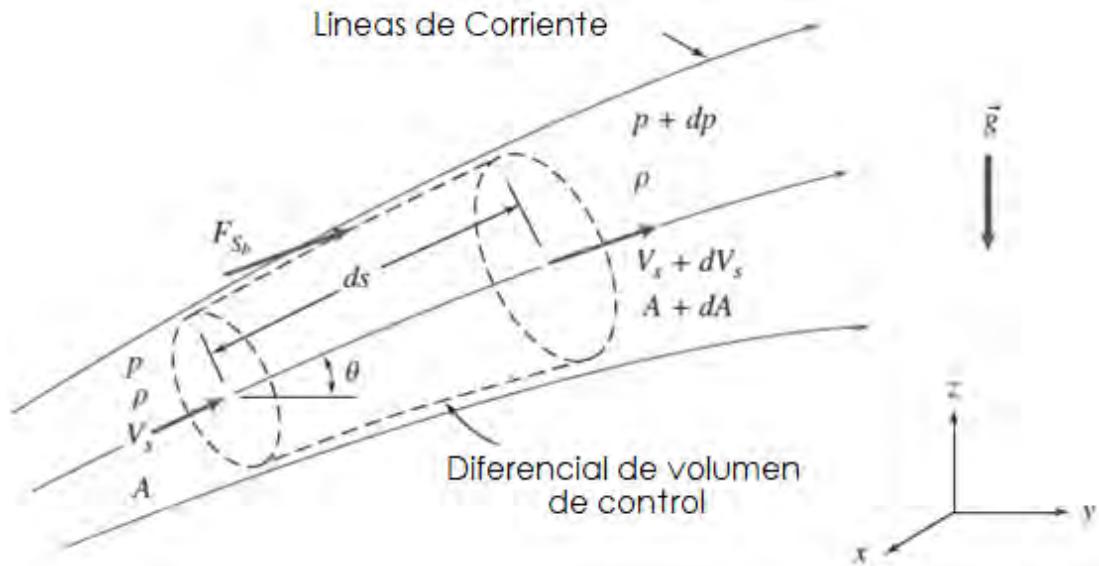
#### **2.1. Estudio de las ecuaciones en un Volumen de Control (VC)**

##### **2.1.1. Ecuación de Bernoulli en base al análisis diferencial en un VC**

Para explicar este sección se usará el libro de Pritchard P., y Leylegian J. (2011). Basic Equations in Integral For a Control Volume. In Wiley (Ed.), Fluid Mechanics, (pp. 122–171), Danvers, Estados Unidos. Se desear usar la aproximación provista por este libro mediante un volumen de control, ya que sus resultados muy útiles cuando se aplica específicamente a regiones finitas. Por otro lado si se aplica, dicha aproximación a un volumen de control diferencial, se puede obtener ecuaciones diferenciales que describen un campo de flujo. Entonces se aplicará las ecuaciones de conservación de la masa y volumen para obtener una ecuación diferencial simple que describa el flujo, siendo este estable, incompresible, sin fricción. Después se integrará a lo largo de una linea de corriente para obtener la ecuación de Bernoulli. Para explicar detalladamente este método, se puede sintetizar en los siguiente pasos, adjuntando algunas figuras de referencia. Primero se aplicará la ecuación de continuidad y momentum a un flujo estable e incompresible, sin fricción como se muestra en la figura 2.1. Este volumen de control es fijado en un espacio y

limitado por líneas de flujo de corriente convirtiéndose así en un elemento de un tubo de corriente, donde la longitud del volumen de control es  $ds$ .

Debido a que el volumen de control está limitado por las líneas de corriente, el flujo a través de las superficies límites ocurre solo al final de las secciones y este se localiza en las coordenadas  $s$  y  $s + ds$ , medido en línea de la corriente central. Aquellas propiedades en la sección de admisión, se asignan con valores simbólicos arbitrarios y las propiedades en la sección de escape o salida, se asumen como un incremento en cantidades diferenciales. Es decir en  $s + ds$ , la velocidad del flujo se asume como  $V_s + dV_s$  y así sucesivamente. Los cambios diferenciales:  $dp$ ,  $dV$  y  $dA$ , son todos asumidos positivos para la configuración del problema. Este análisis es idéntico al que se efectúa en el análisis de un cuerpo libre en estática o dinámica, donde el signo algebraico de cada cambio diferencial es determinado por los resultados.



**Figura 2.1. Análisis del momentum de un flujo a través de un tubo de corriente en un VC diferencial**

Fuente: Introduction to Fluid Mechanics, Philip J. Pritchard & John C. Leylegian,  
Cáp. 4, pág. 122  
Recuperado el 25 de junio de 2019

### 2.1.1.1. Ecuación de la continuidad

Ahora se aplicará la ecuación de la continuidad y el componente  $s$  de la ecuación de momentum en el volumen de control en base a la figura 2.1. Ecuación de partida:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho d\vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad = 0(1)$$

Se asume que:

- El flujo es estable
- No existe flujo a través de los límites de las líneas de corriente
- El flujo es incompresible

Entonces:

$$(-\rho V_s A) + \rho(V_s + dV_s)(A + dA) = 0$$

$$\rho(V_s + dV_s)(A + dA) = \rho V_s A \quad (2.1)$$

Expandiendo la expresión y simplificando, se tiene:

$$V_s dA + AdV_s + dAdV_s = 0$$

Pero  $dA dV_s$  es un producto de diferenciales que puede despreciarse en comparación con  $V_s dA$  ó  $A dV_s$ , así:

$$V_s dA + AdV_s = 0$$

### **2.1.1.2. Componente en el sentido de la corriente de la ecuación del Momentum**

Ecuación básica:

$$F_{S_s} + F_{B_s} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \mu_s \rho dV + \int_{CS} \mu_s \rho \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad = 0(1)$$

Se asume que no hay fricción, entonces  $F_{S_b}$ , se produce por las fuerzas de presión solamente. La fuerza superficial generada solo por la presión tendrá tres términos:

$$F_{S_s} = pA - (p + dp)(A + dA) + \left(p + \frac{p}{2}\right)dA \quad (2.2)$$

El primer y segundo término de la ecuación (2.2) son las fuerzas de presión en las caras frontales de la superficie de control. El tercer término es  $F_{S_b}$  y se

identifica por ser la fuerza de presión que actúa en la dirección  $s$  situado en límite de la superficie de corriente del volumen de control. Su magnitud es el producto de la presión promedio que actúa sobre la superficie de la corriente,  $p + 1/2dp$ , multiplicado por el componente del área de la superficie de corriente en la dirección  $s$ ,  $dA$ . La ecuación 2.2 se simplifica a:

$$F_{S_s} = -Adp - \frac{1}{2}dpdA$$

El componente de la fuerza del cuerpo en la dirección  $s$  es:

$$F_{B_s} = \rho g S dV = \rho(-g \operatorname{sen}\theta) \left( A + \frac{dA}{2} \right) ds$$

Pero  $\operatorname{sen}\theta ds = dz$

$$F_{B_s} = -\rho g \left( A + \frac{dA}{2} \right) dz$$

Por lo tanto el flujo del momentum será:

$$\int_{CS} \mu_s \rho \vec{V} \cdot \vec{A} = V_s (-\rho V_s A) + (V_s + dV_s) [\rho (V_s + dV_s) (A + dA)]$$

Ya que no hay flujo de masa a través del límite de la superficie de corriente, los factores de flujo de masa en paréntesis y llaves son iguales por la continuidad expresada en la ecuación (2.1), entonces:

$$\int_{CS} \mu_s \rho \vec{V} \cdot \vec{A} = V_s (\rho V_s A) + (V_s + dV_s) (\rho V_s A) = \rho V_s A dV_s$$

Sustituyendo las ecuaciones del momentum (2.1.1.2.), (2.1.1.2.) y (2.1.1.2.), resulta:

$$-Adp - \frac{1}{2}dpdA - \rho g Adz - \frac{1}{2}\rho dAdz = \rho V_s A dV_s$$

Dividiendo por  $\rho A$ , se observa que los productos de las diferenciales son despreciables comparado con los términos que quedan y se obtiene:

$$-\frac{dp}{\rho} - gdz = V s dV_s = d\left(\frac{V_s^2}{2}\right)$$

O que puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{V_s^2}{2}\right) + gdz = 0$$

Debido a que el flujo es incompresible, la ecuación puede ser integrada para obtener:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} + gz = cte \quad (2.3)$$

Esta ecuación está sujeta a las siguientes restricciones:

- Flujo estable
- Sin fricción
- Flujo a través de una línea de corriente
- Flujo incomprensible

En resumen, se ha derivado una expresión que quizá es una de las ecuaciones más famosas en la mecánica de fluidos, la ecuación de Bernoulli, como se observa en la ecuación (2.3).

## 2.2. Sensores transductores y Actuadores

Esta sección estará basada en el libro de Pallaá R., y Webster J. (2001). Introduction to Sensor-Based Measurement Systems. In Interscience Publication (Ed.), Sensors and signals condioniting, (pp. 4–10). Donde se

considera a un transductor como un dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal física de forma diferente. Esto significa que se comporta como un convertidor de energía, por lo que la señal de entrada siempre tiene energía o potencia; así, las señales consisten en dos cantidades de componentes cuyos productos tienen una dimensión de energía o potencia. Pero en los sistemas de medición, uno de los dos componentes de la señal medida es usualmente tan pequeña que se desprecia, y por lo tanto solo se mide el componente restante.

Por ejemplo, cuando se mide una fuerza, se espera que el desplazamiento en el transductor sea insignificante. Es decir, que no haya efecto de carga, de lo contrario podría suceder que la fuerza medida no pueda entregar la energía necesaria para permitir el movimiento. Aunque, siempre hay algo de energía en el transductor, por eso se debe asegurar que el sistema medido no se vea perturbado por la acción de la medición. Existen seis tipos diferentes de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, químicas y las de radiación –corpuscular y electromagnética, incluida la luz–. Cualquier dispositivo que convierta las señales de un tipo a otro diferente es un transductor. Las señales resultantes pueden ser de cualquier forma física útil. Los dispositivos que ofrecen una salida eléctrica se llaman sensores. La mayoría de los sistemas de medición usan señales eléctricas y por tanto, dependen de los sensores. Por otro lado los sistemas de medición electrónicos proporcionan las siguientes ventajas:

- Los sensores se pueden diseñar para cualquier cantidad que no sea eléctrica, seleccionando un material apropiado, entonces cualquier variación en un parámetro no eléctrico, implica una variación en el parámetro eléctrico, a

causa de la estructura electrónica compuesta por el sensor.

- La energía no necesita ser drenada en el proceso que se está midiendo, debido a que las señales de salida del sensor pueden amplificarse. Así, los amplificadores electrónicos producen ganancias de potencia superiores a  $10^{10}$  en una sola etapa. La energía a la salida del amplificador proviene de su fuente de alimentación y la señal de entrada del amplificador solo modula esta energía.
- Existe una variedad de circuitos integrados disponibles para el acondicionamiento o la modificación de la señal eléctrica y algunos sensores integran estos acondicionadores en un solo conjunto.
- La transmisión de la señal es más versátil con las señales eléctricas; en cambio, las señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas pueden ser apropiadas en algunas circunstancias, como en entornos donde la radiación es ionizante o en atmósferas explosivas, para eso se usan con más frecuencia los sensores con señales eléctricas.

Las palabras, sensor y transductor a veces se utilizan como sinónimos. Sin embargo, los sensores denotan la extensión de nuestras capacidades para obtener información sobre cantidades físicas, donde los sentidos humanos se encuentran limitados por la minuciosidad de la información. Un transductor implica que las señales de entrada y salida no sean las mismas, así un sensor puede no ser un transductor. La palabra modificador ha sido propuesta para instancias donde las cantidades de entrada y salida son las mismas, pero no ha sido ampliamente aceptada.

La diferencia entre el transductor de entrada –señal física a señal eléctrica– y el

transductor de salida –señal a visualización o respuesta eléctrica–, se utiliza muy poco en la actualidad y los transductores de entrada sólo se denominan sensores o detectores de radiación mientras que los transductores de salida se denominan actuadores y efectores. Los sensores tienen como objetivo adquirir información y los actuadores sirven principalmente para la conversión de energía. Algunas veces cuando se miden cantidades mecánicas, un sensor primario convierte el mensurando –parámetro a medir– en una señal de medición, entonces un sensor convertirá una señal en una señal eléctrica. Por ejemplo, el diafragma es un ejemplo de un sensor primario ya que ejerce presión cuando está sujeto a una diferencia de presión y los extensiómetros detectan este estrés.

Por otro lado, los acondicionadores de señal son elementos del sistema de medición que actúan dónde comienza una señal de salida del sensor eléctrico para luego producir una señal de transmisión, visualización o grabación adecuada, o en otro caso que cumplen mejor con los requisitos de un dispositivo estándar involucrado. Igualmente están constituidos por circuitos electrónicos que realizan las funciones de amplificación, cambio de nivel, alineación de impedancia, modulación y demodulación. En algunos estándares, al sensor más el subsistema de acondicionamiento de señal se le denomina como transmisor. Una de las etapas de los sistemas de medición suele ser digital para la salida de los sensores analógicos, entonces los convertidores analógicos digitales (ADC) producen, un código digital a partir de una señal analógica, estos ADC tienen una impedancia de entrada relativamente baja y requieren que su señal entrada sea de variación lenta o continua, con una amplitud dentro de los márgenes

específicos –generalmente menores que  $\pm 10V$ . En consecuencia, las señales de salida de los sensores pueden tener una amplitud en el rango de los milivoltios; por ese motivo, estas señales deben estar acondicionadas antes de que puedan enviarse al convertidor. En cuanto a la visualización de los resultados de la medición, pueden ser de forma analógica (óptica, acústica o táctil) y la grabación puede ser magnética, electrónica o en papel, teniendo en cuenta que la información que debe grabarse siempre sea eléctrica.

### 2.2.1. Clasificación de sensores

La clasificación que se hace de este apartado sobre los sensores se desarrolla según el libro anteriormente citado de Pallaá R., y Webster J. (2001). Introduction to Sensor-Based Measurement Systems. In Interscience Publication (Ed.), Sensors and signals condioniting.

Los sensores se clasifican como moduladores o autogeneradores, cuando necesitan de una fuente de alimentación . En los sensores de modulación –activos–, la mayor parte de la potencia de la señal de salida proviene de una fuente de alimentación auxiliar; así, la entrada solo controla la salida. Por su lado, en los sensores autogeneradores –pasivos–, la potencia de salida proviene de la entrada. En los sensores de modulación generalmente se requieren más cables que en los sensores de tipo de autogeneración, ya que sus cables son diferentes a los que suministran la señal de energía; además que la presencia de una fuente de alimentación auxiliar puede aumentar el peligro de explosión en atmósferas de esta característica. Sin embargo, los sensores de modulación tienen la ventaja de que el voltaje de la fuente de alimentación puede modificar

su sensibilidad general.

Si se considera las señales de salida, se puede clasificar a los sensores como analógicos o digitales. En los sensores analógicos, la salida cambia de forma continua a un nivel macroscópico; así, la información generalmente se obtiene a partir de la amplitud, aunque los sensores con salida en el dominio del tiempo generalmente se consideran analógicos. En cambio, los sensores cuya salida es una frecuencia variable se llaman quasi-digitales porque es muy fácil obtener una salida digital de ellos.

En cambio, en la salida de los sensores digitales toma la forma de etapas o estados discretos. Estos sensores digitales no requieren de un ADC, y su salida es más fácil de transmitir que la de los sensores analógicos. La salida digital también es más repetible y confiable, y a menudo más precisa. La desventaja es que los sensores digitales no pueden medir muchas cantidades físicas.

Al considerar el modo de operación, los sensores se clasifican en términos de su función en una deflexión o en un modo nulo. Por ejemplo, en los sensores de deflexión, la cantidad medida produce un efecto físico que genera en alguna parte del instrumento un efecto similar pero opuesto, el cual está relacionado con alguna variable útil. Así, un dinamómetro para medir la fuerza, es un sensor donde la fuerza a medir desvía un resorte al punto donde la fuerza que se ejerce es proporcional a su deformación, equilibrando la fuerza aplicada.

Los sensores de tipo nulo, intentan evitar la desviación del punto nulo aplicando un efecto que se opone al producido por la cantidad que se mide. En otras palabras, existe un detector de desequilibrio y algunos medios para restablecer

el equilibrio. Por ejemplo, en una balanza, al colocar una masa en una bandeja, se produce un desequilibrio indicado por un puntero. El usuario debe colocar uno o más pesos calibrados en la otra bandeja hasta que se alcance un equilibrio observable desde la posición del puntero.

Las medidas de los sensores tipo nulo solamente son más precisas ya que el efecto opuesto puede ser calibrado con una gran precisión estándar o a una cantidad de referencia. El desequilibrio sólo mide valores cercanos a 0 entonces puede ser muy sensitivo y no requiere de ninguna calibración. Aunque estos tipos de sensores nulo, son lentos y a pesar de los intentos de automatización, usando servomecanismos, su respuesta en el tiempo es usualmente no tan corta como en el de los sistemas de deflexión.

Si se considera la relación de entrada y salida, los sensores pueden ser clasificados de orden cero, primer, segundo y más alto orden. El orden se relaciona con la cantidad de energía almacenada en los elementos presentes del sensor y esto afecta su precisión y velocidad. Este tipo de clasificación es importante en el sensor que es parte de un sistema de control en lazo cerrado, ya que un retraso excesivo puede ocasionar oscilación.

En la tabla 2.1. se compara los criterios de clasificación dados por el autor, donde se proporciona algunos ejemplos para cada tipo de posibles situaciones de medición. Con el fin de estudiar este extenso número de dispositivos, se acostumbra a clasificar los sensores de acuerdo al mesurando. Por ejemplo, los parámetros más comunes son la temperatura, la presión, el flujo, el nivel, la humedad, el pH, la composición química, la posición, la velocidad, la

aceleración, la fuerza, el torque, la densidad, entre otros.

**Tabla 2.1. Clasificaciones de sensores según los criterios exhaustivos**

Criterio	Clase	Ejemplo
Fuente de alimentacion	Modulacion	Termistor
	Autogeneracion	Termocupla
Señal de salida	Análogo	Potenciómetro
	Digital	Encoder de posicion
Modo de operación	De deflexión	Acelerómetro de deflexión
	De comparación	Servo-alcelerómetro

Fuente: Sensor and signal conditioning, 2ed. - Ramon Pallàs-Areny, pág. 7

Sin embargo, esta clasificación es general debido a que el número de cantidades medibles parece ilimitado. Por ejemplo, las variedades de gases tóxicos presentes en una mina y de las cuales sólo se presenta interés en un tipo específico de gas. Por otro lado los ingenieros electrónicos prefieren clasificar a los sensores de acuerdo a la variable de cantidad eléctrica; es decir resistencia, capacitancia e inductancia, y después agregar sensores generadores de voltaje carga o corriente y otros sensores que no están incluidos en estos grupos, básicamente uniones P-N y sensores basados en la radiación. Esta clasificación puede reducir el número de grupos y habilitar el estudio indirecto de los acondicionadores de señal asociados. Las tablas siguientes 2.2. y 2.3., resumen los sensores más usuales y los métodos de sensado para cantidades comunes.

**Tabla 2.2. Sensores usuales y métodos de sensado para cantidades comunes 1**

Tipo de sensor	Aceleración Vibración	Caudal velocidad puntual	Fuerza	Humedad Humectación
Resistivo	Masa-resorte + medidor de tensión	Anemómetro	Medidor de tensión	Humistor
		Termistor		
		Blanco + medidor tensión		
Capacitivo	Masa-resorte + capacitor variable		Medidor de tensión capacitivo	Capacitor de variación dieléctrica
Inductivo y eletromagnético	Masa-resorte + LVDT	Ley de Faraday	Célula de carga + LVDT	
		Rotámetro + LVDT	Magnetos-tricción	
Autogenerador	Masa-resorte + sensor piezoelectrónico	Transporte térmico + Termocupla	Sensor piezoelectrónico	
Digital		Impulso, turbina		Sensor SAW
		Desplazamiento positivo		
		Vertimiento de vortex		
Unión PN				
Óptica, fibra óptica		Anemometría láser		Espejo refrigerado
Ultrasonido		Efecto Doppler		
		Tiempo de viaje		
		Vortex		
Otros		Presión diferencial		
		Área variable + sensor de nivel (canal abierto)		
		Área variable + desplazamiento		
		Efecto coriolis + fuerza		

Fuente: Sensor and signal conditioning, 2ed. - Ramon Pallàs-Areny, pág. 8

**Tabla 2.3. Sensores usuales y métodos de sensado para cantidades comunes 2**

Cantidad				
Nivel	Desplazamiento de distancia de posición	Presión	Temperatura	Velocidad Rapidez
Potenciómetro de flotación	Magnetoresistor	Tubo de Bourdón + potenciómetro	RTD	
LDR	Potenciómetro	Indicador de nivel por diafragma	Termistor	
Termistor	Medidor de tensión			
Capacitor variable	Capacitor diferencial	Capacitor de diafragma variable		
Magnetostricción	Corrientes de Foucault	Diafragma LVDT		Corrientes de Foucault
Magneto-resistivo	Efecto Hall	Reluctancia de diafragma variable		Efecto Hall
Flotador LVDT	Inductosyn			Ley de Faraday
Corrientes de Foucault	LVDT			LVT
	Resolver sincronizador			
		Sensor piezoeléctrico	Sensor piroeléctrico	
			Termocupla	
Varilla vibratoria	Encoder de posición	Tubo Bourdon + Encoder	Oscilador Quartz	Encoder incremental
Fotoeléctrico	Sensor fotoeléctrico		Diodo	
			Convertidor V/I	
Absorción	Tiempo de viaje			Efecto Doppler
Presión diferencial		Manómetro basado en líquido + sensor de nivel		

Fuente: Sensor and signal conditioning, 2ed. - Ramon Pallàs-Areny, pág. 9

Al comparar la ecuación, en cuyo sistema se practica un orificio en el centro de la base del tanque y compararla con la ecuación donde además de le instala una tubería de longitud L y diámetro d como se observa en la figura

### 2.2.2. Sensor de nivel SITRANS Probe LU

Este sensor de tipo ultrasonido, de la marca Siemens que se observa en la figura 2.2., se ha elegido debido a que es utilizado en el ámbito industrial; sirve de estándar en el área de sensores de ultrasonido, especializados en medir nivel en recipientes de almacenamiento y canales abiertos en las industrias de líquidos, aguas residuales, alimentos y también productos químicos. Esta ultima característica es gracias a su tecnología patentada de procesamiento Sonic Intelligence, que ofrece un amplio rango de medición.



(a) Vista de perfil

(b) Vista posterior

**Figura 2.2. Sensor de nivel: Sitrans Probe Lu**

Fuente: [https://www.equysis.com/producto/probe-lu\\_279](https://www.equysis.com/producto/probe-lu_279)  
Recuperado el 3 de julio del 2019

Las razones de haber elegido el siguiente sensor, son las siguientes:

- Tiene de una forma fácil de configurar y programar por medio de un programador infrarrojo manual o mediante su *software* para PC.
- El algoritmo de procesamiento de eco–campo, Sonic Intelligence, asegura un mejor rendimiento.
- Posee un ángulo de apertura muy superior al estándar; que produce que su pulso y sensibilidad sean más intensos, debido a su haz más compacto porque el sensor tiene transductores ultrasonido que son más precisos que otros sensores en el mercado.

En cuanto a sus características de funcionamiento, se puede citar las siguientes:

- Alimentación
  - Voltaje nominal de 24VDC con una resistencia en lazo cerrado máxima de 550 ohmios, con Voltaje máximo de 30VDC
  - Corriente ADC de 4-20mA
- Eficiencia
  - Rango de medición: Para el modelo de 6m, desde 0.25-6m en líquidos, y para el modelo de 12m, desde 0.25-12m en líquidos
  - Frecuencia: 54KHz
  - Precisión: 15% del rango –9mm para el de 6m y 18mm para el 12m–.
  - Tiempo de actualización con 4mA: menor o igual a 5s.
  - Ángulo del haz: 10° con un límite de -3dB
  - Memoria: EEPROM no volátil
- Interfase
  - Display: Posee una pantalla alfa numérica al igual que su control

infrarrojo en la disposición de su teclado.

- Configuración: Existen 3 formas: A través de un comunicador HART de mano, con el control infrarrojo y por ultimo por medio de un ordenador usando el programa Siemens Simatic PDM vía un módem HART que se conecta en paralelo con la resistencia.
- Salida analógica: de 4 a 20mA
- Condiciones de operación
  - Su operación de trabajo varía desde -40 a 80°C.
  - La presión con la que puede trabajar es 0.5bar.

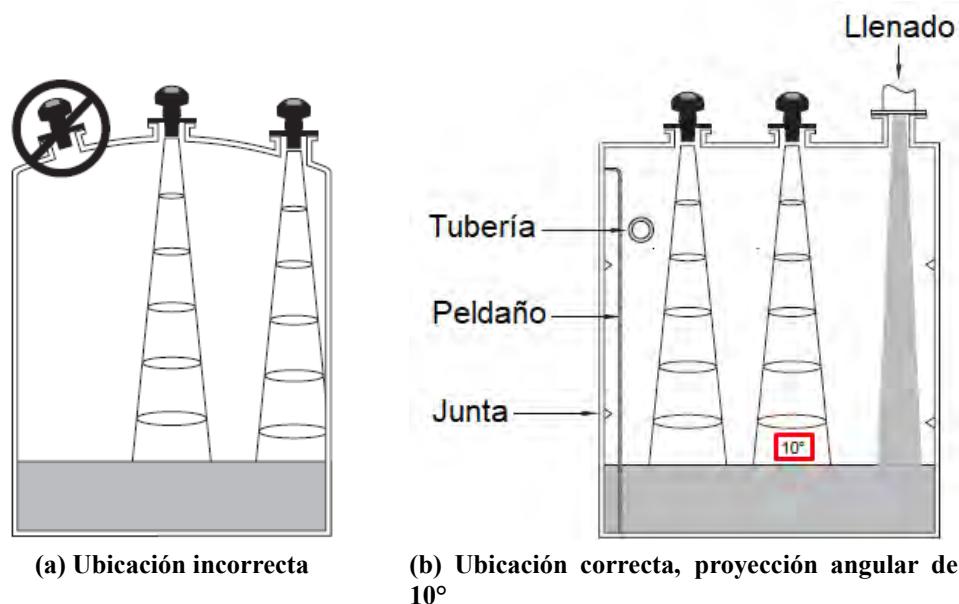
#### **2.2.2.1. Datos importantes para su operación**

- Preparación para el montaje

Como se muestra en la figura 2.3.a, la posición en que se debe colocar el sensor de nivel en un reservorio con parte superior ovalada no debe ser a un extremo ya que se debe considerar la apertura del ángulo qué hace el haz del sensor al proyectarse sobre el líquido en cuestión; es decir, los rayos incidentes que forman el ángulo de apertura deben ser igual en longitud para asegurar que se está midiendo un nivel a la misma altura.

Por otro lado, aunque la superficie de la tapa es totalmente recta como se muestra en la figura 2.3.b, se observa que el sensor puede ubicarse incluso en algunas zonas como alternativa de montaje, ya que los rayos que forman el ángulo de incidencia del sensor son iguales; sin embargo, se podría tener la desventaja, como en el caso anterior, que al colocarlo muy próximo a la pared lateral del recipiente, es posible que un rayo qué forma el ángulo toque

primero la pared y por su cuenta el rayo extremo incida en la superficie del líquido en consecuencia ambos rayos tendrían longitudes distintas. Según las especificaciones del fabricante, el ángulo de apertura máximo es de 10 grados, este dato es una sumamente importante ya que establece cuál es la distancia máxima con respecto a la pared del tanque, que el sensor se puede colocar sobre dicho recipiente.



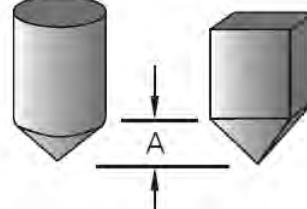
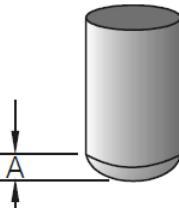
**Figura 2.3. Montaje y disposición del sensor de nivel**

Fuente:  
[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 12  
 Recuperado el 3 de julio del 2019

Teniendo en cuenta esta información se decide ubicar el sensor no tan próximo a las paredes del reservorio, pero en el caso de que el reservorio no tenga una base plana, sino alguna forma geométrica específica; por ejemplo, de forma ovalada o tal vez terminada en ángulo. Para esto se ofrece una salvedad especificada en el manual de configuración del sensor

y qué tiene que ver específicamente con la calibración del sensor. Más adelante se ofrecen más adelante se explica sobre la calibración del sensor, por el momento se prevé la posición del sensor, según la forma geométrica de la base del tanque de nivel. En la tabla 2.4., se muestra las posibles opciones de las formas geométricas que pueden tener los tanque.

**Tabla 2.4. Opciones de formas geométricas del fondo de un reservorio dónde se desea medir el nivel**

Valor PC050	Forma del recipiente	Base	Vinculación
1		Plana	P051
2		Cónica o piramidal	P051, P052
3		Parabólica	P051, P052

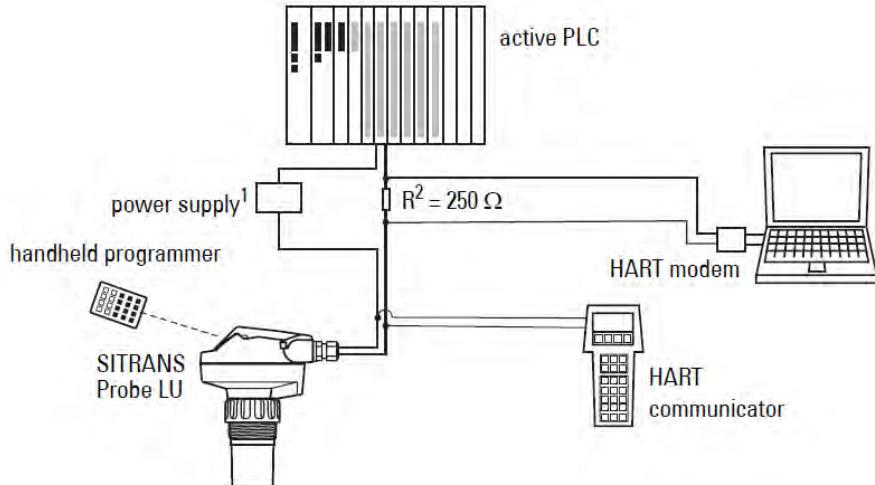
Fuente:

[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitran-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitran-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 35  
Recuperado el 3 de julio del 2019

Entonces se define el tipo de recipiente con que se cuenta y después se ingresa, según la tabla de arriba, el valor del parámetro P050 en la configuración del control para las formas geométricas según los recipientes usados.

- Circuito de alimentación

En la figura siguiente 2.4., se muestra el lazo cerrado del circuito para poder adquirir la señal del sensor.



**Figura 2.4. Circuito en lazo cerrado del sensor de nivel**

Fuente:

[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sittrans-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sittrans-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 5  
Recuperado el 3 de julio del 2019

La alimentación del sensor de nivel se hace por medio de una fuente de 24 voltios DC; además, en el lazo cerrado de alimentación, se coloca una resistencia variable que según el manual no debe ser mayor a 550 ohmios. En el ejemplo se utiliza 250 ohmios pero este valor es relativo a la calibración que se realizará según el entorno en donde se coloca el sensor. También si se desea, se puede agregar un Controlador Lógico Programable (PLC) en serie, entre la fuente de voltaje y la resistencia. Para la calibración, se tiene tres formas disponibles para ejecutar esta operación, la primera forma –usada en este proyecto–, es a través del control de mano. Debido a la practicidad en su uso, el control de la marca

Siemens, modelo 7ML58302AH que se muestra en la figura 2.5., sirve para la calibración a distancia –máximo hasta 60cm– del sensor por medio de comunicación infrarroja.



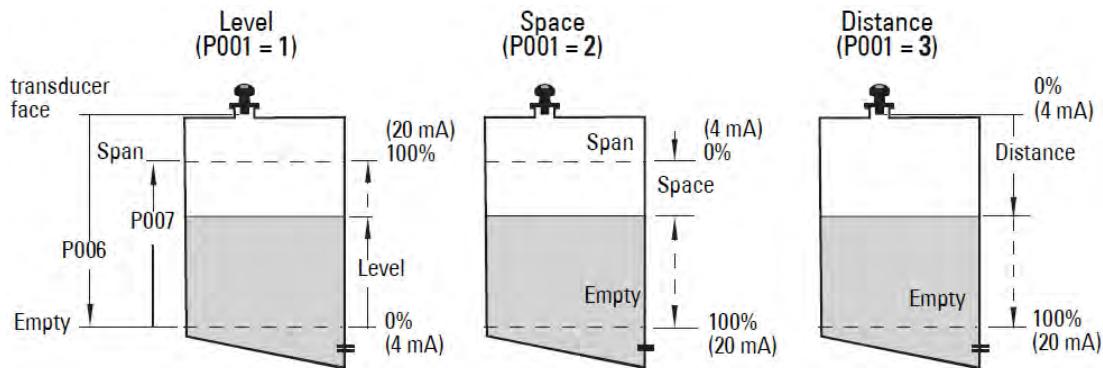
**Figura 2.5. Control de mano modelo del sensor de nivel, marca Siemens, serie: 7ML5830-2AH**

Fuente: <https://uk.rs-online.com/web/p/sensor-switch-software-programming-accessories/5132455/>  
Recuperado el 3 de julio del 2019

Como ejemplo se va a describir el proceso de cómo programar el sensor a fin de obtener distancias medidas en milímetros y establecer niveles de referencia según lo que se desea medir. Para cambiar a unidades de milímetros se presiona la tecla PROGRAM y después la tecla DISPLAY, para habilitar el modo de programación. Si se desea buscar los parámetros según los números, se puede usar las teclas direccionales del control o se puede presionar la tecla DISPLAY para introducir la opción deseada, esta variedad de opciones están resumidas en los anexos correspondientes de su manual, al igual que el significado de cada símbolo de los botones disponibles en el control. Después de haber presionado DISPLAY, se presiona el botón con el número 5 (P005), este comando se denomina

número del parámetro, a continuación se selecciona el valor del parámetro, por ejemplo, la tecla 3, cuyo significado es el valor de la unidad de medición, que está dado en milímetros, luego se culmina la operación presionando el botón ENTER. Así es cómo queda calibrado el sensor en milímetros, lo cual se puede verificar en el *display*.

Según el manual de uso del control, se establecen una serie de líneas de referencia y distancias qué se pueden medir con el sensor. La primera línea de referencia se denomina vacío –*empty*– y generalmente se emplea para establecer cuando el recipiente se ha vaciado por completo. La otra línea se denomina palmo –*span*–, la cual está vinculada con la distancia de supresión –*blanking distance*–. La distancia de supresión que es de 0.25 metros, fijada por defecto por el fabricante, se define como la distancia mínima a la que se debe colocar un líquido para poder realizar la medida del nivel; si se invade esta distancia, el sensor no será capaz de medir el nivel ya que es a partir de esta línea dónde se puede ejecutar la medición. Por otro lado la línea de palmo es la distancia entre la cara del transductor y el líquido, se define como el 110% de la distancia de supresión. Estas líneas de referencia se observan en la siguiente figura 2.6..



**Figura 2.6. Líneas y distancias de referencia para la medición del sensor de nivel**

Fuente:

[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 23  
Recuperado el 3 de julio del 2019

Se definen ahora 3 longitudes importantes: La primera se denomina nivel *level*, que como su nombre indica, mide el nivel del líquido contenido en un reservorio, teniendo como referencia la línea de vacío. La segunda longitud es la denominada espacio *space*, la cual mide la distancia entre el nivel del líquido y la línea de referencia *span*. Por último la longitud denominada distancia *distance*, que mide la brecha que existe entre el nivel de líquido y la cara del transductor del sensor, como se muestra en la figura 2.6..

Otro forma para la programación del sensor y su respectiva calibración es la que se ofrece mediante un comunicador Hart que se conecta directamente a las entradas del sensor de nivel. También se ofrece la posibilidad de programar el sensor vía software, este procedimiento se realiza con un módem HART que se adquiere muy aparte del sensor de nivel y el cual va conectado directo al puerto COM de la computadora,

generalmente se lo programa de esta forma cuando se va a utilizar con un PLC.

Según el manual, al colocar una resistencia en serie con el sensor y la fuente de poder, se puede calibrar el sensor para obtener medidas de voltaje y convertirlo a distancia, esto se podrá verificar con la medición mostrada en el *display* del sensor. Despues de haber calibrado el sensor, se utilizará un sistema de Adquisición de Datos (DAQ), con una circuitería acondicionada, que posteriormente se detallará para la medida del nivel.

### **2.2.3. Válvulas hidráulicas de acuerdo al método de control**

Según la página de suministro de solenoides y válvulas de la empresa Kaidi Electromagnetic, existen tres y hasta 4 tipos de válvulas hidráulicas de acuerdo al método como se realiza su control, en la figura siguiente se muestra un ejemplo de este tipo de valvulás.



**Figura 2.7. Válvulas hidráulicas según el método de control**

Fuente: <http://www.solenoidsupplier.com/hydraulic-control-valve-types/>  
Recuperado el 11 de agosto del 2019

- Válvulas controladas directamente por información digital.
- Válvulas de control de encendido y apagado (On - off)

Son una de las válvulas, de tipo hidráulico más comunes y pueden ser controlados por diferentes tipos de actuadores de potencia, como solenoides de apagado hidráulico para válvulas de cierre controladas por este medio, también con palancas manuales para válvulas de cierre y motores para válvulas de cierre de tipo de accionamiento eléctrico. Estos tipos de válvulas establecen la posición del núcleo de la válvula o el resorte en el mismo centro de la válvula a un cierto estado de funcionamiento, lo que hace que la presión el flujo y su dirección permanezca iguales.

- Válvulas de servo control

Son aquellas válvulas que tienen como señales de entrada cantidades eléctricas o mecánicas, y en su mayoría son señales de desviación; es decir, se toma el valor de diferencia entre las señales de entrada y las señales de retroalimentación. Los parámetros de salida de la válvula –presión y flujo–, son controlados de forma continua y proporcional en función de la cantidad de entrada en la válvula. En cuanto a la eficiencia, es similar a las válvulas proporcionales, que tienen una capacidad dinámica superior y un rendimiento estático. Así las válvulas de servo control ofrecen una muy alta precisión, repetitividad, frecuencia y muy baja histéresis. En su mayoría, estas válvulas se utilizan en circuitos de control hidráulico cerrado, que requieren un mayor rendimiento de trabajo y un tiempo de respuesta corto. Además se utilizan en conjunto con sistemas electrónicos más sofisticados y en circuitos de lazo cerrado, debido a esto su precio es más costoso, por eso el control mediante

válvulas proporcionales puede reemplazar a la mayoría de máquinas con servoválvula, sin este alto precio.

- Válvulas de control proporcional

En este caso se utilizan solenoides proporcionales o motores de torque para convertir las señales de entrada en fuerza o desplazamiento mecánico. De la misma forma la salida de la válvula proporcional, que puede ser presión o flujo, se controla de forma continua y proporcional en función del volumen de entrada. Comúnmente este tipo de válvulas pertenecen a sistemas de control hidráulico en un circuito abierto, aunque también intervienen en procesos de circuito cerrado. Este tipo de válvulas al permitir el posicionamiento infinito de los carretes, proporcionan volúmenes de flujo que son prácticamente infinitos y los cuales se pueden ajustar. Igualmente los solenoides controlados por fuerza, se utilizan también para lograr el posicionamiento infinito de estos carretes. Entonces este posicionamiento variable permite el diseño de carretes con muescas de medición para el control del flujo y la velocidad, así como también el control direccional; todo esto en una sola válvula sin requerir válvulas separadas para la dirección y la velocidad. La otra ventaja resaltante es que cuando el circuito requiera más de una velocidad, se logra simplemente cambiando el nivel de señal eléctrica para entregarle el flujo y velocidad requeridos, así ya no se necesitan componentes hidráulicos adicionales. A continuación se muestra la válvula proporcional de la marca Danfoss en la figura 2.8., perteneciente a la gama EV260B, la cual posee una válvula solenoide de dos vías con una

función de modulación proporcional y con conexiones para tuberías de 1/2”, también son denominadas válvulas proporcionales con solenoide.

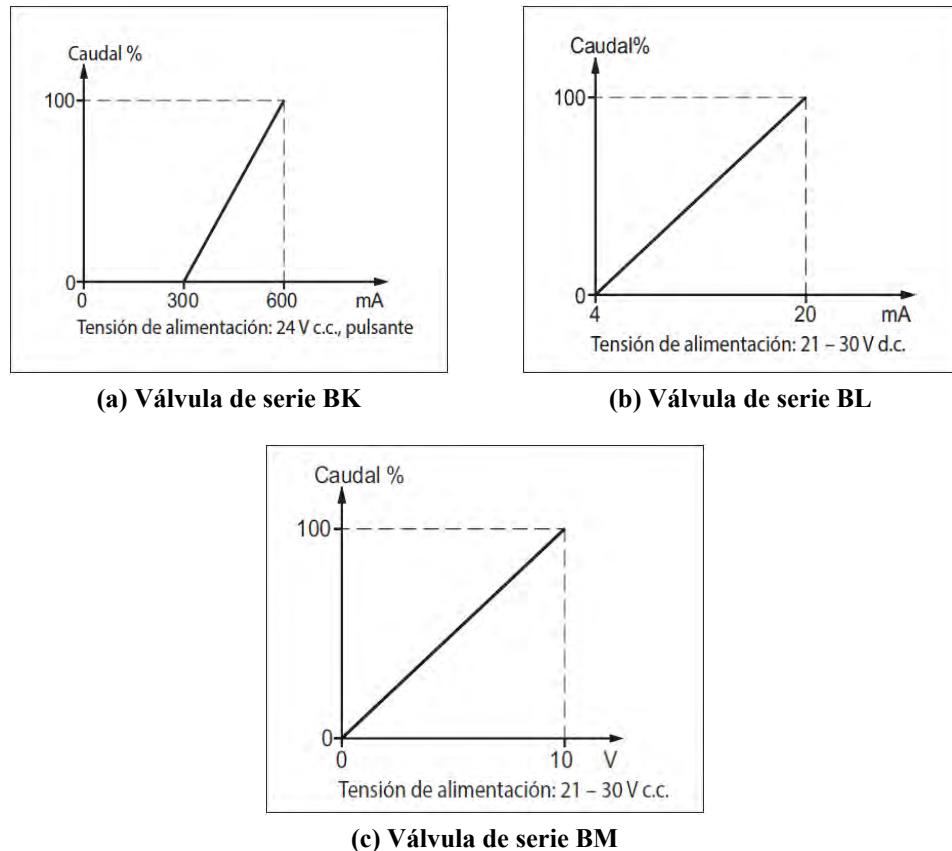


**Figura 2.8. Válvula proporcional Danfoss, serie: BK024d**

Su funcionamiento es de la siguiente forma, la regulación continua de la corriente en la bobina sitúa la armadura en cualquier posición del tubo de la misma armadura y así permite ajustar la bobina entre las posiciones de cierre y apertura completos, entonces la válvula se abre totalmente cuando la corriente de la bobina alcanza su valor máximo y se cierra con una corriente mínima requerida. Las principales características de este tipo de servo válvulas son las siguientes:

- Se puede usar para aceite y líquido neutros
- Es de característica lineal en todo el rango de regulación
- Si existe un fallo de suministro eléctrico se cierra totalmente
- El rango de caudal es :  $0.5 - 12.7 m^3/h$
- La temperatura del ambiente está en un rango de: 10 a 80°C
- Las roscas son de: 1/4” y 3/4”
- Según el modelo y tipo de válvula el accionamiento de apertura y cerrado, como se muestra en la figura 2.9. se controla a través de corriente o voltaje en los rangos siguientes: Tipo BL de 4 - 20mA,

tipo BK de 300-600mA y de tipo BM de 0-10V.

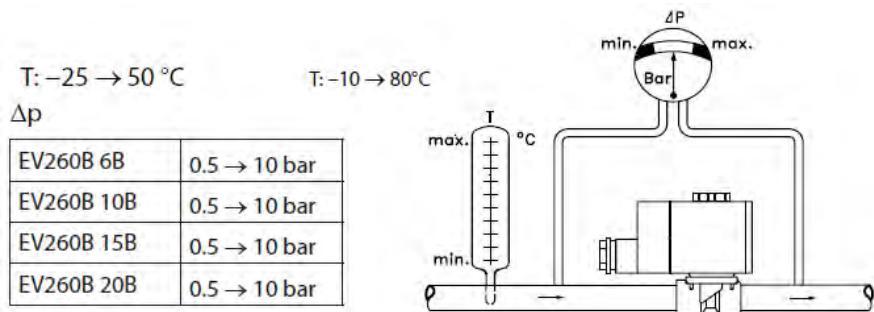


**Figura 2.9. Válvulas proporcionales Danfoss, según la serie**

Fuente:  
[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitrans-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 12  
 Recuperado el 3 de julio del 2019

Cabe acotar que las válvulas que se activan con voltaje no requieren de un rango de presión mínimo para su operación mientras que las válvulas activadas por corriente sí requieren una presión mínima para su funcionamiento. En el caso del modelo BL024D con bobina de la serie EV260B, de 1/2', que se utiliza en el presente proyecto se activa con un rango de presión de entre 0.5 a 10 bares, siendo 0.5 bares, la mínima presión para operar la válvula con corrientes de entre 4 a

20mA. También requiere un rango de temperatura especificado por el fabricante; estas condiciones se observan en el esquema 2.10. mostrado a continuación.



**Figura 2.10. Rango de Presión y temperatura para la operación de las válvulas de corriente Danfoss**

Fuente:

[http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitran-ProbeLU\\_hartman\\_7ML19985HT02\\_3.pdf](http://www.lesmaninst.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-SITRANS-ProbeLU/Siemens-Sitran-ProbeLU_hartman_7ML19985HT02_3.pdf), pág. 23  
Recuperado el 3 de julio del 2019

#### 2.2.4. Servomotor

El servomotor mostrado en la figura 2.11. de la gama SAVÖX, ofrece alta confiabilidad, precisión y rendimiento, están presente también en eta gama aquellos que incluyen motores estándares, que no presentan escobillas y tampoco núcleo, pero disponen de trenes de engranajes ,metálicos de alto voltaje y cajas de metal. En la serie SB-2292SG, su diseño ofrece la capacidad que el servomotor pueda ser programable digitalmente, además de proporcionar un elevado torque para el motor de núcleo estándar y de eje de salida tipo bola; es decir, es idóneo si se desea un par elevado con una velocidad razonable para un caja de tamaño estándar.



**Figura 2.11. Servomotor SAVOX, SB-2292SG de 45kg.cm**

Fuente: <https://www.savoxusa.com/products/savsb2292sg-monster-performance>  
Recuperado el 11 de agosto del 2019

Este servo estándar de alto par puede girar de 0 a 110°. Además, puede usar cualquier código de servo, hardware o biblioteca para controlarlo, por lo que es ideal para el modelamiento de carros y aviones DC a escala, ya que cabe en lugares pequeños. El servo de engranajes de metal también cuenta con una selección de brazos, conocidos como *horns*, para que pueda ser configurado de forma rápida, estos brazos son de diferentes formas geométricas como se observa en la figura 2.12., con el fin de adaptarse a la necesidad de su uso.



**Figura 2.12. Brazos o hélices de los servomotores**

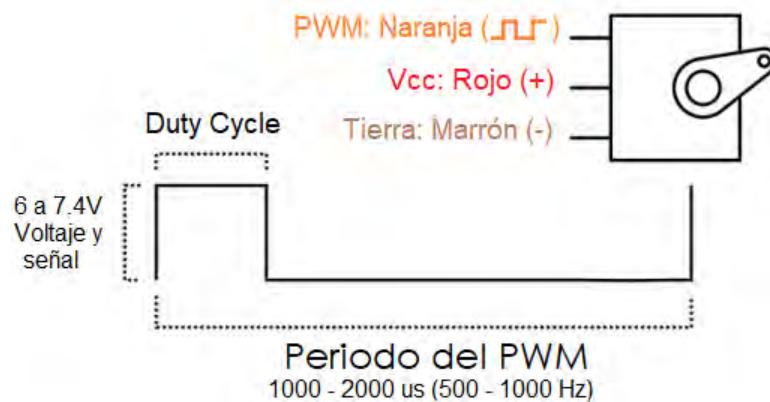
Fuente: <https://hitecrcd.com/products/servos/servo-parts-and-accessories/servo-horns-and-hardware/product>  
Recuperado el 11 de agosto del 2019

Las especificaciones con que cuenta este servomotor son las siguientes:

- Peso: 81 g
- Sistema de control: PWM
- Dimension: 40.3x20.2x38.7mm
- Ángulo de giro máximo: 130°
- Voltaje de operación: 4.8 V a 6V
- Torque: 22kg.cm con 6V, 31 kg.cm con 7.4V,y 45kg.cm con 8.4V
- Velocidad de operación: 0.085sec/60° a 6V, 0.07sec/60° a 7.4V y 0.055sec/60° a 8.4V
- Corriente de operación: 7.5A a 6V y 9.2A a 7.4V
- Rango del ancho del pulso: 800 $\mu$  a 2200 $\mu$
- Rango de temperatura: -10°C a 50°C

En la siguiente figura 2.13., se muestra la tipología de los colores que se dispone en el cable de los servomotores SAVOXeste servomotor, el cual es controlado a

través de una señal PWM, además se representa el ciclo de trabajo que posee este dispositivo según la alimentación ya sea de 4.8V o 6V



**Figura 2.13. Ciclo de operación del servomotor SAVÖX, SB-2292S**

### 2.3. Microcontroladores para adquisición de datos

En los sistemas de adquisición de datos para adquirir la señal de entrada del sensor de nivel y enviar la señal de salida hacia las válvulas proporcionales, para controlar la apertura y cierre de las mismas, se ha propuesto en este proyecto usar un tipo de controlador de los tres disponibles, los cuáles son usualmente utilizados en los cursos de control. El primer sistema de adquisición que estará en la panel de control será, es el microcontrolador Raspberry PI, el segundo sistema es el procesador Delfino DSP - TMS320f28335 de la marca, Texas instruments, y para el uso en este proyecto esta el FPGA, MyRIO-1900 que se muestra en la figura 2.14..



**Figura 2.14. FPGA:MyRio 1900**

Este FPGA, es un dispositivo portable y reconfigurable que permite el diseño e implementación de un control digital que puede ser utilizado en automatización, robótica, sistemas mecatrónicos, etc. Sus principales características son:

- Procesador: De tipo Xilinx Z-7010 a 667MHz y de dos núcleos
- Memoria: No volátil de 512MB, memoria ddr3 de 256MB
- Tipo de FPGA: Xilinx Z.7010
- Características Wireless: IEEE y 802.11 b.g.n con un rango de hasta 150m
- Puertos: Usb 2.0 para el host y el dispositivo
- Entrada analógica: Con un tiempo de muestreo de 500 kS/s y una resolución de 12 bits
- Salida analógica: de 245 kS/s una resolución de 16 bits con sobrecarga de protección de 16V
- Alimentación: En el rango de 6 a 16VDC
- Máxima potencia consumida: 14W y potencia típica de 2.6W

- Temperatura máxima cerca del dispositivo a 40°C
- Temperatura del medio ambiente: -20°C - 70°C
- Altitud máxima: 2000m

#### 2.4. Electrobomba de agua

Este tipo de bomba están diseñada para el bombeo de agua, gracias a su diseño hidráulico que le permite desarrollar presiones elevadas en relación a la baja potencia de accionamiento del motor. Si se desea utilizar una bomba de agua se debe tomar en cuenta algunos aspectos relevantes como el tipo de agua que se va a bombear, de dónde procede el agua y cuál es la potencia necesaria. En relación al tipo de agua que se va a bombear existen dos posibilidades, la primera son bombas para aguas limpias es decir aguas claras, desde agua para consumo doméstico, agua de mar o aguas tratadas con cloro. Y la segunda opción son bombas para aguas sucias, las cuales son provenientes por ejemplo de un inodoro y que contienen partículas en suspensión como las presentes en aguas estancadas.



Figura 2.15. Bomba de agua PKM60-1, de uso para aguas claras

El segundo aspecto se refiere a la procedencia del agua a bombear, condiciona el emplazamiento del equipo; por ejemplo si procede de un pozo, debería instalarse una bomba sumergible y si procede de un depósito deberá instalarse una bomba de agua de superficie. Por último el tercer aspecto que debe considerarse es la potencia que va a tener la bomba, lo cual está relacionado con la cantidad de presión y las aguas necesarias; así un óptimo rendimiento se determina con el caudal nominal –volumen de agua requerido en un tiempo determinado–, y la altura manométrica y la potencia absorbida de la bomba.

A través de un ejemplo se hará el cálculo para determinar la potencia de una bomba de agua; y así se podrá elegir posteriormente qué bomba es la idónea para el proyecto.

Previamente se define los siguientes parámetros para hacer el cálculo posterior, este ejemplo fue extraído de la página web:  
<https://www.tuandco.com/aprendeymejora/>

$$\text{Altura geométrica} = \text{altura de aspiración} + \text{altura de impulsión}$$

$$Hg = Ha + Hi$$

Se desea elevar agua desde un reservorio hasta un depósito situado en una cota más elevada y obtener un caudal de 5.000 l/h. Los datos generales que se tienen son los siguientes:

- Altura geométrica = Altura aspiración + Altura de impulsión: 17m
- Recorrido total de la tubería: 43m
- Diámetro interior de la tubería: 38mm

Características de la aspiración

- Altura de aspiración: 2m
- Longitud de la tubería: 8m
- Número de válvulas de pie: 1
- Número de codos de 90º: 1

#### Características de la impulsión

- Altura de impulsión: 15m
- Longitud de la tubería: 35m
- Nº de válvulas retención: 2
- Número de codos de 90º: 2

#### Operaciones para el cálculo de la instalación:

- Pérdidas de Carga en la aspiración:
- Longitud de la tubería: 8m
- Pérdidas singulares: 10m (válvula de pie) + 5m (Codo de 90º)
- Longitud equivalente de la tubería: 23m

Con este valor se puede obtener la pérdida en metros columna de agua (m.c.a.) a través de la tabla de pérdidas de carga. Es decir, 5.000L/h en una tubería de 38mm de diámetro, corresponden a 4.3m por cada 100m lineales de tubería. Entonces:  
 $4.3 \times 23/100 = 0.99\text{m.c.a.}$

#### Pérdidas de carga en la impulsión:

- Longitud de la tubería: 35m
- Pérdidas singulares: 10 m (válvula de compuerta) + 10 m (válvula de retención) + 10 m (2 codos de 90º).
- Longitud equivalente de la tubería: 65 m

Y se obtiene:  $4,3 \times 65/100 = 2,79$  m.c.a. Entonces el resultado del cálculo es el siguiente:

$$\text{Altura}_{\text{manométrica total}} = \text{Altura}_{\text{aspiración}} + \text{Altura}_{\text{impulsión}} + \text{Perdidas}_{\text{carga de impulsión}}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura}_{\text{manométrica total}} &= 2 + 15 + 0,99 + 2,79 \\ &= 20,78 \text{ m.c.a.} \end{aligned}$$

Así, la bomba de agua con una especificación de 5000L/h podrá elevar hasta un máximo de 20.78 metros de una columna de agua (m.c.a), después con este ultimo dato, el caudal que suministra la bomba y con las tablas que ofrecen los fabricantes se puede elegir el modelo adecuado.

## 2.5. Método de Linealización por series de Taylor

El método de linealización tiene como objetivo aproximar linealmente una función no lineal mediante la expansión en series de Taylor que está definida por:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k f(x)}{dx^k} \right|_{x_0} (x - x_0)^k$$

Donde la función  $f(x)$  es la expansión alrededor del punto  $x_0$ . Cuando se desea aplicar este método a una variable de estado  $\dot{x}$  que es igual a una función aproximada  $f(x)$ , se desprecia los términos a partir del segundo orden ya que esta función lineal resultante ofrece una buena aproximación.

$$\dot{x} \approx f(x_{op}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_{op}} (x - x_{op})$$

Para un modelo en espacios estados de múltiples entradas y múltiples salidas, el método general se representa así:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ f_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ \vdots \\ f_{n-1}(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ f_n(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_{p-1}(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ g_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ \vdots \\ g_{p-1}(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \\ g_p(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)) \end{bmatrix}$$

Donde  $n$  es el número de variables de estado;  $m$ , el número de variables de entradas y  $p$ , el número de variables de salida. Esto se representa vectorialmente con la forma simplificada siguiente:

$$\dot{\vec{X}}(t) = F((t), \mu(t))$$

$$\vec{Y}(t) = G((t), \mu(t))$$

Entonces la expansión vector de Taylor, es espacio de estados linealizados queda como:

$$\dot{\vec{X}}_\delta(t) = A\vec{X}_\delta + B\vec{U}_\delta$$

$$\vec{Y}_\delta(t) = C\vec{X}_\delta + D\vec{U}_\delta$$

Donde las nuevas variables de estado lineal se representan por:  $X_\delta = x - x_{op}$ ,  $U_\delta = \mu - \mu_{op}$  y por lo tanto la salida se evalúa en:  $Y_{op} = G(x_{op}, \mu_{op})$  Los parámetros que definen al estado de operación se definen como:

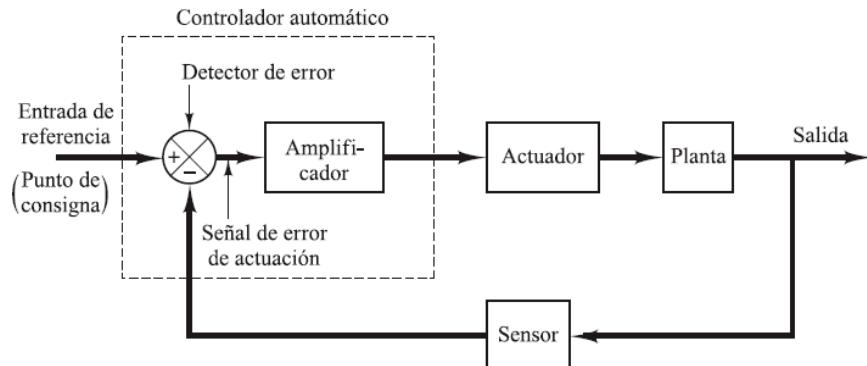
$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial F_i}{\partial x_i} \Big|_{x_{iop}, \mu_{iop}}, \dim(A) = (n \times n) \\ B &= \frac{\partial F_i}{\partial \mu_i} \Big|_{x_{iop}, \mu_{iop}}, \dim(B) = (n \times m) \\ C &= \frac{\partial G_i}{\partial x_i} \Big|_{x_{iop}, \mu_{iop}}, \dim(C) = (p \times n) \\ D &= \frac{\partial G_i}{\partial \mu_i} \Big|_{x_{iop}, \mu_{iop}}, \dim(D) = (p \times m) \end{aligned}$$

## 2.6. Controladores en Tiempo Continuo

En esta sección se detallará los tipos de controladores del libro cuyo es Ogata K. (2010). Introducción a los sistemas de Control y Modelado matemático de sistemas de control. In Pearson Educación (Ed.), *Ingeniería de control moderna*. (pp. 1–60).

### 2.6.1. Sistemas de control automático

Un controlador automático compara la medida del valor real a la salida de una planta con la entrada de referencia –*setpoint*–, después determina la desviación y genera una señal de control que minimiza la desviación a un valor pequeño o incluso a cero. La forma en que el controlador producen la señal de control se denomina acción de control.



**Figura 2.16. Diagrama de bloques de un sistema de control industrial**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 21  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

En la figura 2.16., se ejemplifica un diagrama de bloques para un sistema de control Industrial que está constituido por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor de medición. El funcionamiento es el siguiente, el controlador detecta la señal de error, generalmente a un nivel muy bajo de potencia, y amplifica esta señal a un nivel que sea lo suficientemente elevado. A la salida del controlador está ubicado un actuador, qué puede ser un motor, una válvula u otro dispositivo mecánico de potencia que produzca una entrada para la planta de acuerdo con la señal de control. El elemento de medición, en este caso el sensor, convierte la señal de salida o variable de salida en una variable que se pueda manejar tal como un desplazamiento una presión o un voltaje Y que además puede usarse para comparar la salida con la señal de entrada deseada. Este último elemento está en la trayectoria de retroalimentación del sistema del lazo cerrado.

Los controles industriales se pueden clasificar de acuerdo con sus acciones de control, así se tienen los siguientes:

- De 2 posiciones, conocida también como *on-off*
- Controladores proporcionales
- Controladores Integrales
- Controladores proporcionales integrales
- Controladores proporcionales derivativos
- Controladores proporcionales integrales derivativos

La gran mayoría de los controladores industriales emplean energía eléctrica o un líquido presurizado –aceites o aire– como fuente de energía. Así los controladores también pueden clasificarse según el tipo de energía que utilizan en su operación, tales como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. Por otro lado, para la elección del tipo de controlador se debe ejecutar basándose en la naturaleza de la planta y las condiciones de operación que abarcan la seguridad, el costo, la disponibilidad, la fiabilidad, la precisión, el peso y el tamaño.

A continuación se explicará las acciones de control según los tipos de controladores.

#### **2.6.1.1. Acción de control de dos posiciones *on-off***

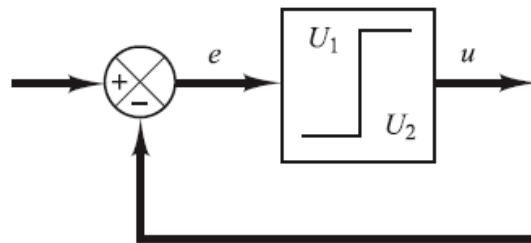
En este sistema el elemento que actúa sólo tiene 2 posiciones fijas; es decir, encendido y apagado. Por esta razón este control es relativamente simple y barato y su uso se ha masificado a nivel industrial y doméstico. Por ejemplo, si la señal de salida de un controlador es  $\mu(t)$  y la señal de errores  $e(t)$ , entonces para este tipo de control la señal de salida permanece en un valor que puede ser máximo o mínimo, dependiendo si la señal de error es positiva o negativa. Esto

se expresaría de la siguiente forma:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0$$

$$= U_2, \text{ para } e(t) < 0$$

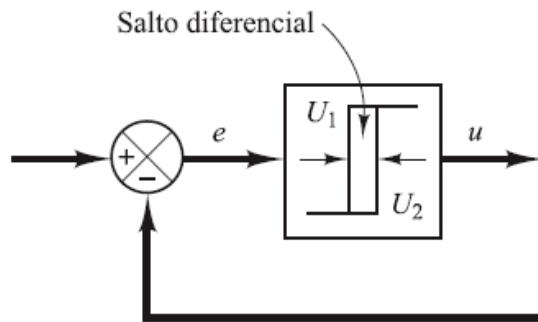
Donde  $U_1$  y  $U_2$  son constantes. Comúnmente el valor mínimo de  $U_2$  es cero ó  $-U_1$ . Solamente los controladores de dos posiciones son dispositivos eléctricos como una válvula eléctrica operada por solenoides de posiciones abierto y cerrado. En la figura 2.17. se muestra los diagramas de bloques para el caso de un contralor de dos posiciones.



**Figura 2.17. Diagrama de bloques de un controlador *on-off***

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 23  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

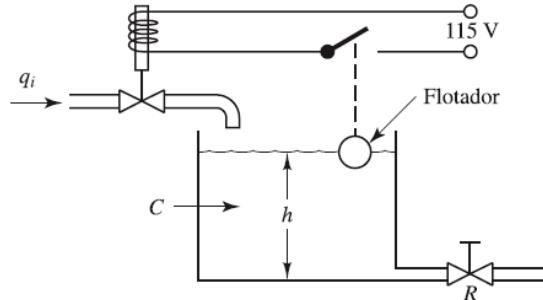
La figura 2.18. muestra la brecha diferencial que se denomina al rango en el que debe moverse la señal de error antes que se produzca la conmutación. Esta brecha hace que la salida del controlador mantenga su valor presente hasta que la señal de error se haya desplazado ligeramente después del cero.



**Figura 2.18. Diagrama de bloques de un controlador con salto diferencial**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 23  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

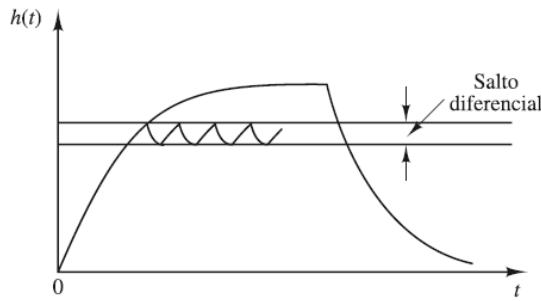
Un ejemplo ilustrativo lo conforma un tanque de nivel con una válvula solenoide donde se controla el flujo de entrada.



**Figura 2.19. Sistema de control de nivel de líquidos**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 23  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

En este caso el flujo de agua es una constante positiva o cero, cuando no hay flujo, y la señal de salida se desplaza entre los límites de apertura y cierre, esto se puede observar en la curva exponencial de salida de la figura 2.20., la cual está compuesta por la curva de llenado y de vaciado.



**Figura 2.20. Curva de nivel  $h(t)$  vs.  $t$  para el sistema de nivel**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 23  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

### 2.6.1.2. Acción de control proporcional

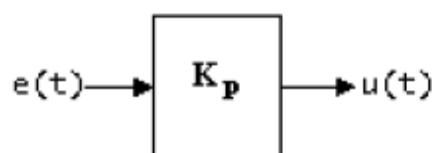
En un control proporcional la acción de control tiene una relación entre la salida y la señal de error, qué es simplemente una constante denominada  $k_p$ , considerada la ganancia proporcional.

$$\mu(t) = K_p e(t)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Este tipo de control tiene las siguientes ventajas:

- Puede reducir aunque no eliminar el error en estado estable
- También puede reducir el tiempo de subida
- Podría incrementar la inestabilidad del sistema



**Figura 2.21. Relación entre la entrada y la salida de un controlador proporcional**

Sin importar cómo es el mecanismo o la forma de potencia de operación, este tipo de control resulta simplemente en un amplificador con una ganancia regulable.

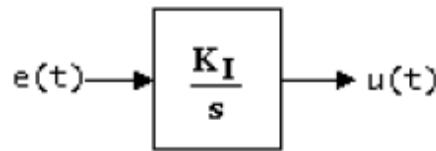
### 2.6.1.3. Acción de control integral

Para este tipo de control el valor de la salida del controlador,  $\mu(t)$ , cambia a una taza proporcional a la señal de error, lo cual significa que,

$$\begin{aligned}\frac{d\mu(t)}{dt} &= K_i e(t) \\ \mu(t) &= K_i \int_0^t e(t) dt\end{aligned}$$

Dónde  $K_i$  que es una constante regulable, denominada tiempo integral y la función de transferencia del controlador integral es.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$



**Figura 2.22. Relación entre la entrada y la salida un controlador integral**

### 2.6.1.4. Acción de control derivativo

El controlador derivativo tiene la siguiente ganancia derivativa  $K_D = K_P \cdot T_d$ , donde  $T_d$  se denomina tiempo derivativo y La señal de control viene dado por:

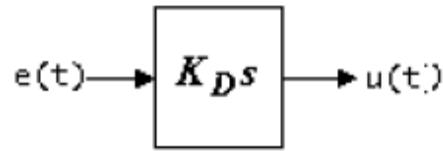
$$\begin{aligned}u(t) &= K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \\ u(t) &= K_D \frac{de(t)}{dt}\end{aligned}$$

Y su función de transferencia viene representado por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_D s$$

Presenta las siguientes ventajas:

- Puede incrementar la estabilidad
- Puede reducir el sobrepasso u *overshoot*
- Puede mejorar la respuesta transitoria
- Tiene tendencia a ser un sistema inestable



**Figura 2.23. Relación entre la entrada y la salida de un controlador derivativo**

#### 2.6.1.5. Acción de control proporcional-integral

La acción de este controlador resulta de la una suma entre la acción del controlador proporcional y la del controlador integral, que se representa como:

$$\mu(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Y su respectiva función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

### 2.6.1.6. Acción de control proporcional-integral-derivativa

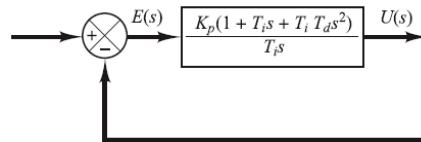
La combinación de las versiones de los controladores proporcional integral y derivativo se denomina acción de control PID. La ventaja de la acción combinada de estos tres tipos de controles es que coge los beneficios de cada control individual. Su ecuación viene definida por:

$$\mu(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Y su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde nuevamente  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo. En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques de un controlador PID



**Figura 2.24. Diagrama de bloques de un controlador PID**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 25  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

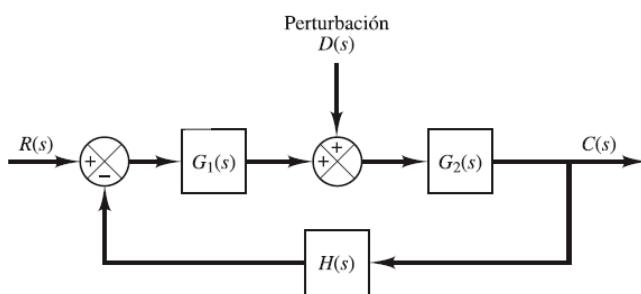
En la tabla siguiente se resume los efectos de cada ganancia  $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$

**Tabla 2.5. Efectos de los tipos de ganancias**

K	Sobreimpulso	Tiempo de subida	Tiempo de establecimiento	Error en estado estable
$K_P$	crece	decrece	cambio pequeño	decrece
$K_I$	crece	decrece	crece	gran reducción
$K_D$	decrece	cambio pequeño	decrece	cambio pequeño

### 2.6.1.7. Sistema en lazo cerrado sujeto a perturbación

En la figura 2.25., se muestra un sistema en lazo cerrado que está sujeto a una perturbación, cuando se presentan dos entradas, las cuales son: la entrada de referencia y la perturbación, en un sistema lineal; una de estas puede trazarse independientemente y las salidas correspondientes a cada entrada puede sumarse para obtener una salida total. Cuando se produce una entrada en el sistema se debe tomar en cuenta a qué signo (sustracción o suma) se está introduciendo, para ejecutar la operación en el bucle.

**Figura 2.25. Sistema en lazo cerrado, sujeto a perturbaciones**

Fuente: Ingeniería de control, Katsuhiko Ogata, 5ta. Ed., pág. 26  
Recuperado el 13 de agosto del 2019

Analizando el sistema de la figura anterior, se observa que el efecto de la perturbación  $D(s)$  resulta en un sistema que está inicialmente relajado, mayor o igual a cero, después se podría calcular la respuesta  $C_D(s)$  toman en cuenta sólo

la perturbación. Esta respuesta se puede hallar con la siguiente relación.

$$\frac{C_D(s)}{D(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

Si se considera la respuesta a la entrada de referencia  $R(s)$ , se puede asumir que la perturbación es 0; así la respuesta  $C_R(s)$  a la entrada de referencia se obtiene a partir de la relación:

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

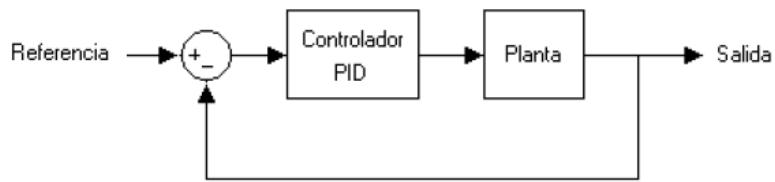
Cuando se aplica simultáneamente una entrada de referencia y una perturbación, se obtiene una respuesta que es simplemente la suma de las dos respuestas individuales. Entonces la respuesta producida por la aplicación de estas dos señales de entrada viene dado por:

$$\begin{aligned} C(s) &= C_R(s) + C_D(s) \\ &= \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} [G_1(s)R(s) + D(s)] \end{aligned}$$

### 2.6.2. Eficiencia del Controlador

En el diagrama de bloque de la figura 2.26. se muestra un controlador PID. El *performance* de un controlador en general puede ser obtenido para cada caso de controladores P, PI y PID. Por ejemplo, sea la siguiente planta:

$$G_p(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$



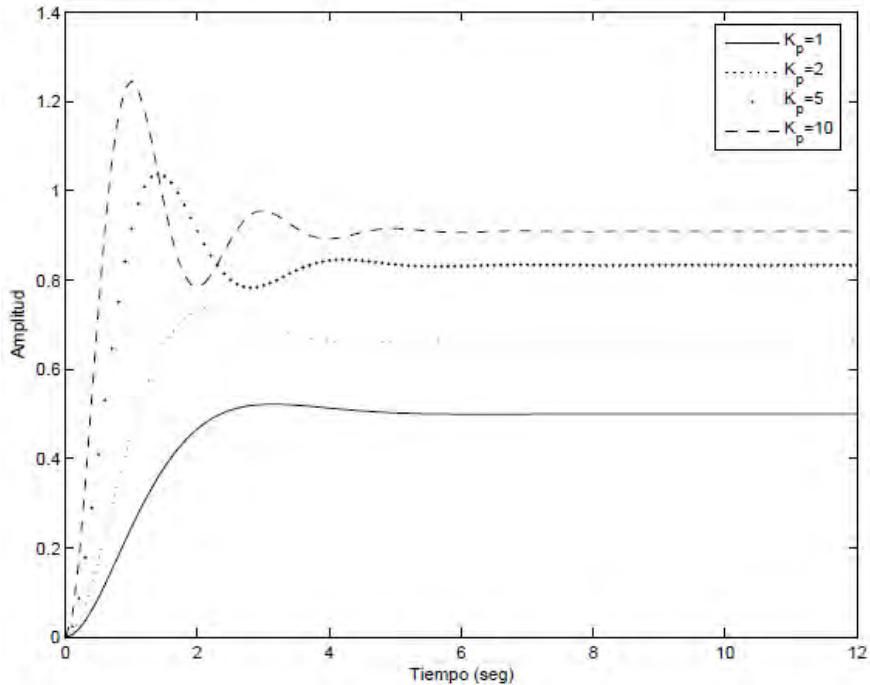
**Figura 2.26. Diagrama de bloques simplificado para el controlador PID**

Para el controlador P, la ley de control está definido por:  $U(s) = K_p E(s)$  y la función de transferencia (FT) en la lazo abierto  $G_{LA}$  y lazo cerrado  $G_{LC}$ , vienen dador por:

$$G_{LA}(s) = \frac{K_p}{s^2 + s + 1}$$

$$G_{LC}(s) = \frac{K_p}{s^2 + s + 1 + K_p}$$

La siguiente figura 2.27., muestra el ploteo de la respuesta del sistema debido a una entrada escalón para valores de ganancia  $K_p$  diferentes.



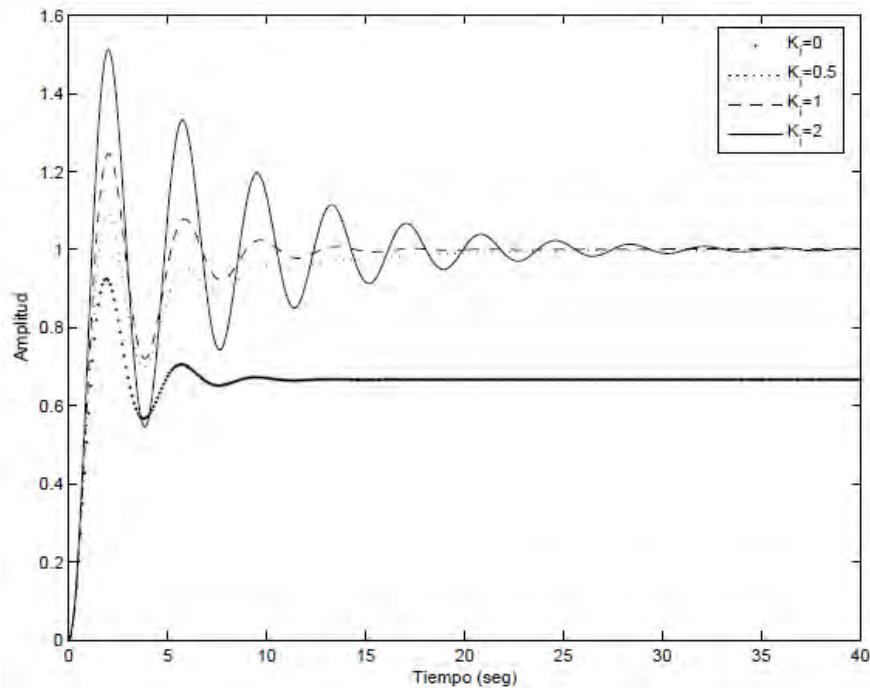
**Figura 2.27. Respuesta de un controlador proporcional a una entrada escalón unitario**

Nota: Se observa que a medida que se incrementa la ganancia, se reduce el error en estado estacionario y la respuesta se hace más subamortiguada. Para el controlador PI, la ley de control viene definido según:  $U(s) = (K_P + K_I/s)E(s)$  y las funciones de transferencia en lazo abierto y cerrado son las siguientes:

$$G_{LA}(s) = \frac{K_P + K_I}{s(s^2 + s + 1)}$$

$$G_{LC}(s) = \frac{K_P s + K_I}{s^3 + s^2 + s + (1 + K_p)s + K_i}$$

En la figura 2.29., se observa un controlador PI usando los valores para la siguiente ganancia integral:  $K_i = 0, 0.5, 1.2$  y una ganancia proporcional de  $K_p = 2$ .



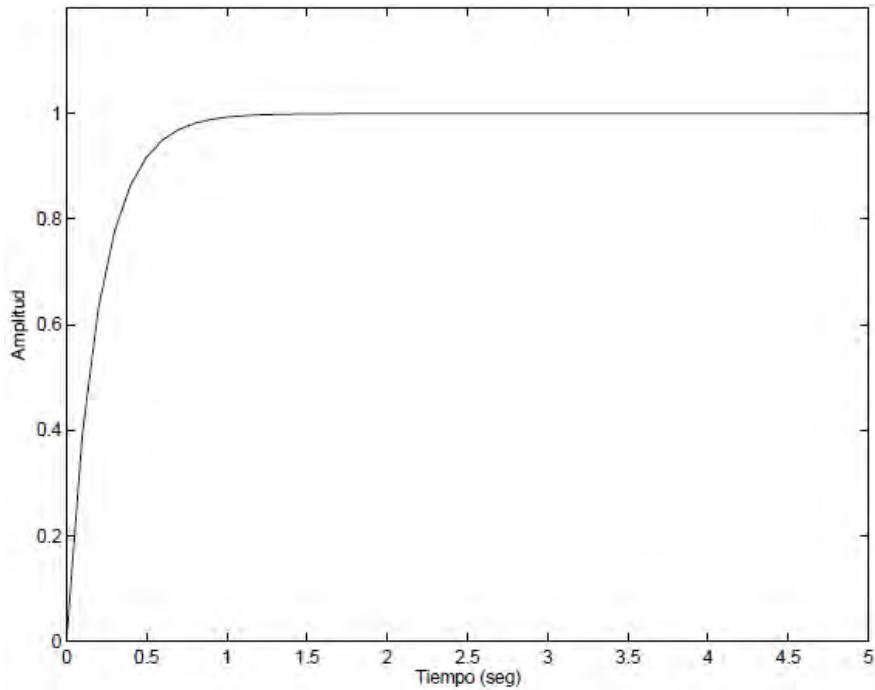
**Figura 2.28. Respuesta de un controlador proporcional-integral a una entrada escalón unitario**

Para el controlador PID, a ley de control viene definido según:  $U(s) = (K_P + K_I/s + K_D s)E(s)$  y las funciones de transferencia en lazo abierto y cerrado son las siguientes:

$$G_{LA}(s) = \frac{K_d s^2 + K_P + K_i}{s(s^2 + s + 1)}$$

$$G_{LC}(s) = \frac{K_d s^2 + K_P s + K_i}{s^3 + (1 + K_D)s^2 + s + (1 + K_p)s + K_i}$$

En la siguiente figura 2.29., se representa la respuesta debido a la entrada escalón con los mejores parámetros que sintonizan al controlador PID, en este caso los valor son  $K_p = K_I = K_D = 5$



**Figura 2.29. Respuesta del controlador PID a una entrada escalón unitario**

## 2.7. Control digital

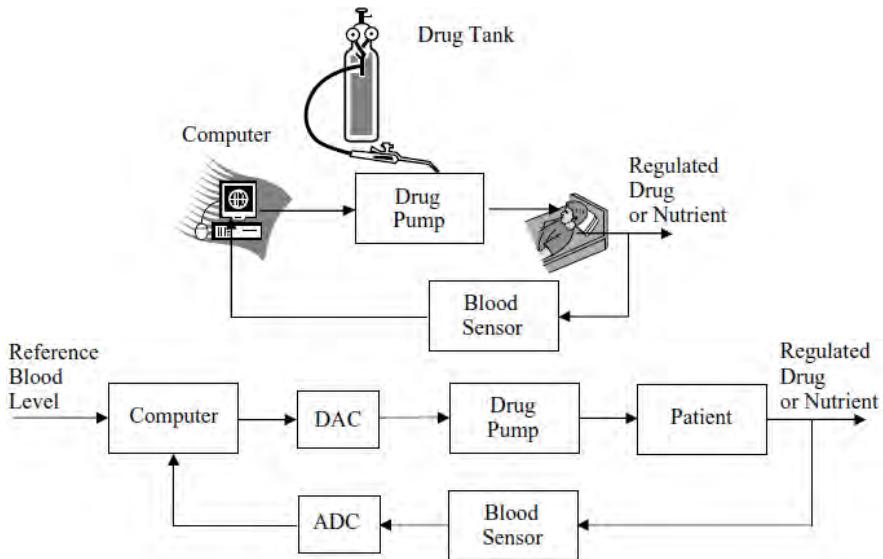
La siguiente sección se trata sobre los aspectos relacionados al control digital que se desarrollan en el libro de Fadali M. (2009). Introduction to Digital Control, Discrete-Time Systems y Modeling of Digital Control Systems. In Elsevier (Ed.), Digital Control Engineering, (pp. 1–81), Burlington, Estados Unidos.

### 2.7.1. Estructura de un sistema de control digital

Con el objetivo de controlar un proceso o un sistema físico usando un control digital, el controlador debe recibir las medidas desde el sistema, procesarlas y luego enviarlas con una señal de control hacia un actuador, lo cual se denomina acción de control. Comúnmente, tanto el actuador y la planta son sistemas analógicos y esto resulta en que el controlador y el sistema controlado no se

comunican de la misma forma, por ende se necesita de una conversión a fin de lograr esta comunicación. La conversión desde el controlador que es digital a un proceso físico el cual es analógico se ejecuta mediante un conversor digital a análogo (DAC). En cambio cuando la conversión se realiza desde un proceso hacia un controlador, entonces se utiliza un conversor análogo a digital (ADC). En este proceso, es necesario el uso de un sensor para monitorear la variable de control para el control de retroalimentación.

Un ejemplo que se puede citar sobre este proceso es el de un sistema en lazo cerrado para el envío de medicamentos, ya que en muchas ocasiones las enfermedades crónicas necesitan la regulación del nivel de sangre de los pacientes de un medicamento específico. Por ejemplo, existe algunas enfermedades que implican la falla en el lazo cerrado natural que existe en el cuerpo humano, al regular los niveles de sangre y nutrientes, cuando la producción de la hormona insulina, que controla los niveles de glucosa presentes en la sangre, se altera. Entonces para diseñar un sistema en lazo cerrado del envío de medicamentos, se utiliza un sensor para medir los niveles y regular la cantidad de medicamentos y nutrientes en la sangre. Luego esta medida se convierte a una forma digital y se alimenta nuevamente al controlador a través de una bomba que inyecta los medicamentos en la sangre del paciente. A continuación se muestra un diagrama de bloques del sistema descrito.



**Figura 2.30. Sistema de un control digital para la dosis de medicamentos**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 3

### 2.7.2. Sistemas en tiempo discretos

El control digital involucra a sistemas cuyos controles se actualizan en instantes de tiempo discretos. Así los modelos en tiempo discreto proporcionan relaciones matemáticas entre las variables de los sistemas en cada instante. Por este motivo, es necesario detallar las propiedades matemáticas para los modelos en tiempo discreto, partiendo desde un ejemplo donde se observa la necesidad de involucrar las operaciones para el manejo de una sistema discretizado. En el caso del control de nivel de un sistema de un tanque simple, se podría definir las siguientes variables.

- $H$ : Altura del tanque en estado estable.
- $h$ : Perturbación de la altura con respecto al valor nominal.
- $Q$ : Flujo en estado estable a través del tanque.
- $q_i$ : Perturbación del flujo de entrada con respecto a su valor nominal.

- $q_0$ : Perturbación del flujo de entrada con respecto a su valor nominal.

El objetivo de este sistema es mantener constante el nivel de fluido, regulando el flujo de agua que ingresa al tanque. Entonces si desea obtener el modelo del tanque para utilizarlo en tiempo discreto de tal modo que el flujo de entrada constante, se puede representar por una función en parte o a trozos y una salida  $h$ , aún cuando se sabe de la presencia de la no linealidad del sistema, el modelo lineal puede describir satisfactoriamente al sistema donde el nivel del líquido se regula cerca de un valor constante. El modelo generalizado para la salida de flujo de la válvula es análogo a un sistema eléctrico de resistencias y está dado por:

$$h = Rq_0$$

Donde  $R$  es la resistencia del fluido que atraviesa la válvula. Se asume que el fluido es incompresible, y se cumplen los el principio de conservación de la masa donde el aumento en la tasa del volumen del fluido es equivalente a la diferencia entre el volumen de entrada del fluido que entra, menos el volumen de fluido que sale:

$$\frac{dC(h + H)}{dt} = (q_i + Q) - (q_0 + Q)$$

Además el término  $H$  resulta ser constante y su derivada por defecto es 0, por otro lado el término  $Q$  se cancela de tal forma que los términos restantes sólo involucran las perturbaciones. Cuando se sustituye el flujo de salida  $q_0$  en la ecuación linealizada para la válvula dentro del balance del volumen de fluido,

resulta el modelo matemático analógico siguiente.

$$\frac{dh}{dt} + \frac{h}{t} = \frac{q_i}{C}$$

donde  $\tau = RC$  es la constante de tiempo del fluido para el tanque y la solución de la ecuación diferencial anterior es:

$$h(t) = e^{t-t_0/\tau} h(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t e^{-(t-\lambda)/\tau} q_i(\lambda) d\lambda$$

Si  $q_i$  es constante en cada periodo de muestreo ( $T$ ), entonces  $q_i(t) = q_i(k) = cte.$  para  $t$  en el intervalo  $< kT, (k+1)T >$ . Entonces se puede resolver la ecuación analógica para cualquier periodo de muestreo y obtener:

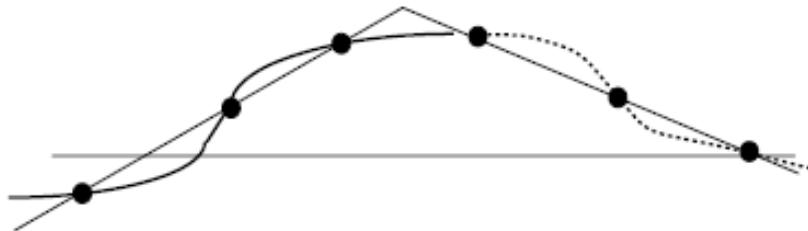
$$h(k+1) = e^{-T/\tau} h(k) + R[1 - e^{-T/\tau}] q_i(k)$$

Donde las variables en el tiempo  $kT$  se denotan por el argumento  $k$ . Entonces éste es el factor en el tiempo discretizado que describe a los sistemas como un control a trozos constante.

### 2.7.3. El teorema de muestreo

El muestreo es necesario para los procesos donde intervienen información analógica que después será convertida por elementos digitales. Así, la capacidad de convertir a información digital requiere que las muestras reflejan la naturaleza de la señal analógica en una secuencia de información. En la figura 2.31., se observa a dos formas de curvas con muestras idénticas, donde se puede deducir que mientras más rápido sea el muestreo mejor será la información digital procesada. Así el teorema de muestreo establece un límite

inferior de la tasa de muestreo necesaria para una señal de banda limitada, también conocida como ancho de banda.



**Figura 2.31. Diferentes formas de onda con muestras idénticas**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 46

Por lo tanto el teorema establece que para una señal de banda limitada, se cumple la siguiente relación

$$f(t) \xleftarrow{\mathcal{F}} F(j\omega), \quad F(j\omega) \neq 0, \quad -\omega_m \leq \omega \leq \omega_m$$

$$F(j\omega) = 0, \text{ en cualquier otro caso}$$

Donde  $F$  denota a la transformada de Fourier, qué puede ser reconstruida desde la forma de la onda a la señal en tiempo discreto.

$$f^* = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t - kT)$$

Sí sólo si la frecuencia angular de muestreo  $\omega_s > 2\pi/T$ , satisface la condición:

$$\omega_s > 2\omega_m$$

El espectro de la onda en tiempo continuo se puede recuperar usando un filtro ideal pasa-bajo de ancho de banda  $\omega_b$  en el rango

$$\omega_m < \omega_b < \omega_s/2$$

Dicha afirmación se puede probar considerando una función de tren de impulso unitario definida por:

$$\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$$

Cuya transformada de Fourier es:

$$\delta_T(\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s)$$

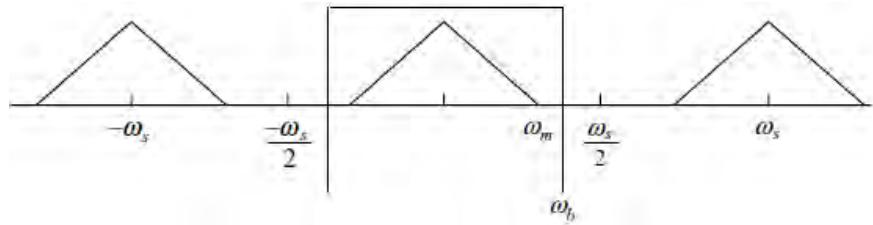
El muestreo de esta función impulso se logra multiplicando las funciones  $f(t)$  y  $\delta_T(t)$ , lo cual resulta por convolución en:

$$\begin{aligned} \Im\{\delta_T(t)xf(t)\} &= \frac{1}{2\pi} \delta_T(j\omega) * F(j\omega) \\ &= \left[ \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \right] * F(j\omega) \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(\omega - n\omega_s) \end{aligned}$$

Donde  $\omega_m$  es el ancho de banda de la señal. Entonces, el espectro de la función mostrada es una función periódica con frecuencia  $\omega_s$ . Si se considera que  $f(t)$  es una función real, entonces se sabe que la magnitud  $|F(j\omega)|$  es una función par en la frecuencia, mientras que la fase  $F(j\omega)$  es una función impar. Para el caso de una función de banda limitada, la altitud y la fase en el rango de frecuencia de 0 a  $\omega_s/2$  se puede recuperar o representar –ver figura 2.32.– con un filtro ideal pasa bajo como se menciona anteriormente.

#### 2.7.4. Selección de la frecuencia de muestreo

Si bien es cierto el ancho de banda finito está asociado con las señales de duración las cuales son infinitas, ya que la duración finita implica que se tenga



**Figura 2.32. Teorema del muestreo**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 47

un ancho de banda infinito. Esto se simplifica mejor cuando se considera una señal dada la cual debe estar limitada en la banda, esta limitación es equivalente a la multiplicación por un pulso en El dominio de la frecuencia. El teorema de la acumulación en la frecuencia establece que la multiplicación en el dominio del tiempo es equivalente a la acumulación de la transformada de Fourier en el dominio de la frecuencia. Así, el espectro de una función de tiempo limitado se convierte en la computación del espectro de la función de duración infinita con una función sinc, la mente es una función de ancho de banda infinito. Considerando que todas las mediciones se realizan en un tiempo finito, los anchos de banda infinitos no se pueden evitar. Sin embargo, una señal dada tiene componentes de ancho de banda llamados efectivos finitos, más allá del cual sus componentes espectrales son despreciables. En suma, lo dicho anteriormente permite tratar a las señales físicas con banda limitada y así elegir una frecuencia de muestreo adecuada para ello según el teorema de muestreo. En la práctica, la frecuencia de muestreo puede ser elegida cuando se considera que es mayor que el límite inferior especificado en el teorema de muestreo, y una regla general es elegir a  $\omega_s$  como:

$$\omega_s = k\omega_m, \quad 5 < k < 10$$

La elección de la constante  $k$  depende de tipo de aplicación que se esté ejecutando, ya que en muchas ocasiones el límite superior de la frecuencia de muestreo se ubica muy por debajo de las capacidades del *hardware* utilizado actualmente. En un circuito de control de lazo cerrado no se puede tener un periodo de muestreo por debajo del tiempo mínimo requerido para la medición de salida y esto es obvio ya que la frecuencia de muestreo está limitada por el retraso del sensor. Otra limitación que existe es el tiempo de cálculo necesario para actualizar el control, pero según pasan los años se va volviendo menos obstructivo con la disponibilidad de microprocesadores más rápidos, aunque debe considerarse en la elección de la frecuencia de muestreo. Por otro lado en el control digital, se suele elegir la frecuencia de muestreo de modo que las muestras proporcionan una buena representación de las variables físicas analógicas. Se proporciona un ejemplo de un sistema lineal donde la salida del sistema tiene un espectro dado por el producto de la respuesta en frecuencia y el espectro de entrada. Ya que la entrada no se conoce con anterioridad, se debe elegir la frecuencia de muestreo considerando la respuesta en frecuencia del sistema de primer orden.

$$H(j\omega) = \frac{K}{j\omega/\omega_b + 1}$$

Donde  $K$  es la ganancia DC y el ancho de banda del sistema. La respuesta en la frecuencia cae por debajo de los niveles DC en un factor de alrededor de 10 a la frecuencia  $7\omega_d$ , entonces la frecuencia de muestreo es:

$$\omega_s = k\omega_b, \quad 35 \leq k \leq 70$$

Y para un sistema de segundo orden la respuesta en la frecuencia es

$$H(j\omega) = \frac{K}{j2\zeta\omega/\omega_n + 1 - (\omega/\omega_n)^2}$$

El ancho de banda del sistema se puede aproximar por una frecuencia natural amortiguada

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Usando la frecuencia de  $7\omega_d$  como la frecuencia máxima significativa se puede elegir la frecuencia de muestreo como.

$$\omega_s = k\omega_d, \quad 35 \leq k \leq 70$$

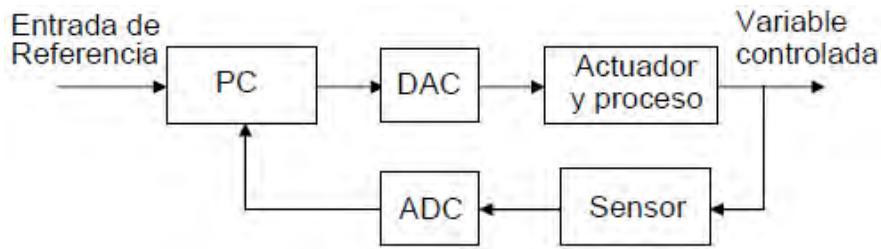
Asimismo, la respuesta del impulso para un sistema de segundo orden y definido por:

$$y(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)$$

Donde  $A$  es la constante de amplitud y  $\phi$  la fase angular. Entonces la elección de la frecuencia de muestreo, en este caso es suficientemente rápido para soluciones de la frecuencia  $\omega_d$  en el primer tiempo pico  $\pi/\omega_d$

### 2.7.5. Modelado de sistemas de control digital

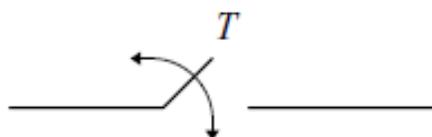
La representación de este modelo se observa en la figura 2.33.



**Figura 2.33. Configuración de un sistema de control digital**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 56

Si se asume que la salida de los ADC es exactamente igual en magnitud a su entrada, con errores cuantizados que se pueden despreciar y que los ADC producen una salida digital instantánea, además de que el proceso de muestreo es uniforme en un rango fijo. Entonces el ADC puede ser modelado como un muestreador ideal, con periodos de muestreo  $T$  como se muestra en la figura 2.34.



**Figura 2.34. Modelo de un muestreador ideal ADC**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 56

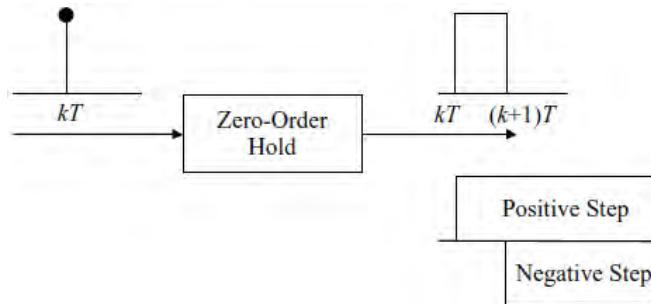
Estas suposiciones sirven aproximadamente para describir ciertos sistemas en la práctica, así los errores de cuantización producto de esta suposiciones, son pequeños pero distintos de cero, lo cual produce variaciones en la frecuencia de muestreo que son insignificantes al final. Los sistemas físicos tienen un tiempo de conversión que es finito, pero el periodo ideal es aceptable en la mayoría de aplicaciones.

### 2.7.5.1. Modelo del DAC

De igual manera si se asume que las salidas del DAC son exactamente iguales en magnitud a sus entradas, produce una salida analógica instantánea y sus salidas son constantes en todo el tiempo de muestreo. Entonces la relación entre la entrada y la salida del DAC está dado por la siguiente ecuación.

$$\{\mu(k)\} \xrightarrow{ZOH} \mu(t) = \mu(k), kT \leq t < (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots$$

Dónde  $\mu(k)$  es la secuencia de entrada. Esta relación describe a un retenedor de orden cero (ZOH), que se muestra en la figura siguiente.



**Figura 2.35. Modelo de DAC como un retenedor de orden cero**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 57

Otras funciones se pueden usar para reconstruir una señal analógica desde una secuencia de números; por ejemplo, un retenedor de primer orden con señales de estructuras analógicas en términos de líneas rectas; así como también, un retenedor de segundo orden construido en términos de parábolas y sucesivamente. Comúnmente, se requiere un intervalo corto pero que sea distinto de cero para generar una salida la cual no es exactamente igual en magnitud a la entrada y puede variar un poco durante un período de muestreo.

Pero el modelo descrito anteriormente es lo suficientemente preciso para la mayoría de aplicaciones. Este tipo de retenedor de orden cero es el más usado en el modelo del DAC y se adopta en casi todos los tipos de control digital.

### 2.7.5.2. Función de transferencia de ZOH

Para obtener la función de transferencia se reemplaza los números o los impulsos discretos, que se muestran en la figura 2.35.; entonces, así se puede obtener la función de transferencia con una transformada de Laplace de la respuesta en impulso, la cual es un pulso de ancho  $T$ . Este pulso puede ser representado como un escalón positivo en el tiempo cero seguido de un escalón negativo en el tiempo  $T$ . Así usando la transformada de Laplace de un escalón unitario y el teorema de retraso para las transformadas se obtiene:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}\{\mathbf{l}(t)\} &= \frac{1}{s} \\ \mathcal{L}\{\mathbf{l}(t - T)\} &= \frac{e^{-sT}}{s}\end{aligned}$$

Done  $l(t)$  es el escalón unitario, y la funciotn de tranferencia del retenedor ZOH es:

$$G_{ZOH}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$$

Ahora se considera la respuesta en la frecuencia del retenedor ZOH:

$$G_{ZOH}(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega}$$

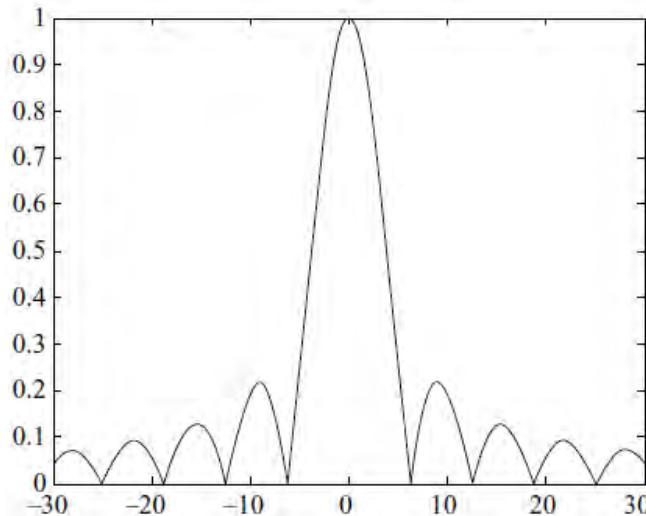
Entonces, reescribiendo la respuesta en la frecuencia, se produce:

$$\begin{aligned} G_{ZOH}(j\omega) &= \frac{e^{-j\omega T/2}}{\omega} \left( \frac{e^{j\omega \frac{T}{2}} - e^{-j\omega \frac{T}{2}}}{J} \right) \\ &= \frac{e^{-j\omega \frac{T}{2}}}{\omega} \left( 2 \sin\left(\omega \frac{T}{2}\right) \right) = T e^{-j\omega \frac{T}{2}} \frac{\sin(\omega \frac{T}{2})}{\omega \frac{T}{2}} \end{aligned}$$

Y el resultado es:

$$|G_{ZOH}(j\omega)| \angle G_{ZOH}(j\omega) = T \left| \text{sinc}\left(\frac{\omega T}{2}\right) \right| \angle -\omega \frac{T}{2}$$

El ángulo de la respuesta en la frecuencia del retenedor ZOH, ingresa linealmente con la frecuencia, mientras que la magnitud es proporcional a la función sinc. En la figura 2.36., se observa que la magnitud es oscilatoria con un valor pico igual al período de muestreo que ocurre en una frecuencia cero.



**Figura 2.36. Magnitud de la respuesta en la frecuencia del retenedor de orden cero con  $T = 1s$**

Fuente: Digital Control Engineering, Analysis and Design, M. Sam Fadali, pág. 59

## 2.8. Sintonización del controlador PID con Algoritmos Genéticos

### 2.8.1. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son un método de búsqueda global estocástica, que usan los principios de Evolución natural de Charles Darwin. Estos algoritmos trabajan con una población de posibles soluciones en un cierto problema. Por tanto, cada individuo dentro de la población representa una solución particular al problema, la cual se expresa generalmente en alguna forma de código genético. Cuando la población evoluciona durante sucesivas generaciones, produce mejores soluciones al problema. Estos tipos de algoritmos empiezan sin ningún conocimiento previo de la solución correcta y dependen enteramente de la respuesta que generan dentro de una población, siguiendo un conjunto de operadores evolutivos conformados por: selección, reproducción, *crossover* y mutación. Así, a cada individuo de la población se le asigna un valor de la aptitud *–fitness–*, que denota que tan buena es la solución para resolver el problema. Este valor implica el éxito que tendrá un individuo en la propagación de sus genes a las posteriores generaciones. Entonces aquellos que generen mejores soluciones, se les asignará valores más altos de aptitud a comparación de otros soluciones de peor rendimiento. Esos individuos generadores de las soluciones más potenciales en la población, se denominan cromosomas. Usualmente un algoritmo genético está constituido por una población aleatoria de hasta de 100 individuos, lo cual se conoce como su conjunto de individuos *–mating pool–*. Para determinar qué también un individuo desempeña una tarea se lo evalúa en una función objetivo. Esta función objetivo es la que asigna a

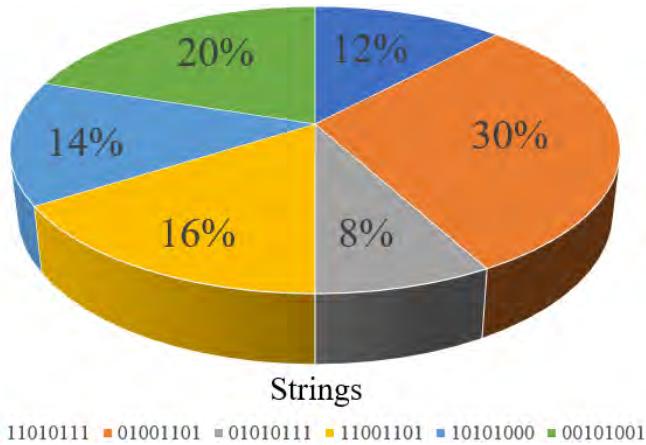
cada individuo el parámetro de aptitud. Por ejemplo, se puede utilizar el error en un proceso de control para asignar un criterio de calidad. A continuación se define algunos términos usados en esta sección.

- Tamaño de la población

Mientras el número de individuos en la población sea más grande, se obtendrá una posible mejor solución y para determinar la cantidad de individuos en la población se puede hacer mediante ensayo y error, empezando por una cantidad de 20 individuos y después incrementando sucesivamente.

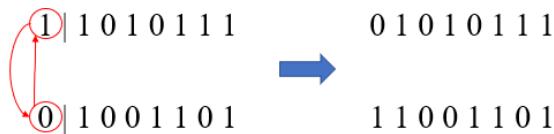
- Reproducción

En esta fase se determina los valores de aptitud de los cromosomas según su mejor desempeño, al igual que los procesos naturales, un cromosoma de mejor jerarquía tiene una mayor probabilidad de ser seleccionado para la reproducción. Por ejemplo, si existen múltiples cadenas de valores –*strings*– similares en comparación de las cadenas diferentes. Entonces de la figura 2.37., el que tiene mayor porcentaje empezará a dominar sobre los demás.



**Figura 2.37. Cadena de valores con predominancia**

- Cruce Despues de que se ha completado el proceso de selección, sigue el entrecruzamiento cromosómico o cruce *-crossover-*, donde la operación en este proceso intercambia algunas partes de dos cadenas seleccionadas, con el propósito de capturar las partes mejores de los cromosomas predecesores y crear nuevos cromosomas. Esto se realiza asumiendo que algunos individuos tienen códigos genéticos en promedio, que produce inviduos más ajustados. La probabilidad de cruce describe con qué frecuencia se realiza el proceso de cruce; así, un 100% indicaría que la nueva descendencia *-offspring-* está conformada enteramente por valores nuevos. El siguiente ejemplo, muestra 2 cadenas de números en binarios padres, que mediante el proceso de *crossover* generan 2 cadenas de binarios hijo. En el cruce, las cadenas intercambian el primeros bit y generan al primer y segundo miembro de la descendencia.



**Figura 2.38. Ejemplo de *crossover* en un punto simple**

- Mutación

Usando la selección y el cruce se producirá una extensa cantidad de *strings* y esto ocasionará dos problemas principalmente. Según la población escogida al inicio es posible que no haya una diversidad con respecto a las cadenas iniciales, con el fin de asegurar un entorno donde el algoritmo genético realice la búsqueda. Además el algoritmo también podría converger en cadenas casi óptimas debido a una mala elección de la población inicial. Es por esta razón, que se agrega el operador de mutación al algoritmo genético. La mutación es un cambio ocasional aleatorio de un valor en la posición de un *string*, comúnmente se considera como una operación de fondo porque la probabilidad de que un elemento mute es baja, caso contrario afectaría el ajuste de los valores y generaría al algoritmo en una búsqueda totalmente aleatoria. Los valores para la probabilidad de la mutación rondan de 0.1% a 0.01%, lo cual representa la probabilidad que una cadena sea elegida para la mutación. Por ejemplo se dispone de la siguiente cadena, donde a través de un proceso de mutación se ha intercambiado el primer valor hasta la posición final y el último valor hasta la primera posición.

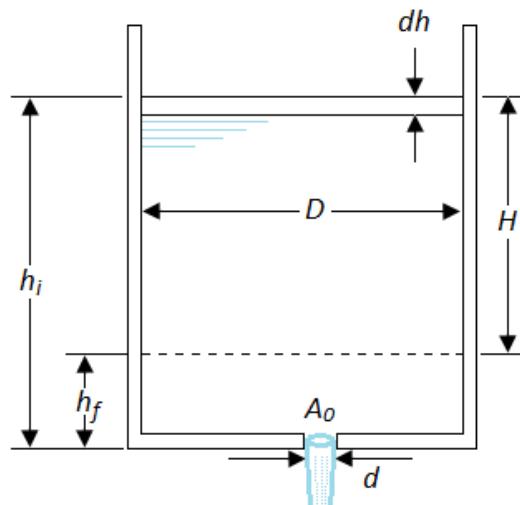


**Figura 2.39. Ejemplo de mutación**

- Elitismo Debido a los procesos anteriores de mutación y cruce, es muy probable que la solución óptima pueda perderse, entonces para evitar esto se utilizan los modelos de elitismo, donde los mejores individuos de una población se guardan antes que se produzcan estas dos últimas operaciones. Entonces cuando se genere una nueva población y se la evalúe. El modelo examinará si la mejor estructura se ha mantenido y si no esta se copia y guarda en la población.
- Función objetivo o función de calidad El objetivo de esta función es proveer de una medida de qué también los individuos se han desempeñado en el problema. Este criterio se expresa como una función calculable de las variables de decisión denominadas funciones objetivo. En las pruebas de la vida real, algunas funciones pueden entrar en conflicto con otras; es así que mientras unas maximizan un valor las otras minimizan un resultado. En los problemas de optimización multiobjetivo es posible observar tres situaciones:
  - Minimizan todas las funciones objetivos
  - Maximizan todas las funciones objetivos
  - Minimizan unas y maximizan otras

## 2.9. Estudio del tiempo de descarga de un fluido en recipientes sin fricción

En los procesos industriales, comúnmente se requiere vaciar tanques o trasvasar su contenido hacia otro depósito, aprovechando la gravedad para descargar desde un nivel superior de líquido hacia otro inferior. Estos procesos se hacen con objetivos diversos tales como limpiar las paredes del tanque u observar los cambios de nivel cuando se llena y/o drena sustancias líquidas.



**Figura 2.40. Drenaje de un tanque cilíndrico lleno de agua, con orificio en el centro de la base**

Debido a que en este sistema –tanque y sustancia líquida– existe una salida de masa a una velocidad variable que depende inherentemente del nivel del líquido que se contiene, entonces se define como un proceso de régimen estacionario. La primera situación que se resolverá es el caso simple de descarga de líquido sin ingreso de masa, esto causará obviamente un cambio del contenido inicial y así

se podría plantear el siguiente balance de masas y energía:

$$\begin{aligned} M_{in} - M_{out} &= -\frac{\partial M}{\partial t} \\ M_{in} = 0 \Rightarrow M_{out} &= -\frac{\partial M}{\partial t} \\ E_{in} - E_{out} &= \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

Ahora se planteará las ecuaciones de descarga para determinar el nivel del líquido en función del tiempo, primero se calcula éste último parámetro, asumiendo que el contenido en los tanques es líquido, específicamente agua y sin considerar pérdidas.

Según la ecuación de Bernoulli:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \\ H &= h_1 - h_2 \\ v_2 &= \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2gH} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Si se considera las pérdidas para la velocidad real de descarga en el agujero del tanque ubicado en el centro inferior de la base.

$$v = c_v \sqrt{2gH} \tag{2.5}$$

Donde  $c_v$  es el coeficiente de velocidad. El área de la vena contracta es:  $A_c = c_c \cdot A_0$ , donde  $A_0$  es el área del orificio por donde sale el líquido y  $c_c$  es el coeficiente de contracción. Por otro lado se define el caudal descargado como

el factor Volumen ( $V$ ) entre tiempo ( $t$ ) ó el producto Área ( $A$ ) por velocidad ( $v$ ):

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V}{t} = A_c \cdot v \\ &= A_c \cdot c_v \sqrt{2gH} = c_c \cdot A_0 \cdot c_v \sqrt{2gH} \\ Q &= c_d \cdot A_0 \sqrt{2gH} \end{aligned}$$

Al multiplicar  $c_v \cdot c_c$  se obtiene  $c_v$  que se denomina coeficiente de velocidad y representa el factor de pérdidas como se observa en la ecuación (2.5). Si se aplica la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad para un orificio, se obtiene que la derivada del volumen con respecto al tiempo representa el caudal, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = c_d \cdot A_0 \cdot c_v \sqrt{2gH} \quad (2.6)$$

$$\partial V = c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH} \partial t \quad (2.7)$$

En la ecuación (2.7), primero se debe expresar el volumen en función del área transversal del recipiente y la altura, seguidamente se reemplaza el área según sus dimensiones; sin embargo como se verá en la resolución de este mismo problema para tanques con diferentes formas geométricas, el área transversal está en función de la altura ya que es un parámetro dependiente de la variación del nivel de líquido; entonces cuando se expresa el volumen en función del área, este último parámetro también deberá expresarse en función de la altura con el fin de ejecutar correctamente la derivada en función de la altura a toda la expresión resultante. Así el volumen que se descarga para un tanque cilíndrico viene dado como el área transversal multiplicado por el diferencial de  $H$ , lo cual

se igualará al caudal, como se muestra a continuación:

$$-A\partial H = c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t \quad (2.8)$$

En este caso, con el tanque cilíndrico, el área transversal ( $A = \pi D^2/4$ ) se mantiene constante y no varía con la altura ya que solo está en función de su diámetro. Ahora se acomoda la expresión, a un lado de la variable tiempo y al otro, los parámetros dependientes de la altura para poder realizar la operación de integración desde los tiempos de 0 a  $t$  y en los niveles de  $h_i$  y  $h_f$ .

$$\begin{aligned} \partial t &= \frac{A}{A_0} \cdot \frac{\partial H}{c_d \cdot \sqrt{2gH}} \\ \int_0^t dt &= \int_{h_i}^{h_f} \frac{A}{A_0} \cdot \frac{\partial H}{c_d \cdot \sqrt{2gH}} dH \\ t &= \frac{\pi \cdot D^2 (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{\sqrt{8} \cdot A_0 \cdot c_d \cdot \sqrt{g}} \end{aligned}$$

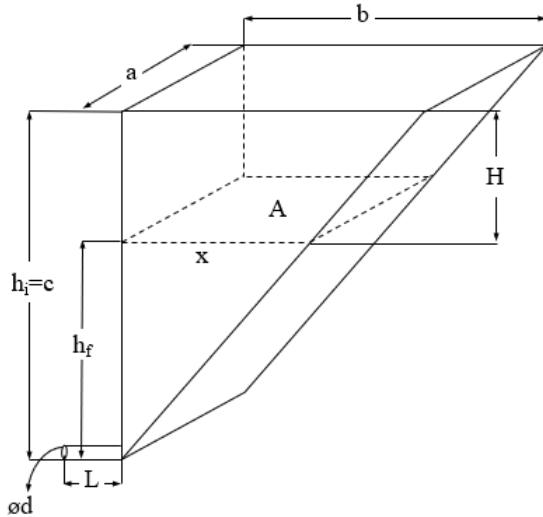
Reemplazando el área del orificio  $A_0$  y se obtiene el tiempo de descarga:

$$t = \frac{\sqrt{2}D^2(\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{d^2 \cdot c_d \cdot \sqrt{g}} \quad (2.9)$$

### 2.9.1. En un prisma triangular recto

En este caso se observa que el área transversal que viene a ser un rectángulo va decreciendo según disminuye la altura y esto debido a que la altura del prisma influye indirectamente en las aristas laterales del sólido. Según se observa en la figura 2.41., el ángulo que se forma determina la relación geométrica de las aristas y por consecuencia de los lados de la sección transversal. Se debe tener en cuenta que, para realizar el cálculo no se considera la tubería, solo un agujero de

diámetro  $d$ , en la parte inferior del tanque triangular. En la siguiente sección, si se considerará la tubería y el efecto de la rugosidad de este tubo sobre el tiempo de descarga.



**Figura 2.41. Tanque prismático de base triangular para el drenaje de agua**

De la ecuación (2.7), se reemplaza el valor del área transversal  $A$  por  $a \cdot b$ . Se observa solo la arista  $a$  es constante y la arista  $b$  varía con la altura lo cual hace variar consecuentemente el área. Entonces con la siguiente relación trigonométrica de la tangente del ángulo, se determina un lado  $x$ , en el plano transversal que forma un sólido de una altura diferencial  $h$ .

$$\begin{aligned}
 A &= a \cdot x \\
 \frac{b}{c} &= \frac{x}{h_f} \\
 x &= \frac{b \cdot h_f}{c} \\
 A &= \frac{a \cdot b \cdot h_f}{c} \\
 \rightarrow A(H) &= \frac{a \cdot b \cdot (h_i - H)}{c}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Habiendo expresado el área transversal en función de la altura, se reemplaza en el diferencial de volumen ( $\partial V$ ) con  $A\partial H$  en la ecuación (2.7). Después se agrega un signo negativo a este diferencial de volumen por ser de descarga.

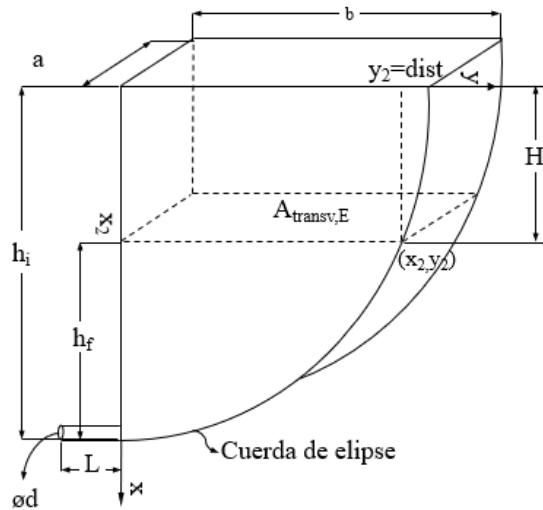
$$\begin{aligned}
 -A(H)\partial H &= c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t \\
 \frac{a \cdot b \cdot (H - h_i)}{c} \partial H &= c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t \\
 \frac{a \cdot b \cdot (H - h_i)}{c \cdot \sqrt{2gH}} \partial H &= c_d \cdot A_0 \cdot \partial t \\
 \int_{h_i}^{h_f} \frac{a \cdot b \cdot (H - h_i)}{c \cdot \sqrt{2gH}} dH &= \int_0^t c_d \cdot A_0 dt \\
 t = \frac{a \cdot b \cdot (\sqrt{g \cdot h_f} \cdot (h_f - 3 \cdot h_i) + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_i} \cdot h_i) \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot c \cdot g \cdot A_0 \cdot c_d} & \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

Por ultimo se reemplaza el área del orificio  $A_0 = \pi D^2/4$

$$t = \frac{4 \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{g \cdot h_f} \cdot (h_f - 3 \cdot h_i) + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_i} \cdot h_i) \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot c \cdot d^2 \cdot g \cdot c_d \cdot \pi} \quad (2.12)$$

### 2.9.2. En un prisma de base elíptica

En esta forma geométrica se observa que la arista  $a$  es constante y la arista  $b$  variara según disminuye la altura. En este caso se utiliza la ecuación de la elipse con el sistema de coordenadas fijado en el punto  $O$  orientado hacia abajo en x. La ecuación de la elipse queda definida de la siguiente forma con los parámetros establecido a continuación en la figura 2.42.



**Figura 2.42. Tanque prismático de base elíptica para el drenaje de agua**

$$\frac{x^2}{h_i^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Se despeja el valor de la ordenada con valor de *dist* y se reemplaza el valor de la abscisa con *H*.

$$\begin{aligned} \frac{H^2}{h_i^2} + \frac{dist}{b^2} &= 1 \\ dist &= b \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{h_i^2}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Debido a que es área transversal queda definido por  $A = a \cdot dist$ , entonces se reemplaza en la ecuación (2.13):

$$A(H) = a \cdot b \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{h_i^2}} \quad (2.14)$$

Ahora se reemplaza el área transversal multiplicado por el diferencial de  $h$  en la ecuación (2.7)

$$\begin{aligned}
 -A(H)\partial H &= c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t \\
 -a \cdot b \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{h_i^2}}\partial H &= c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t \\
 -a \cdot b \cdot \frac{1}{\sqrt{2gH}} \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{h_i^2}}\partial H &= c_d \cdot A_0 \partial t \\
 \int_{h_i}^{h_f} -a \cdot b \cdot \frac{1}{\sqrt{2gH}} \cdot \sqrt{1 - \frac{H^2}{h_i^2}} dH &= \int_0^t c_d \cdot A_0 dt
 \end{aligned}$$

Por ultimo se reemplaza el área del orificio  $A_0 = \pi d_p^2/4$ :

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{\beta_1}{\alpha_1 \cdot H_e} \left( 2h_i - 2h_x - \frac{h_i^2}{2H_e} + \frac{h_x^2}{2H_e} \right) \\
 t &= \frac{a_e \cdot b_e}{c_{d,1} \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot H_e} \left( 2h_i - 2h_x - \frac{h_i^2}{2H_e} + \frac{h_x^2}{2H_e} \right) \\
 t &= \frac{4a_e b_e}{\pi d_p^2 c_{d,1} H_e \sqrt{2g}} \left( 2h_i - 2h_x - \frac{h_i^2}{2H_e} + \frac{h_x^2}{2H_e} \right) \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

### 2.9.3. En un paralelepípedo

En este caso el área transversal no cambia y se mantiene constante ante la variación de la altura del tanque, entonces el área viene dado por el producto de los lados que lo conforman; seguidamente se reemplaza en el diferencial de

volumen de la ecuación (2.7).

$$A = a \cdot b$$

$$-A(H)\partial H = c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}\partial t$$

$$-a \cdot b \partial H = c_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{2gH}$$

$$\int_{h_i}^{h_f} \frac{-a \cdot b}{\sqrt{2gH}} dH = \int_0^t c_d \cdot A_0 dt$$

$$t = \frac{\sqrt{2} \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{\sqrt{g} \cdot A_0 \cdot c_d} \quad (2.16)$$

Y finalmente se reemplaza el área del orificio  $A_0 = \pi D^2/4$

$$t = \frac{4\sqrt{2} \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{\pi \sqrt{g} \cdot c_d \cdot d^2} \quad (2.17)$$

## 2.10. Estudio del tiempo de descarga de un fluido en recipientes con fricción

Ahora se considera el caso en que existe una tubería de una cierta longitud en el fondo del recipiente y por donde drena el agua, lo cual será solución del problema real que se enfrenta en este proyecto. El primer paso consiste en hallar el tiempo de descarga en un tanque cilíndrico. Considerando las pérdidas por fricción, basta con modificar la ecuación (2.5) e incluir el parámetro de perdidas que se define como:  $h_l$ .

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_l \quad (2.18)$$

$$h_l = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Si se reemplaza el parámetro de fricción  $h_l$  de la ecuación (2.18) , se obtiene:

$$\begin{aligned} H &= \frac{v^2}{2g} + f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \\ v &= \sqrt{2g\left(\frac{H}{1 + f \cdot \frac{L}{d}}\right)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Después se reemplaza la altura por la diferencia de la altura inicial y la altura final que viene dado por  $V = \pi h_f D^2 / 4$

$$H = H_0 - \frac{4V}{\pi \cdot D^2} \quad (2.20)$$

Insertando la ecuación (2.20) en la ecuación (2.19), resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{1 + f \cdot L/d} \cdot \left(H_0 - \frac{4V}{\pi \cdot D^2}\right)} \quad (2.21)$$

Análogamente al caudal descargado anteriormente, se obtiene

$$\frac{\partial V}{\partial t} = A_0 \cdot v \quad (2.22)$$

Se despeja la velocidad y se reemplaza el área del orificio del tubo o cañería

$$v = \frac{4dV}{\pi d^2 dt} \quad (2.23)$$

Por ultimo se iguala las ecuaciones de velocidad y se integra de 0 a  $t$  y de  $V_i$  a  $V_f$ , que también puede ser reemplazado con su respectiva altura.

$$\begin{aligned} \frac{4dV}{\pi d^2 dt} &= \sqrt{\frac{2g}{1 + f \cdot L/d} \cdot \left(H_0 - \frac{4V}{\pi \cdot D^2}\right)} \\ dt &= \frac{4}{\pi d^2} \cdot \left[\frac{2g}{1 + f \cdot L/d} \cdot \left(H_0 - \frac{4V}{\pi D^2}\right)\right]^{-1/2} dV \\ \int_0^t dt &= \int_{V_i}^{V_f} \frac{4}{\pi d^2} \cdot \left[\frac{2g}{1 + f \cdot L/d} \cdot \left(H_0 - \frac{4V}{\pi D^2}\right)\right]^{-1/2} dV \\ t &= \frac{D^2}{d^2} \cdot \sqrt{\frac{2}{g} \cdot (1 + f \cdot L/d)} \cdot \left(\sqrt{H_0} - \sqrt{H_0 - \frac{4V_f}{\pi D^2}}\right) \end{aligned}$$

Si se reemplaza el volumen final  $V_f$  obtenemos finalmente:

$$t = \frac{D^2}{d^2} \cdot \sqrt{\frac{2}{g} \cdot (1 + f \cdot L/d)} \cdot \left(\sqrt{H_0} - \sqrt{h_f}\right) \quad (2.24)$$

### 2.10.1. En un prisma triangular recto

Al comparar la ecuación (2.24), en cuyo sistema se practica un orificio en el centro de la base del tanque y compararla con la ecuación (2.9), donde además de le instala una tubería de longitud  $L$  y diámetro  $d$  como se observa en la figura 2.41.. Entonces se verifica que la expresión del tiempo de descarga solo esta afectada por un factor que viene dado por  $\sqrt{1 + f \cdot L/d}$ , donde interviene la fricción de la tubería. Por tal motivo, los resultados anteriores serán los mismos para los casos siguientes, con la diferencia que además serán multiplicados por este último factor, ya que se considera la misma tubería en todos los tanques. De la ecuación (2.12), multiplicamos a este resultado por el factor mencionado.

$$t = \sqrt{1 + f \cdot L/d} \cdot \left[ \frac{4 \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{g \cdot h_f} \cdot (h_f - 3 \cdot h_i) + 2 \cdot \sqrt{g \cdot h_i} \cdot h_i) \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot c \cdot d^2 \cdot g \cdot c_d \cdot \pi} \right]$$

### 2.10.2. En un prisma de base elíptica

Igualmente la ecuación (??), queda multiplicada por la fricción, que resulta:

$$t = \sqrt{1 + f \cdot L/d} \cdot \left[ \frac{4\sqrt{2} \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{\pi \sqrt{g} \cdot c_d \cdot d^2} \right]$$

### 2.10.3. En un paralelepípedo

Se repite el mismo procedimiento descrito para el tanque cuarto de elipse y se multiplica a la ecuación (2.17), por el factor de fricción.

$$t = \sqrt{1 + f \cdot L/d} \cdot \left[ \frac{4\sqrt{2} \cdot a \cdot b \cdot (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_f})}{\pi \sqrt{g} \cdot c_d \cdot d^2} \right]$$

## CAPÍTULO III

### CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. DISEÑO MECÁNICO

El diagrama de la figura 3.1. representa la estructura de pasos que se desarrolló para realizar el diseño mecánico.

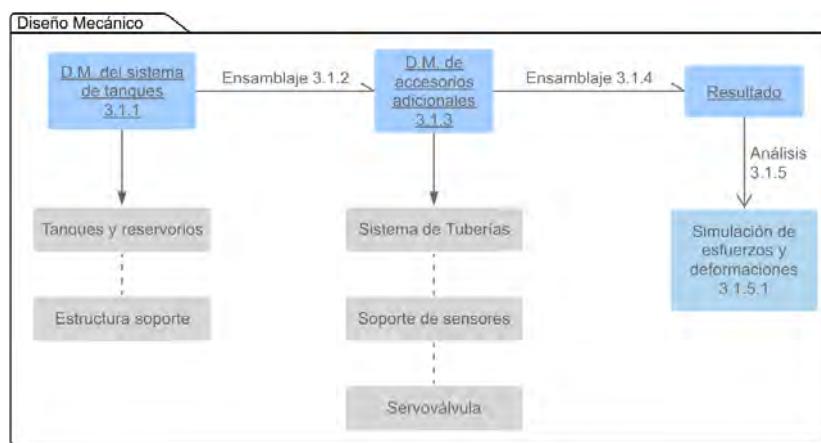


Figura 3.1. Secuencia del Diseño Mecánico

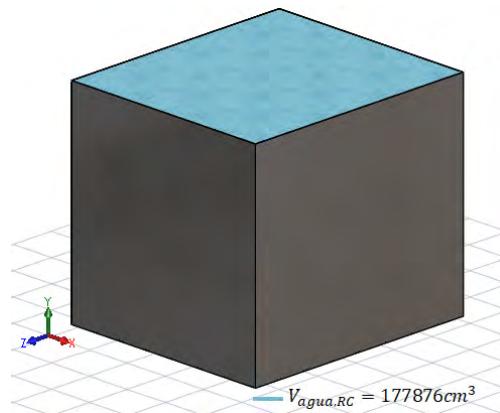
##### 3.1.1. Diseño Mecánico del sistema de tanques

Para este proyecto, se utilizaron tanques y reservorios cuya geometría ya estuvo predefinida de tal forma que fueron ordenados en un sistema en cascada. La forma peculiar de cada tanque, sirve para analizar e investigar la influencia geométrica en las propiedades del diseño del control. En esta sección se detallará el diseño mecánico que se efectuó previamente a la implementación,

lo cual permitió elaborar un conjunto de hipótesis y recomendaciones que resultó muy útil cuando se llevó a cabo el proyecto. Al empezar este proyecto no existía aún ningún accesorio, pero los tanques de nivel ya se estaban fabricando, por tal motivo se hizo el respectivo levantamiento de la información de estos accesorios. Despues que ya fueron fabricados los tanques y la estructura y al tener a la mano el modelo en CAD, se hicieron las correspondientes modificaciones y el proyecto siguió según el diseño mecánico elaborado en esta apartado.

### **3.1.1.1. Reservorio Rectangular**

Este reservorio es de forma de un paralelepípedo pero se denomina en términos prácticos como reservorio rectangular, considerando la forma geométrica de la cara frontal. Está fabricado de latón con planchas de espesor de 0.9mm. Sus dimensiones son 61x54x54cm y el volumen de agua dentro, se obtuvo mediante el programa Solidworks, ver figura 3.2.



**Figura 3.2. Diseño del reservorio rectangular**

El cálculo del volumen interno de este reservorio se determinó con el fin de saber qué capacidad de agua como máximo se puede contener en este recipiente. Es

por esta razón que se resta el espesor del tanque a cada lado en el área transversal y en la altura como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$V_{res} = A_{t\text{paral}} \cdot \text{altura}_1$$

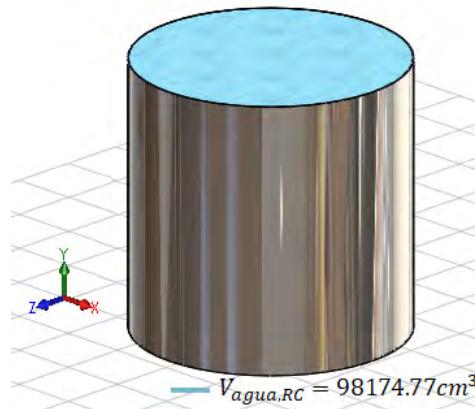
$$V_{res} = (L_1 - 2e) \cdot (L_2 - 2e) \cdot (\text{altura} - e) \quad (3.1)$$

$$V_{res} = (61 - 2 \cdot 0.09) \cdot (54 - 2 \cdot 0.09) \cdot (54 - 0.09)$$

$$V_{res} = 176,46592.0 \text{ cm}^3 = 176.465 L$$

### 3.1.1.2. Reservorio cilíndrico

Este segundo reservorio esta fabricado de latón con planchas de espesor de 0.9mm. Sus dimensiones son 50cm de altura con 50cm de dinamitero, y el volumen de agua dentro, se obtuvo mediante el programa Solidworks, lo cual se muestra en la figura 3.3. siguiente.



**Figura 3.3. Diseño del reservorio cilíndrico**

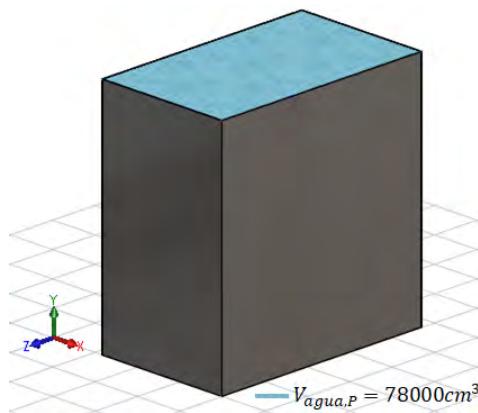
De igual manera, se restó al diámetro, el espesor. Debido a que se calcula en base a la circunferencia, la resta es por dos veces el espesor ya que así se obtiene el

diámetro interno; de igual manera, a la altura también se le restó el espesor.

$$\begin{aligned}
 V_{res,cil} &= A_{tcil} \cdot gen1 \\
 V_{res,cil} &= \frac{\pi D_{int}^2}{4} \cdot (gen - e) \\
 V_{res,cil} &= \frac{\pi (D_{ex} - 2e)^2}{4} \cdot (gen - e) \\
 V_{res,cil} &= \frac{\pi (50 - 2 \cdot 0.09)^2}{4} \cdot (50 - 0.09) \\
 V_{res,cil} &= 97293.7398 \text{ cm}^3 = 97.293 \text{ L}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

### 3.1.1.3. Tanque Rectangular

Este tanque tiene forma de un paralelepípedo rectangular, pero en adelante será denominado tanque rectangular por la forma geométrica de su cara frontal. El material y espesor para estos tanques son de las mismas características que se usaron para la fabricación de los reservorios; es decir, latón de espesor de 0.9mm. Sus dimensiones son de 30x50x52cm y el volumen interno de agua capaz de contener se muestra en la figura 3.4., que fue calculado en el *software*.



**Figura 3.4. Diseño del tanque rectangular**

De forma análoga como se calculó el volumen del reservorio en la ecuación (3.1), considerando el espesor del material se obtiene como volumen interno a través

del siguiente cálculo.

$$V_{tank,paral} = A_{trans,paral} \cdot altura_{paral,int}$$

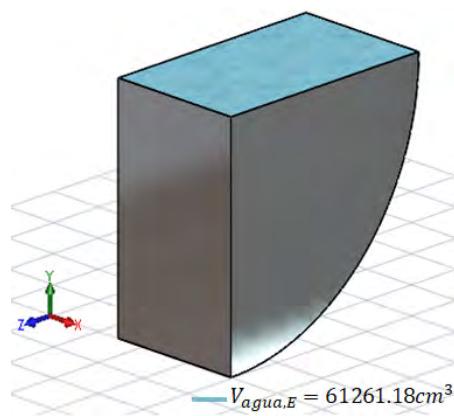
$$V_{tank,paral} = (L_1 - 2e) \cdot (L_2 - 2e) \cdot (altura_{parale} - e)$$

$$V_{tank,paral} = (50 - 0.18) \cdot (30 - 0.18) \cdot (52 - 0.09)$$

$$V_{tank,paral} = 77119,1778 \text{ cm}^3 = 77.119 \text{ L} \quad (3.3)$$

### 3.1.1.4. Tanque Elíptico

c de un cuarto de elipse, pero será denominado para fines prácticos como tanque elíptico. Está fabricado de planchas de latón de 0.9mm de espesor y sus dimensiones son de 30x50x52cm. En la figura 3.5., se ha adjuntado el volumen interno de agua calculo en el programa.



**Figura 3.5. Diseño del tanque elíptico**

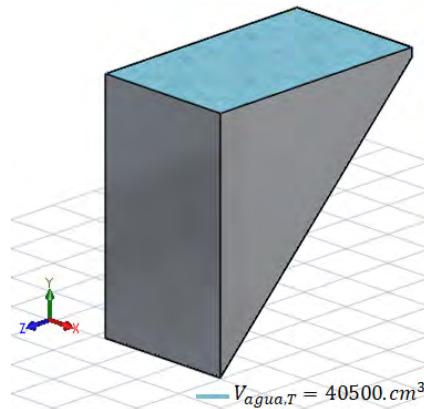
En este caso particular se considera el área transversal que está determinado en la cara lateral del tanque, este área es la base de un cuarto de elipse y al cual

también se le restará al eje mayor y menor, el espesor del material.

$$\begin{aligned}
 V_{tank,elip} &= A_{tank,elip} \cdot altura_{alt,int} \\
 V_{tank,elip} &= \frac{\pi \cdot a_{int} b_{int}}{4} \cdot altura_{alt,int} \\
 V_{tank,elip} &= \frac{\pi \cdot (a - 2e) \cdot (b - e)}{4} \cdot (altura_{elip} - 2e) \\
 V_{tank,elip} &= \frac{\pi \cdot (50 - 0.18) \cdot (52 - 0.09)}{4} \cdot (30 - 0.18) \\
 V_{tank,elip} &= 60569.2606 \text{ cm}^2 = 60.569 \text{ L}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

### 3.1.1.5. Tanque Triangular

En el caso de este tanque, su forma es de un prisma con base triangular y será denominado simplemente como tanque triangular. Está fabricado de latón de espesor de 0.9mm y sus dimensiones son de 30x50x52cm; además, en la figura 3.6., se ha adjuntado el volumen interno de agua calculo en el programa.



**Figura 3.6. Diseño del tanque triangular**

En el cálculo del volumen interno de este tanque, se consideró la sección transversal como la cara lateral y se calculó el volumen como un prisma convencional, con las medidas de las longitudes que conforman el área restada con el espesor y multiplicado por la altura del prisma. Además se observa que

la parte superior del tanque, es un pequeño paralelepípedo recto, este hecho sugiere sumar dos volúmenes parciales. Se entiende que el volumen nunca será llenado completamente ya que el nivel del agua tendrá un límite que estará unos centímetros más abajo del tope, por lo que se podría obviar el calculo del volumen adicional que proporciona el paralelepípedo pequeño. De todas maneras para hacer estricto el calculo del volumen interno total, se consideran ambos volúmenes parciales.

$$V_{total,prisma} = V_{parl1} + V_{medprisma,int}$$

$$V_{total,prisma} = A_{cara,up} \cdot l_{parl1} +$$

$$A_{cara,later} \cdot h_{prisma.int}$$

$$V_{total,prisma} = (l_1 - 2e) \cdot (l_2 - 2e) \cdot (l_3 - 0.0327) +$$

$$\frac{1}{2} \cdot (52 - e_1) \cdot (50 - e) \cdot (30 - 2 * e)$$

$$V_{total,prisma} = (50 - 0.18) \cdot (30 - 0.18) \cdot (2 - 0.03727) +$$

$$\frac{1}{2} \cdot (52 - 0.2173) \cdot (50 - 0.09) \cdot (30 - 0.18)$$

$$V = 41450.41093 \text{ cm}^2 = 41.45 \text{ L}$$

### 3.1.1.6. Estructura soporte

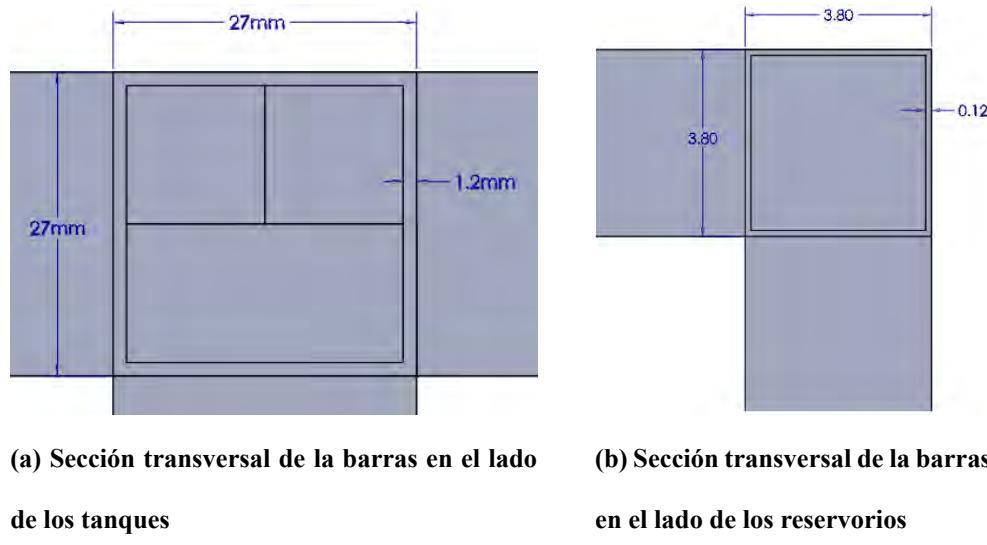
Para el soporte de los tanques y reservorios, se ha diseñado una estructura acorde con las dimensiones de cada tanque como se muestra en la figura 3.7.. El material con que se ha fabricado esta estructura es de planchas de acero inoxidable. Esta estructura está conformada por tubos de aluminio con secciones transversales cuadradas de  $7.29\text{cm}^2$  y  $14.44\text{cm}^2$ . La disposición en qué van colocados los tanques es: el reservorio paralelepípedo en la parte de la base o primer nivel y

el reservorio cilíndrico en la parte más alta de la estructura que vendría a ser el quinto nivel; a continuación desde el segundo nivel hasta el cuarto nivel se colocan los tanques primero el tanque elíptico, seguido del triangular y por ultimo el paralelepípedo..



**Figura 3.7. Diseño de la estructura soporte**

En la figura 3.8.a, se muestra las secciones transversales de las barras que conforman el soporte estructural.



**Figura 3.8. Vista inferior de las secciones transversales de las barras del soporte de los tanques de nivel y reservorios**

### 3.1.2. Diseño del ensamblaje del sistema de tanques

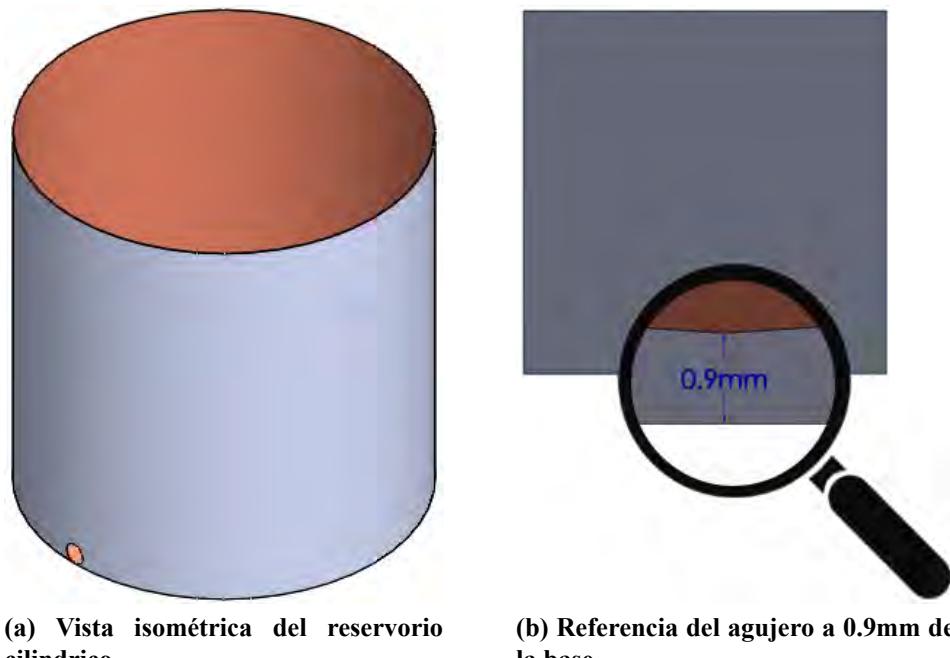
En esta sección se diseña el ensamblaje para la disposición de cada componente en la estructura, con tal de servir de guía para el respectivo ensamblaje real posterior.

#### 3.1.2.1. Ensamblaje de los tanques y reservorios en la estructura

Para el ensamblaje de la estructura se siguen ciertos procedimientos a fin de mantener el orden del ensamblado, lo cual se detallará a continuación.

##### 3.1.2.1.1. Acople de niples en los tanques y reservorios

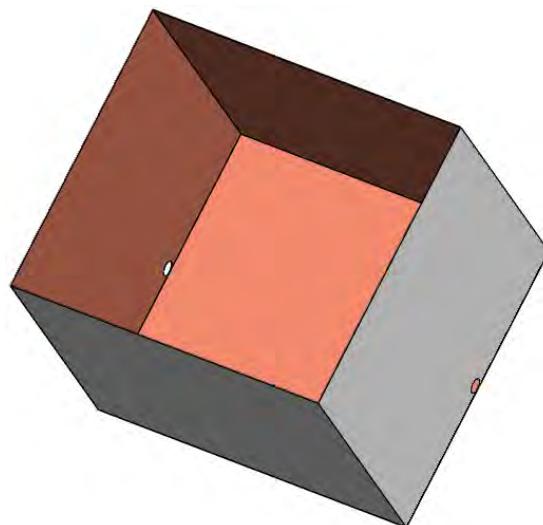
Antes de colocar los tanques, se taladraron en su base para hacer un hueco como se muestra en la siguiente figura 3.9.b Debido que se usaron tubos de 1/2" de diámetro, fue necesario empezar por brocas de menor a mayor tamaño cuando se ejecutó dicha operación.



(a) Vista isométrica del reservorio cilíndrico      (b) Referencia del agujero a 0.9mm de la base

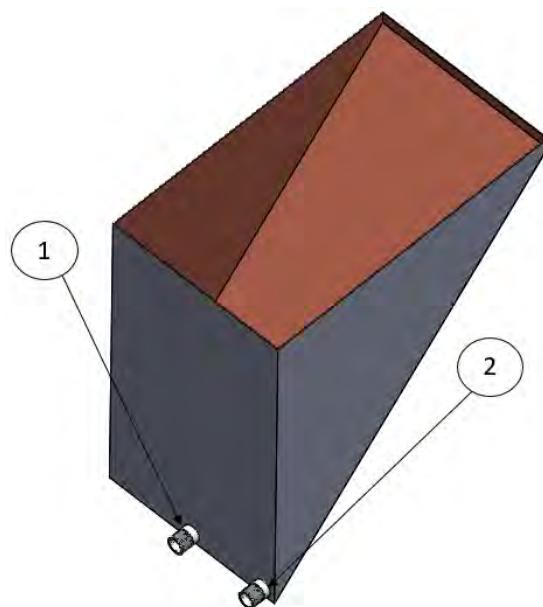
**Figura 3.9. Agujeros de 1/2” para tanques y reservorios**

Para el reservorio rectangular se perforaron dos agujeros, como se observa en la figura 3.10., ya que este requiere de 2 tuberías de agua, una para la salida o drenaje, y la otra para la conexión hacia una bomba de agua.



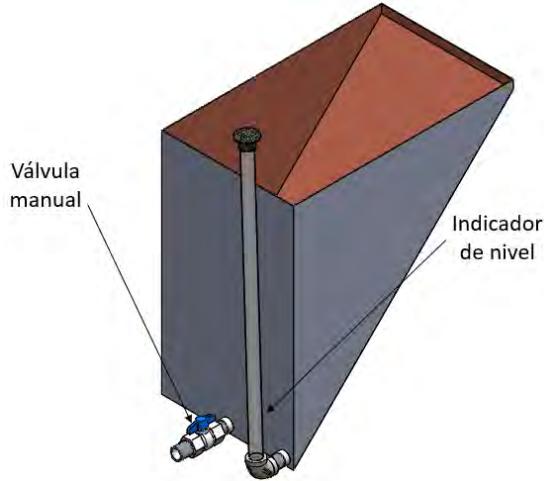
**Figura 3.10. Agujeros para las tuberías de suministro y drenaje en el reservorio rectangular**

El ensamble se realizó con el fin de poder visualizar cómo fue la disposición que tuvo cada pieza soldada en la estructura y si fue necesario se pudo realizar algunos cambios en el diseño antes de su ensamblaje físico. Habiendo perforado todos los tanque y reservorios con agujeros de 1/4" de diámetro, se procedió a instalar los tubos roscados o niples –figura 3.11.–, que posteriormente serían acoplados a válvulas manuales de seguridad.



**Figura 3.11. Tanque triangular con niple para drenaje y para acople del indicador**

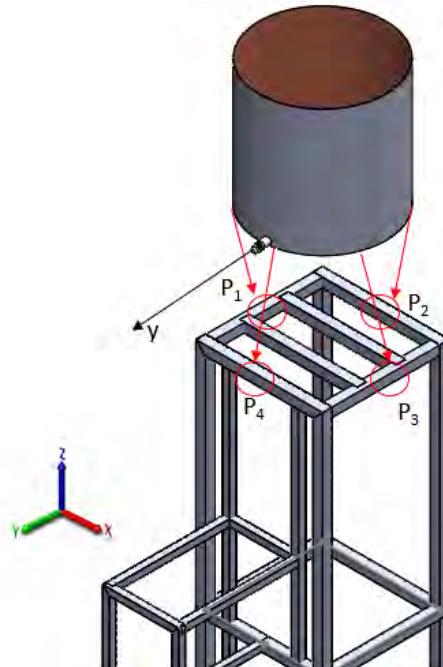
Principalmente en este proyecto se busca controlar el nivel de agua, por ende se debe contar con un indicador visual que ayude al usuario a observar el nivel de líquido presente en cada tanque para constatar que el control se está efectuando, por eso se instala un indicador en la parte baja de cada tanque, que va acoplado al niple cerca a la esquina derecha del tanque.



**Figura 3.12. Tanque triangular con indicador de nivel y válvula manual ensamblados**

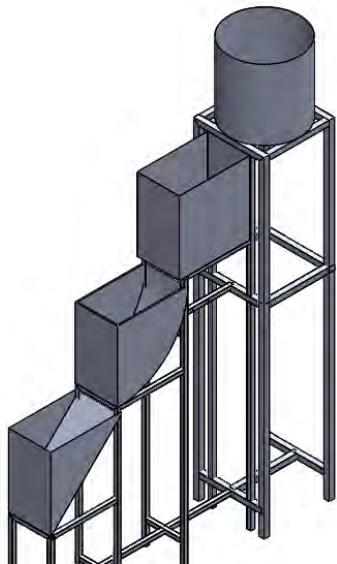
### 3.1.2.1.2. Acople de los tanques y reservorios en la estructura

Para acoplar cada tanque en la estructura soporte, es necesario fijar y hacer coincidir los puntos de apoyo que cada forma geométricas ofrece en los tubos o barras de acero que conforman la estructura metálica. Posteriormente, en la sección de implementación mecánica se tratará sobre el tipo de soldadura usado para unir estos dos materiales. Se observa en la siguiente figura 3.13., los puntos de apoyo del reservorio cilíndrico, que en este caso son tangentes al contorno de la base circular, por lo tanto es en estos puntos (P1-P4) dónde se debe aplicar la soldadura.



**Figura 3.13. Acople del reservorio cilíndrico en los puntos de apoyo  $P_i$**

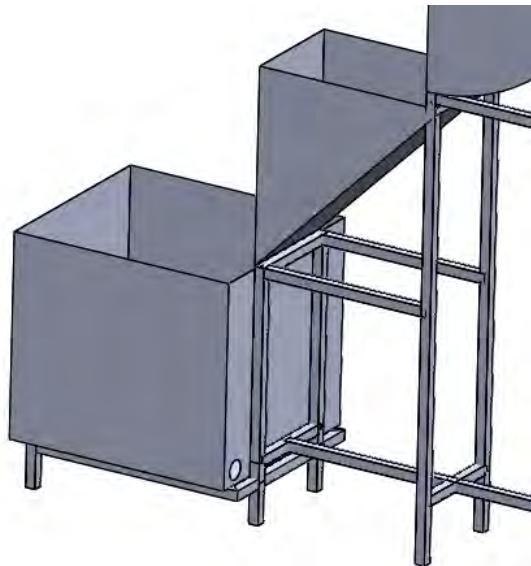
Se debe prestar atención a la dirección en la que apunta la tubería de descarga. Por ejemplo, en la figura anteriormente indicada, se observa que la dirección de la cañería debe ser orientada con respecto al eje del sistema de referencia, que a manera didáctica se incluye en la imagen. Así sucesivamente se van colocando los tanques de acuerdo a sus longitudes en cada nivel. En la siguiente figura 3.14. se observa el resultado final del ensamblaje de cada recipiente en su respectivo lugar, dejando de lado el reservorio rectangular del primer nivel.



**Figura 3.14. Ensamblaje de los tanques de nivel y el reservorio cilíndrico**

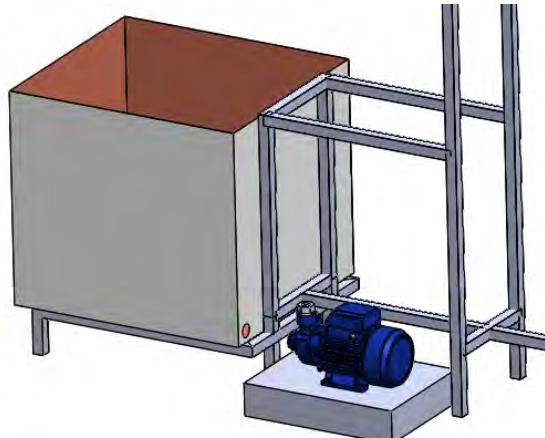
### 3.1.2.2. Ubicación de la bomba de agua

Para ubicar el último reservorio, situado en el primer nivel, se consideró antes dónde se debía ubicar la bomba, ya que según esto se pudo orientar la cara donde se sitúa el agujero del reservorio para que encaje con la tubería de la bomba de agua. Existe un espacio por debajo del segundo nivel donde está ubicado el tanque triangular que se observa en la figura 3.15.; a primera vista si se desea bombear agua desde este nivel hacia el reservorio de la parte superior, entonces el camino más corto de una tubería está ubicado por debajo de los tanques, y por consecuencia la bomba debe estar ubicada en medio de este recorrido. Así, se eligió el lugar más próximo a la fuente desde dónde se bombea el agua, qué es el reservorio rectangular, y su vez por debajo del tanque triangular como se observa en la figura siguiente.



**Figura 3.15. Agujero para el suministro de agua del reservorio hacia los tanques**

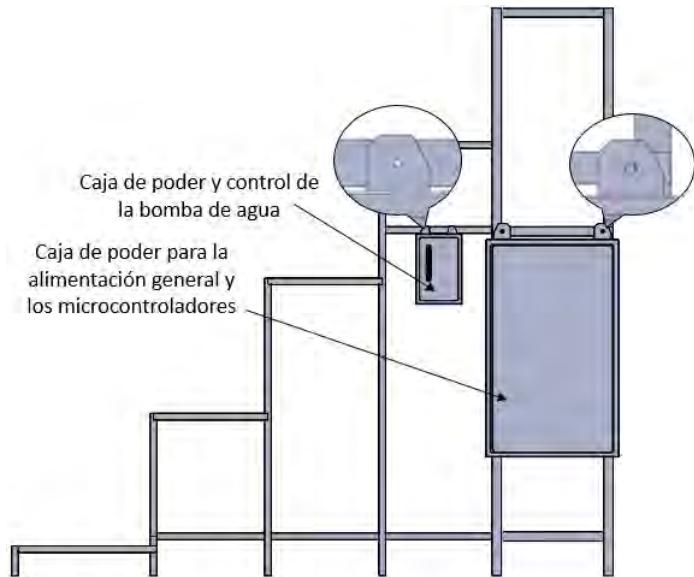
Debido a lo explicado, el reservorio queda ubicado por defecto en la estructura, y posteriormente se fijó la bomba de agua. Si se considera que la bomba opera con ciertas características, como potencia de 0.5HP, caudal de salida de 39L/min a través de una tubería de 1/2”, entonces se espera que generare una vibración apreciable, por tal motivo también no esta ensamblado en la propia estructura soporte ya que podría perturbar las mediciones de nivel. Lo más conveniente es empernarlo al piso, sobre una base metálica, la estructura también se recomienda que sea empernada ya que ante un fuerte temblor, podría desplomarse todo del módulo. En la figura 3.16., se muestra a la bomba fijada al piso y frente a la cara lateral del reservorio dónde está ubicado la entrada del suministro de agua. Hay que considerar además qué la estructura en general, debe estar ubicado cerca a una toma de agua, una toma de corriente y a un desagüe para el drenaje de agua si fuera necesario.



**Figura 3.16. Bomba de agua ubicada frente al reservorio**

### 3.1.2.3. Ubicación de las cajas eléctricas

Es necesario aprovechar la estructura soporte, para acoplar las cajas de poder, tanto del control de la bomba, como la caja eléctrica general –panel de control–. Se plantea que aparte de las fuentes de alimentación de voltaje alterno, se puede colocar los sistemas de adquisición de datos y los circuitos que estos necesitan en el mismo compartimento de la caja eléctrica general. Se debe tomar en cuenta qué habiendo ubicado ya la bomba de agua, es necesario que su fuente de alimentación y control se localice próxima a este equipo para evitar que el cableado se haga extenso. Comúnmente la bomba de agua se puede comprar con su respectiva caja de poder y control, ya que su función básica es alimentar la bomba y controlar su estado de encendido y apagado en diferentes modos de operación –automático y manual–. Entonces se propone de manera general la posición en donde se ubican las cajas. En la figura 3.17., se muestra el lugar más apropiado para que estas cajas puedan ser ensambladas, aprovechando el espacio y el tamaño que requiere cada caja de poder.



**Figura 3.17. Cajas de poder y control para la bomba y el sistema general**

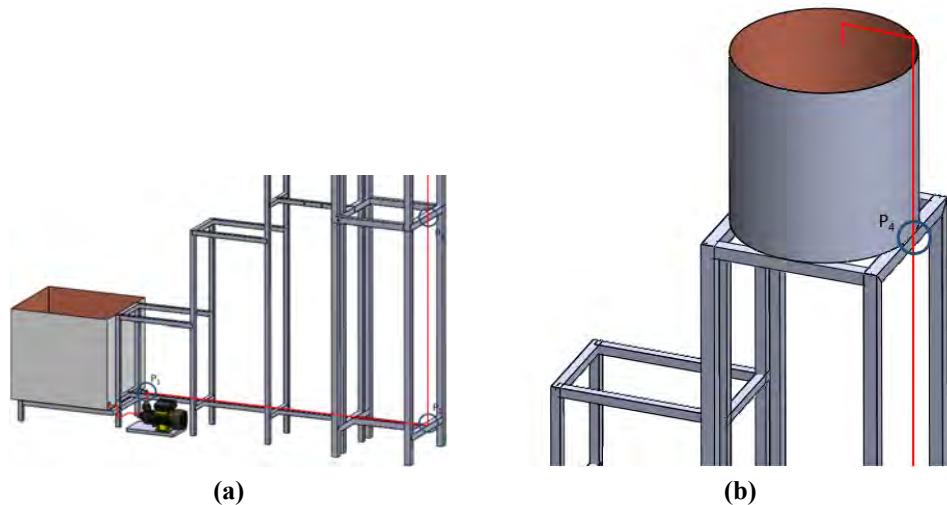
Si bien es cierto cuando se implemente y se haga el acople en la estructura, será necesario taladrar esta soporte para fijar con pernos cada caja de poder.

Para acoplar las cajas de poder a la estructura se deben utilizar orejas de sujeción donde irán los pernos.

### 3.1.3. Diseño Mecánico de accesorios adicionales

#### 3.1.3.1. Sistema de tuberías

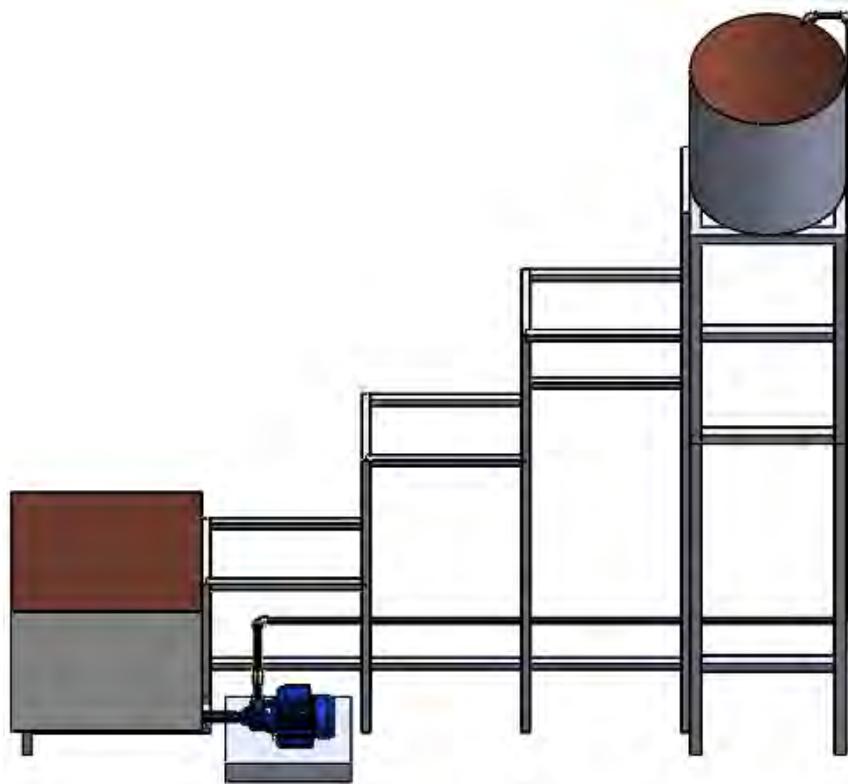
Para realizar un esbozo de la posible disposición que tendrá el sistema de tuberías, se comenzó desde el reservorio del primer nivel hacia el reservorio del último nivel, esto es posible ejecutar porque la bomba de agua ya está fijada. Esta sirve de referencia para empezar a trazar este sistema de tuberías, como se muestra en la figura 3.18.



**Figura 3.18. Esbozo de la tubería**

Los puntos P1-P4 sugieren que se deben colocarse abrazaderas entre las barras de la estructura soporte y las tuberías, ya que el agua al salir a una alta presión desde la bomba podría ocasionar que las se muevan o desajusten.

Debido a que la estructura soporte es de metal, esto favorece que se pueda soldar las abrazaderas sobre las barras de la estructura, o al menos empernarlas para posteriormente fijar las tuberías. En la siguiente imagen 3.19., se observa ya implementado el sistema de tuberías para poder alimentar el reservorio de la parte superior. Esta primera ruta sería usada para el primer modo de operación denominado cascada; es decir, el tanque de un nivel más alto suministra al agua a otro tanque de un nivel inferior.



**Figura 3.19. Primer recorrido del sistema de tuberías**

Es muy importante considerar tres parámetros para asegurar que la bomba pueda suministrar agua al reservorio cilíndrico ubicado a casi 3m de altura. A través de un calculo simple se relaciona la presión, el caudal y la potencia de la bomba PKM60 de la marca Petrollo, la cual ofrece una potencia de 0.5HP, con caudal de salida máximo de 39L/min. El cálculo de la presión se obtiene como estos dos últimos parámetros proporcionados, entonces:

$$P = F/A$$

$$Q = V * A$$

$$P \cdot Q = \frac{F}{A} \cdot V \cdot A$$

$$P \cdot Q = F \cdot V$$

$$P \cdot Q = \text{Potencia}$$

$$P = \frac{\text{Pot}}{Q}$$

$$P = 0.5HP \cdot \frac{745.7Pa}{1HP} \cdot 30\frac{L}{min} \cdot \frac{1m^3}{60000s}$$

$$P = 745700Pa = 7.457bar$$

Se obvia por unos instantes las perdidas por fricción y se considera que la velocidad de salida del agua en el punto superior es aproximadamente igual a la velocidad de entrada de la bomba, entonces solo habría que comparar que la presión en el punto más bajo, generado por una diferencia de nivel, es menor que la presión que provee la bomba.

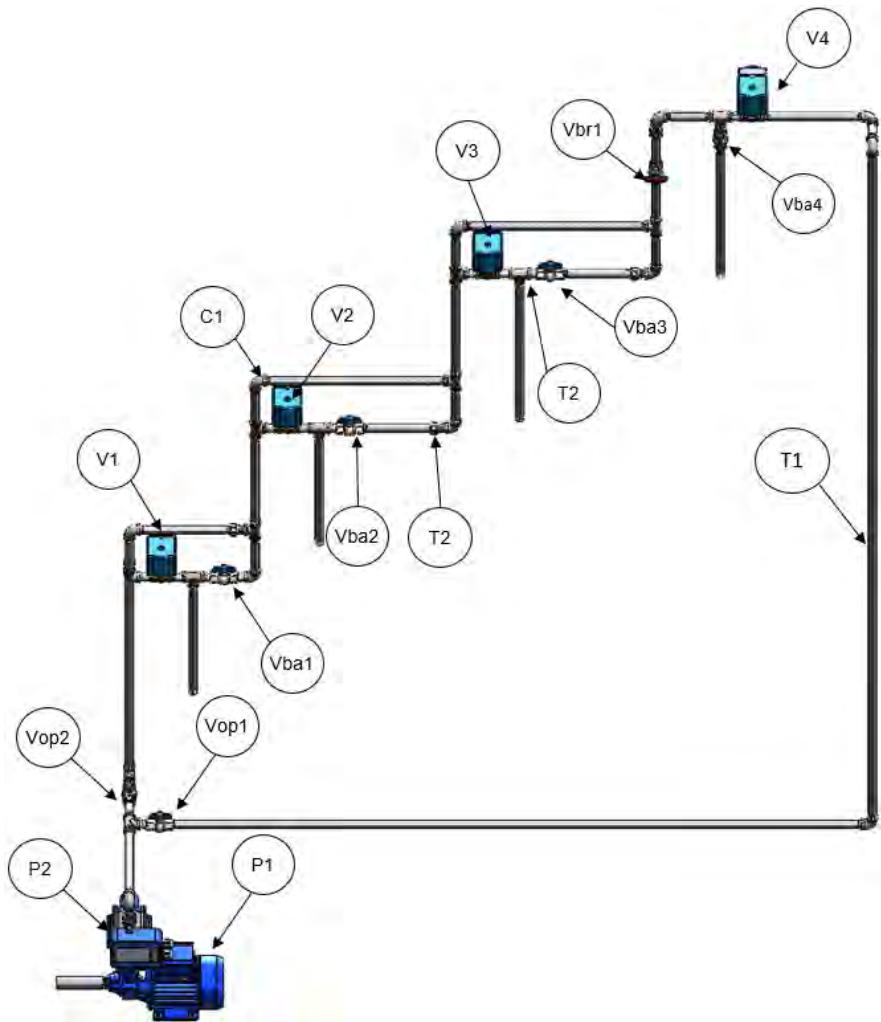
$$P_h = h \cdot g \cdot \rho$$

$$P_h = 3m \cdot 9.81 \cdot 1000$$

$$P_h = 29430Pa$$

Entonces se puede asegurar que una altura de elevación de casi 3 metros es posible suministrar agua a través de una bomba de 0.5Hp ya que  $7.45bar > 0.294bar$ . El siguiente modo de operación del sistema, consiste en alimentar a cada tanque de nivel de forma independiente, de modo que las válvulas proporcionales sean capaces de controlar el caudal de entrada individual a cada tanque. Para este fin se propone el siguiente circuito de tuberías que consiste en lazos cerrados, con el objetivo de disponer una válvula manual para el suministro de agua que no depende de ningún controlador

electrónico. Este ultimo factor facilita que se pueda empezar a llenar con agua los tanques, sin activar desde una computadora para abrir la válvula, ya que estas están son normalmente cerradas.



**Figura 3.20. Sistema de tuberías global**

Los elementos que conforma este sistema de tuberías global son los siguientes:

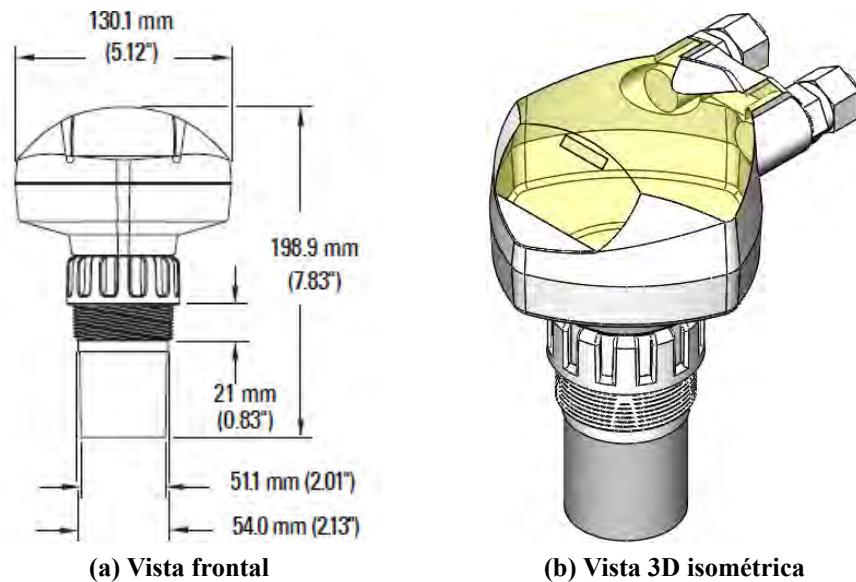
- Vba1-Vba4: Válvulas de bola azules para llenado manual de recipientes
- Vop1-Vop2: Válvulas de bola verdes para cambio de modo de operación
- Vbr1: Válvula de bola roja para transición
- T1: Tuberías de acero galvanizado de 1/2”

- P2: Presurizador
- P1: Bomba monofásica de agua de 0.5HP
- T2: Tubos en T de  $\frac{1}{2}$ "
- T3: Niples de  $\frac{1}{2}$ "
- C1: Codos a  $90^\circ$  de  $\frac{1}{2}$ "
- V1 – V4: Válvulas solenoides proporcionales

Debido a que se ha agregado una cantidad de tuberías considerable, es necesario determinar las presiones de salida en las válvulas proporcionales para garantizar que haya la suficiente presión –0.5bar-10bar– capaz de activar las válvulas, ya que estás funcionan con un mínimo de presión equivalente a 0.5 bares. El segundo modo de operación que consiste en los lazos de tuberías ubicados encima de los tres tanques, se ha diseñado para permitir conjuntamente con el primer modo de operación, establecer una variedad de posibilidades de sistemas de control que se discutirá en la sección del diagrama P&ID ??.

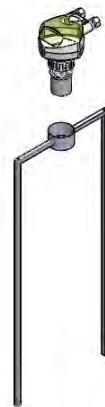
### **3.1.3.2. Soporte para el sensor de nivel**

Para fijar el sensor de nivel Sitrans de Siemens es necesario situarlo encima de los tanques a una distancia de por lo menos 25cm –distancia muerta–, como sugiere el manual de uso del sensor. Sin embargo, no se cuenta con una estructura que pueda soportar a este sensor a una distancia prudente del tanque, es por este motivo que se ha diseñado un soporte que considera las características geométricas del sensor que se muestran en la figura 3.21.



**Figura 3.21. Sensor de nivel Sitrans Probe LU**

Por la forma geométrica del sensor, se puede construir un armazón que pueda sujetar sujetar al sensor y ubicarlo por encima de cada tanque, acoplando a este armazón unas varillas metálicas que sirvan de apoyo. La longitud de estas varillas debe permitir que la altura a la cual se posicionen los sensores sea la adecuada, considerando la distancia muerta por debajo de la cual, el sensor recién empieza a medir. Para esto, se toma en cuenta lo precisado en el manual del sensor, donde se identifica el angulo que hace el haz al tomar las medidas desde el transductor. La figura 3.23. muestra el diseño del soporte para el sensor, donde se observa que las varillas tienen que se ensamblados en el armazón del soporte del sensor.

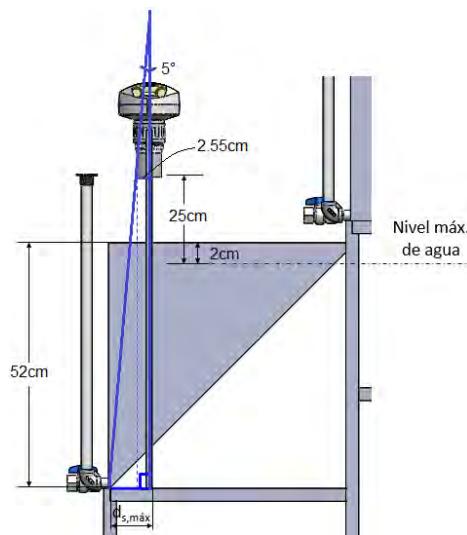


**Figura 3.22. Ensamble del sensor y su soporte**

En la figura anterior 3.22., se propone el diseño que cumple con las características deseadas. Este diseño debe ser fabricado con metal ya una soldadura de por medio entre varillas y armazón. Para hallar la distancia a la cual se debe ubicar el sensor de la cara lateral del tanque, se ejecuta el siguiente cálculo:

$$d_{s,max} = (52 + 25 - 2) \cdot \tan(5^\circ) + 2.55$$

$$d_{s,max} = 9.11\text{cm} \quad (3.5)$$



**Figura 3.23. Ubicación del sensor y su soporte con respecto al tanque triangular**

Como se mencionó anteriormente, el ángulo del haz del sensor ultrasonido es de  $10^\circ$  y este parámetro condiciona la distancia máxima a la que se debe colocar el sensor con respecto a la superficie lateral de un tanque. Así en base a un ángulo de  $5^\circ$  se halló dicha distancia máxima.

### **3.1.3.3. Servoválvula**

En esta sección se elabora el diseño de una válvula que pueda ser controlada con un servomotor, para controlar su apertura y cierre proporcionales, a diferentes grados de giro de la válvula de bola, que permitirá el ingreso de agua a ciertos porcentajes proporcionales al giro. Así, se podrá enviar una señal de control desde el microcontrolador hacia el servomotor, para ejecutar esta acción de control.

#### **3.1.3.3.1. Diseño del acople entre servomotor y válvula**

El primer inconveniente que se presenta al diseñar esta servoválvula, surge cuando se desea acoplar el servomotor a la válvula de bola de  $1/2"$ . La figura siguiente 3.24., muestra la necesidad de diseñar un acople entre estos dos accesorios.



**Figura 3.24. Válvula de bola y servomotor**

El acople irá montado en el eje de la manija de la válvula de bola. Este tipo de manija mostrada en la figura anterior es muy común en las válvulas de bola pero no es práctico para el propósito de este proyecto, por tal motivo se usará las válvulas con manija de tipo corbata o mariposa. Entonces por el otro extremo del acople, estará localizado al eje del servomotor. Una alternativa inicial fue remover la manija de la válvula y buscar un acople rígido metálico con prisionero, aunque fue muy escaso poder conseguir este accesorio. Por otro lado, se comprobó que después de haber retirado la manija mariposa, el eje con prisionero de la válvula expuesta, presenta mayor resistencia al toque comparado cuando se utiliza la manija mariposa debido a que el brazo desde donde se ejecuta la fuerza y la superficie de contacto se incrementan y por ende la fuerza disminuye, esto permite que sea más fácil girar la válvula a través de la manija.

En última instancia, si se decidiera acoplar los ejes, se debe tener la certeza que el torque que se provee mediante el servomotor sea el necesario para girar el eje

de la válvula. Necesariamente este acople entre ejes tiene que ser de un material rígido para que el torque se pueda transmitir desde los ejes.

En la figura 3.25. se muestra que ambos accesorios poseen pequeños acoplos para girar sus ejes, la válvula cuenta con una manija y el servomotor con su brazo u *horn*. Estos partes serán útiles para realizar un diseño que acople la válvula y el servomotor, aprovechando que el acople a diseñar tendrá mayor superficie de contacto entre manija y brazo, que resultará en menor resistencia de torsión al girar en conjunto.



**Figura 3.25. Válvula con manija corbata y servomotor con *horn* tipo estrella**

Para el diseño de este acople, se compró la válvula de corbata y el servomotor, a fin de tomar los datos de las dimensiones geométricas de cada dispositivo y realizar una acopla a la medida de los accesorios ya comprados como se mostró en las figuras anteriores. Existen diversas marcas de válvulas de corbata, pero se eligió la marca Ferrelima, ya que ofrece poca resistencia al torque y además un factor clave es que este tipo de válvulas se abre y cierra a 90°. Este último hecho es vital ya que el eje del servomotor sólo gira hasta 130 grados, lo cuál es más que suficiente para la apertura y cierre de la válvula. Se han probado y

comparado diferentes marcas en válvulas de corbata, mientras que en algunas se ofrece mayor resistencia al torque para la apertura de la válvula por medio de su manija, existen otras como la marca que se está usando qué son ideales para este propósito.

Cuando se adquirieron las válvulas de bola con manija corbata, se observó que la forma geométrica de la corbata era diferente en algunos casos, pero cómo se utilizará la válvula de la marca Ferrelima, entonces el diseño del acople será para esta marca en específico. No necesariamente este acople servirá para otro tipo de marcas de válvulas de bola; sin embargo, los *horn* de los servomotores sí son estándar y el diseño geométrico en el otro extremo podrá acoplar a cualquier tipo de servomotor de la marca Savöx.

Si bien es cierto, se pueden encontrar librerías de los diseños ya elaborados en páginas como Grabcad, tanto de la válvula de bola como del servo motor, se debe hacer un diseño personalizado para este tipo de marca de válvula de bola, ya que sus dimensiones geométricas son diferentes al de otras marcas y podría no encajar al momento de hacer el acoplamiento. Por otro lado, no hay mayor inconveniente al diseñar el acople del *horn*, ya que las librerías en la página web de Grabcad de los servomotores, es común en muchos servomotores de engranaje de 25 dientes.

Se comenzará por el diseño más complicado, que es para el extremo del acople de contacto con la manija mariposa. Entonces, para realizar este diseño se tomaron las medidas de la parte superior de la válvula; es decir, donde está ubicado la manija mariposa y el eje de la válvula. La toma de medidas se realizó con Vernier digital, agregando 0.15mm a la medida de cada distancia, ya que al fabricar una

pieza de acople, es necesario incrementar una longitud adicional para que las piezas a encajar puedan caber las unas con las otras. Debido a que el diseño del acople se imprimirá con una impresora 3D, y rollos ABS, se ha encontrado cierta referencia en internet, donde se especifica una comparación entre acoples, cuando se agregó diferentes longitudes adicionales, evaluando así, si las piezas estaban ajustadas o no al momento de acoplarlas, tal cual se observa en la figura 3.26.

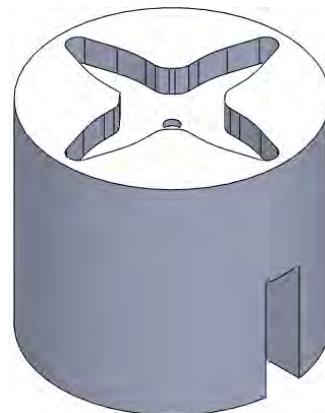


**Figura 3.26. Acoples con diferentes tolerancias: 0.1mm, 0.15mm y 0.2mm**

Fuente: <https://www.javelin-tech.com/blog/2012/08/how-to-set-up-the-correct-tolerances-in-3d-printed-static-assemblies/>  
Recuperado el 3 de julio del 2019

Para el otro extremo de la cara del acople cilíndrico, se dibuja la forma geométrica del horn del servomotor agregando los 0.15mm adicionales en la operación de *offset*. Entonces se procede a realizar una extrusión cortante con

esta forma geométrica en el otro lado del cilindro del acople, y así obtener el resultado que se observa en la figura siguiente.



**Figura 3.27. Acople servomotor-servoválvula**

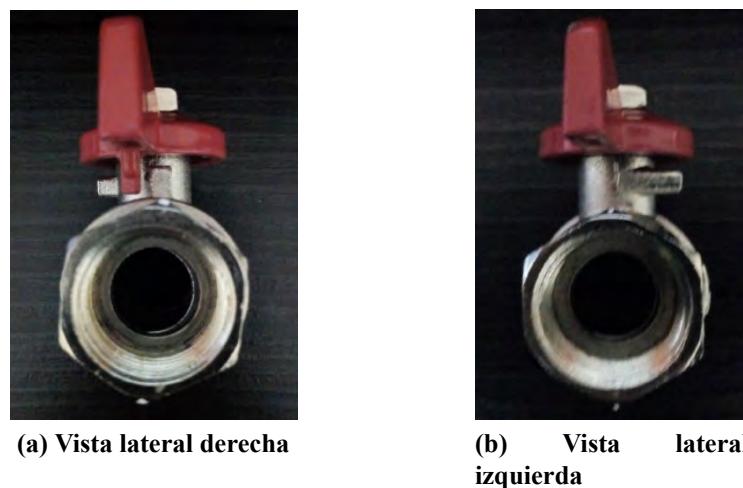
### 3.1.3.3.2. Diseño de la caja de acople para la servoválvula

El siguiente diseño mecánico lo constituye la parte que encapsula el conjunto: servomotor y válvula de bola. Si bien es cierto la válvula de media pulgada, va montada en la tubería de los tanques, el servomotor no tiene un soporte en la misma válvula ni tampoco en la tubería, qué son los lugares más próximos donde se puede sujetar. Por esta razón, se diseña una caja qué pueda encapsular tanto a la válvula como al servomotor.

La idea es diseñar una caja que contenga y aprisione a la válvula y al servomotor; se podría simplificar si se sustrae el volumen de la forma geométrica tanto de válvula como del servomotor, dentro una caja sólida, obteniendo así una caja pero con una cavidad con la forma de tales accesorios. Lo que se desea es evitar que esta caja pueda moverse, restringiendo sus grados de libertad en torno al eje de la tubería o de la válvula. Esta lógica se aplica de

igual manera cuando se aprisiona al servomotor, ya que esté último al girar, debe sostenerse sobre una superficie sólida que impida su movimiento y asegure sólo el giro alrededor de su eje. Para impedir esta rotación de toda la caja, se debe aprovechar no sólo su acople con la tubería, sino con la forma geométrica que posee los extremos hexagonales de la válvula de bola (tuercas hexagonales). Entonces el primer paso para el diseño de la caja es tomar las medidas de estos acoplos o tuercas hexagonales de la válvula para extruir dentro de una caja sólida, un agujero de forma hexagonal, también se agregó los 0.15mm establecidos anteriormente.

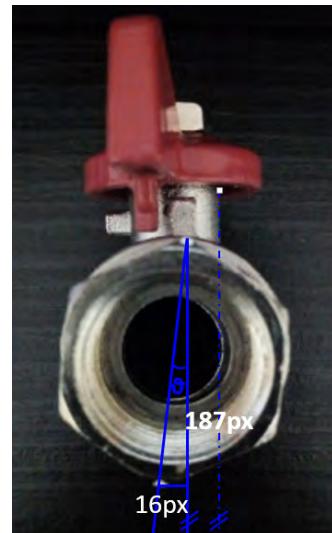
En la figura 3.28., se muestra la vista de las dos tuercas hembra de 1/2" de la válvula de bola, dónde solo el hexágono de la tuerca del lado izquierdo está posicionado sin inclinación.



**Figura 3.28. Tuercas de 1/2" de la válvula de bola**

En la figura siguiente se ha hecho un esbozó para calcular el ángulo de inclinación de la línea diametral del círculo circunscrito en el hexágono de la tuerca de la válvula mostrado en la vista lateral derecha. Los cálculos fueron

realizados teniendo en cuenta la imagen y los píxeles proporcionados al trazar distancias horizontales y verticales.



**Figura 3.29. Inclinación de una de las roscas hembras de la válvula de bola**

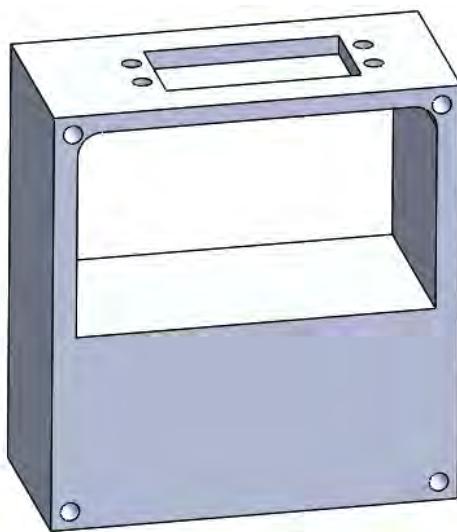
$$\theta = \arctan\left(\frac{16}{187}\right)$$

$$\theta = 4.9^\circ \quad (3.6)$$

Este ángulo, resultado de la ecuación (3.6), permite orientar el hexágono al hacer la extrusión en este extremo de la caja, se considera que ambos huecos, de los dos extremos, resultado de los acoplos hembra de 1/2" de la válvula son colineales. Así se continua con la perforación en el diseño hasta tener un hueco pasante.

El hecho de considerar esta pequeña inclinación de uno de los hexágonos en la válvula, es importante debido a que permite posicionar la válvula dentro de la caja y hacer que ésta no esté inclinada, sino con el eje de la válvula perpendicular a la caja de acople, y poder tener centrado a la manija de corbata. Luego se establece el orden en que van acoplados los componentes dentro de la

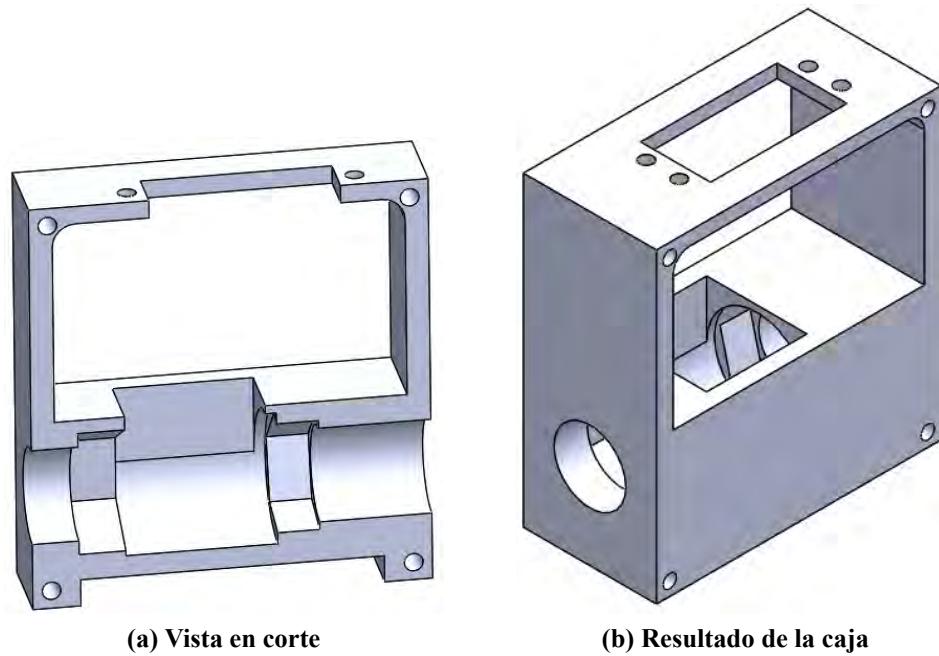
caja para puedan ser acoplados: primero se coloca la válvula, a continuación se coloca el acople en la manija tipo corbata, después en el otro extremo del acople se coloca el *horn* del servomotor, el cual ya ha sido instalado. Con la finalidad de que el acople entre servo y válvula tenga una rotación libre, se practica un agujero amplio en la parte superior de la caja para que pueda permitir el giro de este conjunto. En la figura 3.30., se ha practicado un agujero a la caja en el lugar donde se acoplara el servomotor y se atornillará con sus respectivos pernos.



**Figura 3.30. Caja de acople para el servomotor y la válvula**

El resultado tanto de la extrusión de la válvula en la caja del agujero practicado en la parte superior para el acervo motor y el agujero pasante en la cara lateral de la caja se muestra en la siguiente figura como un corte en la mitad donde se observa los espacios vacíos que albergarán a los diferentes accesorios. Ya que esta caja al presionar a varios componentes, se sugiere partirlo en la mitad tal cual se muestra en la figura mencionada. Por ese motivo sea perforado con 4 agujeros en las esquinas de la caja a fin de atornillar las dos mitades con pernos de 4mm

al momento de ensamblarlos en la tubería. En la figura siguiente se muestra la cavidad donde irán acoplados tanto la válvula como el servomotor dentro de la caja. Si bien es cierto, el corte transversal a la mitad muestra la forma geométrica del agujero, sugiero a su vez que al momento de imprimir dicha caja se haga en dos partes para poder insertar cada elementos, así se agregó a este diseño cuatro agujeros pasantes situados en la esquina de la caja, que serán utilizados para poder agregar pernos.



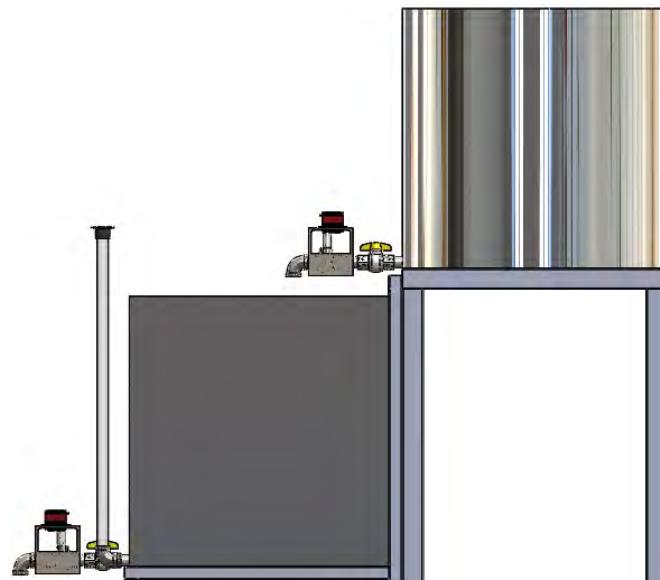
**Figura 3.31. Caja de la servoválvula**

### **3.1.4. Diseño del ensamblaje de los accesorios adicionales, los sensores y los actuadores**

#### **3.1.4.1. Ensamblaje de las servoválvulas**

Para ensamblar las servoválvulas, sólo se las instala en el lugar de descarga de cada tanque de nivel, usando los niples y enroscando cada servoválvula sobre

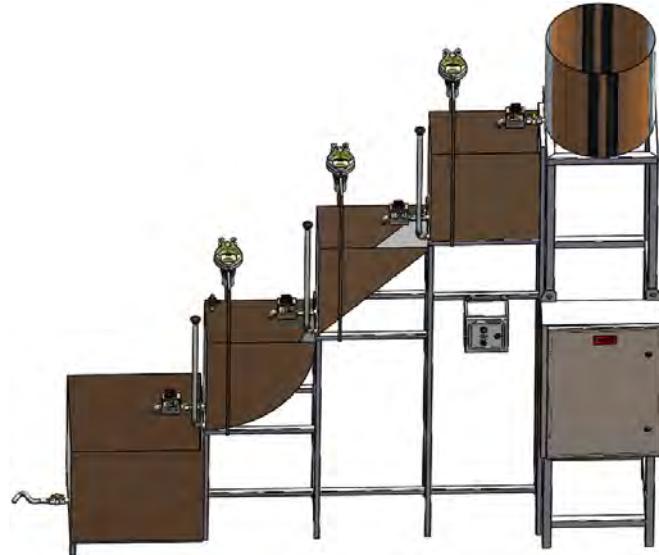
estos. Además en la salida de la servoválvula es aconsejable que después se agregue una tubería larga, para que suministre agua al tanque sin salpicar.



**Figura 3.32. Ensamble de servoválvulas en los tanques**

#### **3.1.4.2. Ensamblaje de los sensores y sus soportes**

Para ensamblar los sensores y sus soportes, se considera la distancia calculada anteriormente con respecto a los tanques, y se los ubica en sus respectivos lugares como se observa en la figura.



**Figura 3.33. Ensamble de las servoválvulas en los tanques de nivel**

### **3.1.4.3. Ensamblaje del sistema de tuberías**

El sistema de tuberías para el segundo modo de operación se realiza considerando Los lazos de tubería que va encima de cada tanque los cuales tienen una válvula manual y la válvula proporcional. Se ha agregado acopladores de rosca en cada lazo ya que sirven para acoplar la rosca. Además se agrega sujetadores para tuberías aéreas, que están soldados a la estructura. La figura a continuación muestra el resultado de todo el ensamblaje para el sistema de tanques.

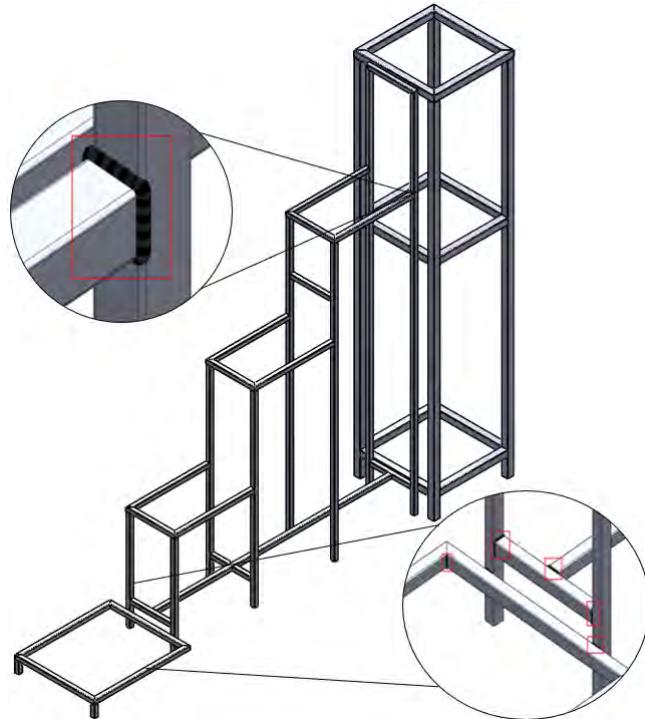


**Figura 3.34. Ensamble del sistema de tuberías**

### 3.1.5. Análisis del diseño mecánico

#### 3.1.5.1. Simulación para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en la estructura de soporte

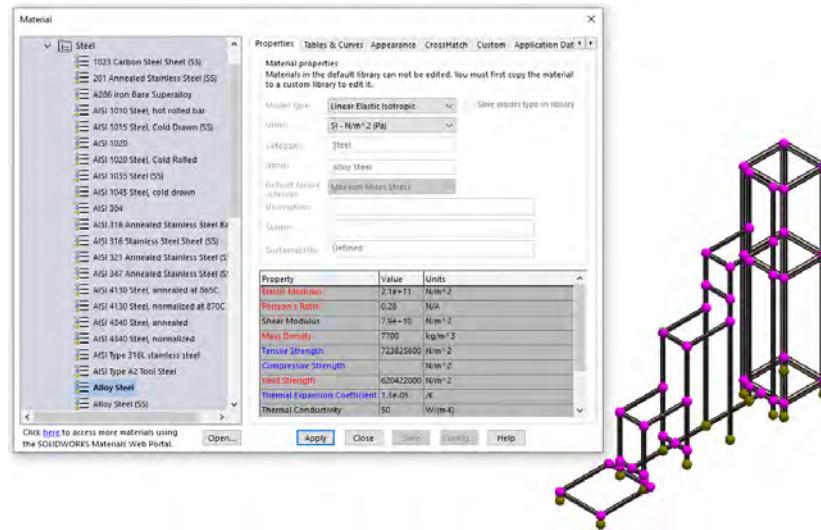
Esta sección tiene como objetivo verificar si la estructura que soporta a los tanques de nivel es vulnerable a efectos de carga producto del peso de los tanques llenos de líquido. Se espera obtener entre 2 y 3 como factor de seguridad para tener la certeza que la estructura soporta la carga máxima ejercida por el peso conjunto de agua más recipientes. Es necesario mencionar que se ha agregado soldadura, tal como se observa en la figura 3.35., a la estructura en los puntos de contacto de las barras de acero inoxidable que conforman la estructura para hacer las simulaciones.



**Figura 3.35. Cordones de soldadura en la estructura**

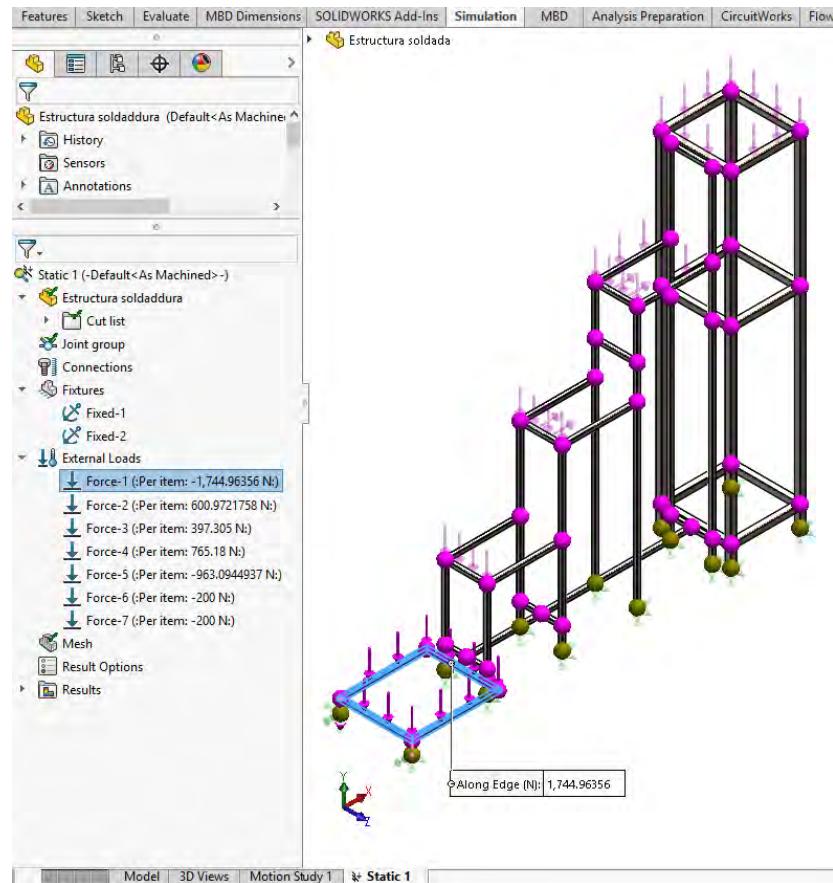
A continuación se describirá un conjunto de pasos para configurar la simulación de esfuerzos y deformaciones que se realizará en el programa Solidworks Simulation.

- El primer paso es configurar el material de la estructura en la simulación, que en este caso es acero inoxidable –*Alloy Steel*–, como se observa en la figura 3.36.. Al inicializar el estudio estático de fuerzas, el programa reconoce los puntos de contacto –bolas de color rosado– entre las barra de acero que conforma la estructura.



**Figura 3.36. Configuración del tipo de material de la estructura**

- El siguiente paso es establecer los puntos fijos de la estructura; es decir, elegir donde las patas de la estructura se apoyan en el piso –flechas verdes del gráfico 3.37.–, después se debe agregar las cargas (flechas de rosado) en las zonas de contacto donde los tanques se apoyan sobre la estructura considerando que estos están llenos completamente de agua, estos datos se obtienen de la sección anterior, donde se calculó el volumen de agua presente en cada tanque. Se puede despreciar el peso de los tanques ya que a comparación del peso del volumen de agua es insignificante.

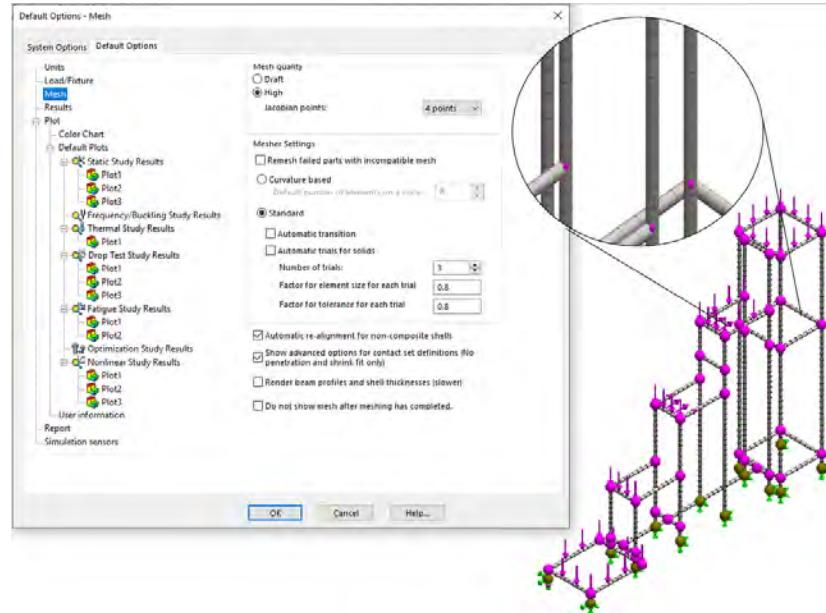


**Figura 3.37. Cargas verticales producto del peso y cargas horizontales producto del apoyo entre tanques y estructura**

En la figura de arriba, por ejemplo se ha hecho hincapié en las fuerzas que se ejercen a la estructura por parte del primer reservorio ubicado en la parte más baja, considerando que este está lleno de agua con una masa de alrededor de 170 kg y por lo tanto una fuerza de 1700 N. La lista de fuerzas aplicadas se encuentra en la parte izquierda del gráfico, y hace referencia de igual manera a cada peso de los tanques. Para las fuerzas horizontales se ha considerado un aproximado del 50% de la fuerza vertical, lo cual excede a la fuerza horizontal real; sin embargo, es una aproximación suficiente para el cálculo del factor de seguridad.

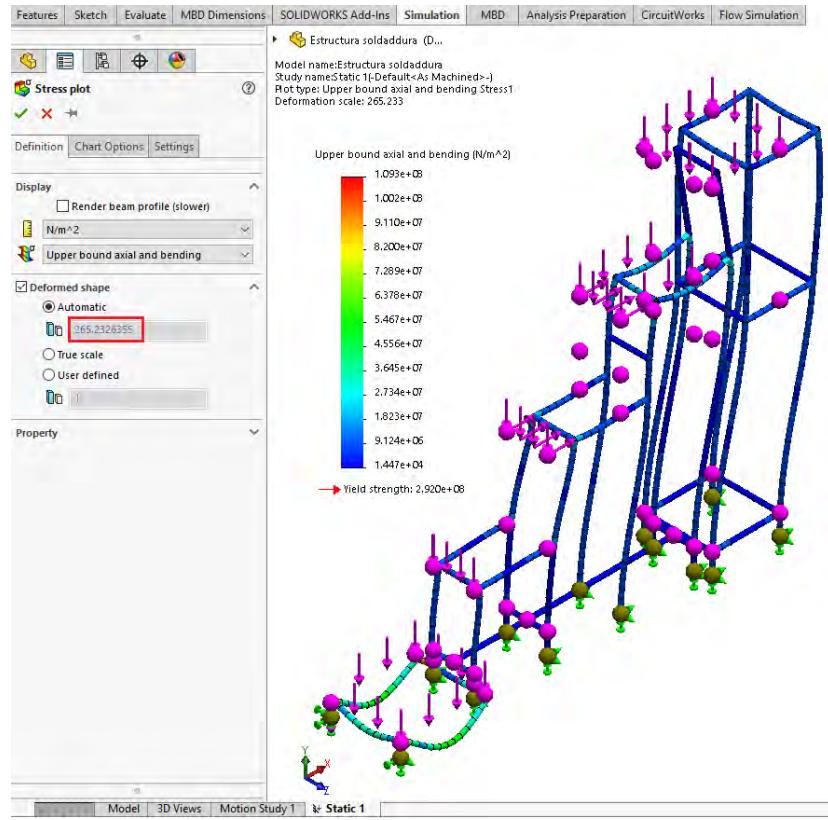
- Por último se genera el mallado para culminar la configuración de

parámetros y empezar la simulación.



**Figura 3.38. Mallado de la simulación de esfuerzos y deformaciones**

Ya que es un análisis de cargas estáticas, sólo se configura los parámetros mencionados. La figura 3.39. muestra el resultado de esfuerzos y deformaciones presentes en la estructura.

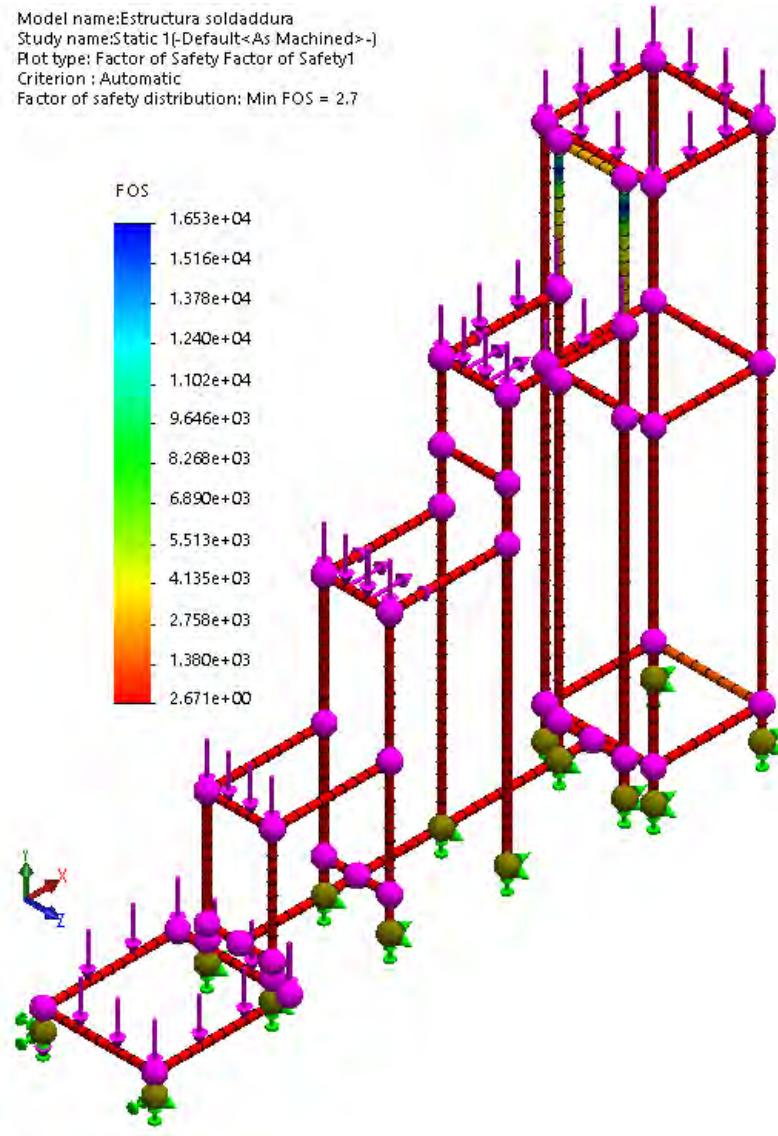


**Figura 3.39. Esfuerzos y deformaciones en la estructura**

Se observa que el esfuerzo promedio en toda la estructura se ubica en el rango azul, con un esfuerzo hasta el límite elástico con valor igual a  $2.92 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ . Mientras que cada barra de la estructura se mantenga por debajo del límite elástico, la estructura asegura los esfuerzos generados en cada zona. Las deformaciones están escaladas con un valor aproximado de 265 a fin de poder observar el resultado producto de las cargas; es decir se ha exagerado en tal magnitud para que se sea notorio el efecto, por esta razón esta señalado en la figura la deformación de las formas en modo automático a escala. También se pudo elegir la opción escala real pero dificulta la visualización de los efectos producidos en la estructura.

Lo más importante para analizar en este procedimiento es el factor de

seguridad, cuyo resultado se muestra en la figura siguiente.



**Figura 3.40. Factor de seguridad a plena carga**

Fuente: Diseño en Solidworks Simulation

Recuperado el 20 de agosto del 2019

Se puede observar que en la mayor parte de la estructura se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2.671, lo cual es un valor deseado deseado y esperado según el material que se utiliza en la estructura. Se puede encontrar valores, para

el factor de seguridad, más altos en zonas menos presentes en toda la estructura. En conclusión el valor del F.S. implica que como máximo se puede esperar someter a la estructura con una carga total de 2.6 veces la carga total que produce todo los tanques llenos de agua en generalmente cada punto de la estructura.

### **3.2. IMPLEMENTACIÓN MECÁNICA**

#### **3.2.1. Fabricación del sistema de tanques**

##### **3.2.1.1. Reservorios de agua**

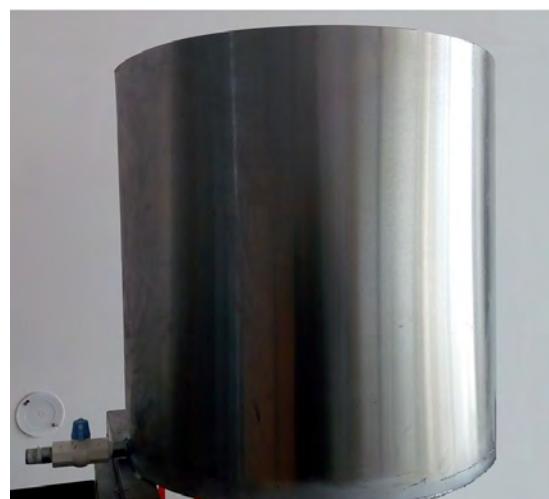
Como ya se ha mencionado con anticipación, los tanques son fabricados en base a planchas de latón de 0.9mm de espesor y se les ha taladrado con brocas de menor a mayor diámetro, con el fin de conseguir agujeros de 21.3mm de diámetro, esto permite el ingreso de tubos de 1/2".

Po otro lado, el reservorio del nivel inferior posee dos perforaciones, la primera, que permite la descarga del líquido que se encuentra en la cara lateral izquierda de este recipiente y es de 1/2", mientras que la segunda perforación, se encuentra en la cara lateral derecha, y está ubicada específicamente en la esquina inferior, ya que ésta debe estar frente a la entrada de la tubería de la bomba. Este ultimo agujero es de 1" de diámetro ya que esta magnitud de diámetro es propia del suministro de la bomba tal cual se muestra a continuación en la foto 3.41..



**Figura 3.41. Reservorio rectangular de latón**

Mientras que el reservorio cilíndrico, sólo cuenta con agujeros de 1/2”, cuya función es de descarga, en tanto que existe una entrada de suministro de agua aéreo, proveniente del sistema de tuberías como se mostró en la figura 3.19.. En la figura 3.42., se aprecia el resultado de este reservorio tras haber acoplado su tubo de drenaje.



**Figura 3.42. Reservorio cilíndrico con cañería para su descarga**

Para soldar las planchas de latón y formar los reservorios, se utilizó un soldador

de cobre que utiliza una soldadura compuesta de dos partes, una de estaño y otra de plomo.

### **3.2.1.2. Tanques de nivel**

Los tanques son del mismo material que los reservorios y se fabrican con las planchas de latón de las mismas características, usadas en los reservorios; además se les practica 2 agujeros, –ver figura 3.43.– de 1/2” donde se les acopla los niples, soldados a ellos. Los cuales sirven para la descarga del tanque y el acople de un indicador de nivel respectivamente. Además el indicador posee dentro una bola de plástico, para indicar el nivel de agua según este ascienda o descienda por flotación.



**Figura 3.43. Cara lateral del tanque paralelepípedo**

Cara lateral del tanque paralelepípedo

Cuando se practicó los agujeros del tanque triangular y cuarto de elipse, se tuvo cuidado de no perforar la superficie oblicua e inclinada dependiendo de cada tanque, ya que el agujero al estar en la parte inferior del tanque, presenta un espacio reducido conforme uno se aproxima a las aristas de intersección entre

dos caras como se observa en la imagen 3.44.. Después se le acopla su respectivo tubo de descarga o niple.



**Figura 3.44. Parte angular y oblicua de dos de los tanques**

### 3.2.1.3. Fabricación de la estructura soporte

Después de haber hecho el diseño de la estructura soporte para los tanques y reservorios, se fabricó la estructura metálica en base a tubos cuadrangulares de acero inoxidable, hechos a partir de planchas del mismo material, con 0.9mm de espesor para el lado del soporte de los tanques y área cuadrada transversal de  $7.29\text{cm}^2$ , y 1.2mm de espesor para el lado de los reservorios tal cual se representa en la figura 3.45., con sección cuadrada transversal de  $14.4\text{cm}^2$ , ya que éstos tienen que soportar mayor peso.



**Figura 3.45. Barras cuadrangulares de la estructura soporte, con secciones de  $2.7\text{cm}^2$  y  $3.8\text{cm}^2$**

Para soldar las barras de acero que conforman a estructura se usaron electrodos de tungsteno según el proceso de soldadura TIG, en el cual el arco eléctrico se establece entre el metal base y el electrodo. (3.46.).



**Figura 3.46. Soldadura en los vértices de unión en las barras del soporte**

La figura 3.47. muestra la estructura ya fabricada según las especificaciones del diseño mecánico, realizado en la sección previa. Posteriormente se acopla los recipientes, la caja de poder, el soporte para los sensores, y la abrazadera de las

tuberías.



**Figura 3.47. Estructura general de soporte**

La estructura fue situada en el laboratorio de electricidad y automatización de la facultad de ingeniería mecánica con las debidas coordinaciones para su autorización. Debido a que este laboratorio ofrece espacios con suministro de agua, electricidad y desagüe, se puede instalar dicha estructura cerca a estos puntos de suministro. Para evitar que la estructura se desplome frente a un terremoto se la ha empernado al piso –3.48.–.



**Figura 3.48. Estructura empernada al suelo**

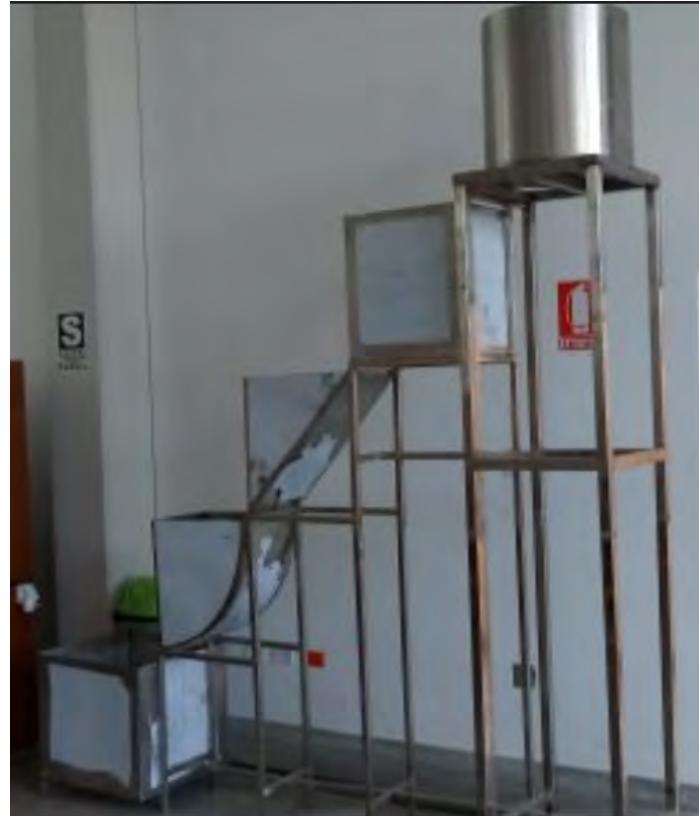
### **3.2.2. Ensamblaje del sistema de tanques**

#### **3.2.2.1. Instalación de los tanque en la estructura**

Teniendo ya fijado la estructura al piso, se soldó cada tanque en su lugar correspondiente ordenado por niveles, utilizando varillas de plata que fueron fundidas por una llama alimentada por acetileno en combinacion con oxigeno, para unir las barras de acero inoxidable de la estructura con el latón de los tanques y reservorios. Para ubicar cada tanque se considero que estos van ubicados según el orden siguiente: el tanque elíptico en el segundo nivel, el tanque triangular en el tercer nivel y por ultimo, el tanque rectangular en el cuarto nivel. Cabe resaltar que en la sección de ensamblaje se mencionó que cada tanque va soldado en la estructura, considerando sus puntos de apoyo comunes entre elementos.

#### **3.2.2.2. Acople de los reservorios**

El reservorio principal –rectangular– es fijado en el primer nivel donde descansa una base rectangular conformado por barras de acero pertenecientes a la estructura soporte, la cual está a unos 15cm del piso. Se considera además que cada reservorio al igual que cada tanque va orientado según su tubo e descarga apuntado a la izquierda. Esta orientación facilita que cada recipiente puede utilizarse em modo cascada, suministrando agua a un tanque externo y descargando su propio volumen como se observa a continuación.



**Figura 3.49. Sistema de tanques ensamblado en el estructura**

Por último, el reservorio cilíndrico es ubicado en el nivel superior, se aprovecha también la base cuadrangular superior de la estructura para soldar el reservorio en los puntos de apoyo comunes.



**Figura 3.50. Reservorio cilíndrico soldado en la estructura**

### 3.2.2.3. Acople de los tanques

Para fijar los tanques de nivel se siguió la misma lógica realizada en el acople de los reservorios. Por ejemplo, el tanque paralelepípedo fue ubicado en el cuarto nivel mostrado en la siguiente figura 3.51., donde se aprovecharon los bordes de la base que posee este recipiente y se hizo coincidir estas zonas con la base rectangular de la estructura.



**Figura 3.51. Tanque rectangular soldado en la estructura**

Un mayor desafío se presentó, cuando se fijó el tanque triangular y el tanque elíptico en sus respectivas posiciones, ya que estos presentan una base con forma geométrica peculiar, donde la única zona de contacto es la arista inferior. Por este motivo, cuando se los ensambló, se hizo coincidir dichas aristas con las barras de soporte de la estructura, aplicando soldadura entre arista y estructura tal cual se observa en la figura 3.52.



**Figura 3.52. Tanque triangular soldado en la estructura**

El mismo procedimiento se ejecutó para el tanque elíptico, aprovechando ambas aristas tanto inferior como superior apoyadas en la estructura.



**Figura 3.53. Tanque elíptico soldado en la estructura**

### 3.2.2.4. Instalación de la bomba fijada

Antes de que se efectuará la instalación de las tuberías, se fijó la bomba al piso, que se localizó debajo del segundo nivel donde está ubicado el tanque elíptico. Esta ubicación, como se observa en el diseño mecánico, condiciona que el agujero del reservorio del primer nivel se ubique frente a la entrada de la bomba para el acople de un tubo de una pulgada en línea recta. Por otro lado la bomba también está ubicada cerca a un lugar con suministro eléctrico y por su parte el reservorio está al costado del canal de desagüe, esto hecho contribuye a una ubicación estratégica para el módulo de control. En la figura se 3.54., se observa que se localiza justo al frente de la entrada del orificio de 1" del reservorio.



**Figura 3.54. Bomba de agua instalada frente al reservorio rectangular**

Para empernar la bomba al piso se colocó antes una base metálica sobre la cual la bomba se pudo asentar. El espesor de esta base fue la apropiada con tal de tener los ejes concéntricos de el agujero del reservorio y la entrada de agua en la bomba. Por otro lado, la bomba no fue ubicada encima de la estructura soporte, porque está al estar funcionando y bombeando agua genera una vibración considerable,

lo que la convierte en una fuente de ruido. La figura 3.55., muestra cómo se ha empernado la bomba a su base soporte y la base al piso, con pernos que restringen el desplazamiento de la bomba.



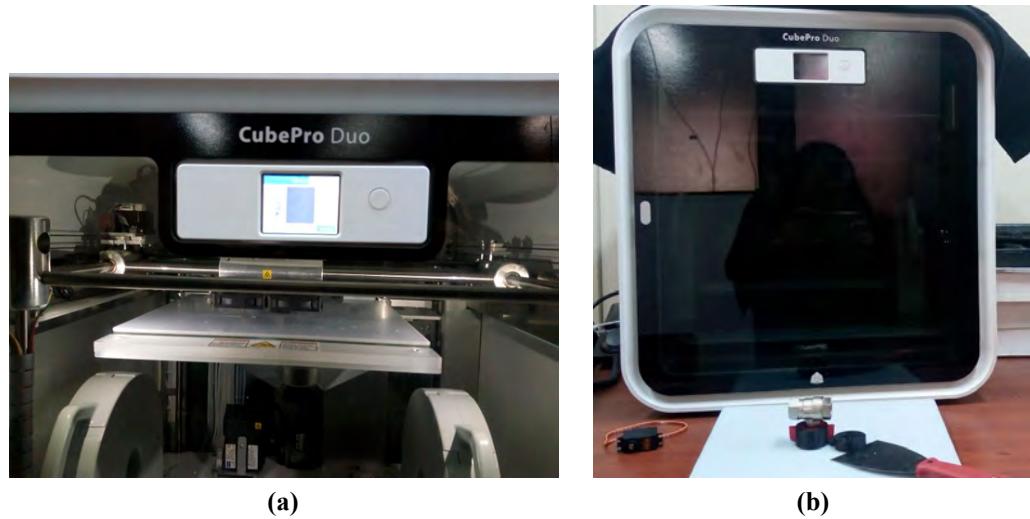
**Figura 3.55. Bomba empernada en el pavimento**

### **3.2.3. Fabricación de accesorios adicionales**

#### **3.2.3.1. Fabricación de la servoválvula y sus accesorios**

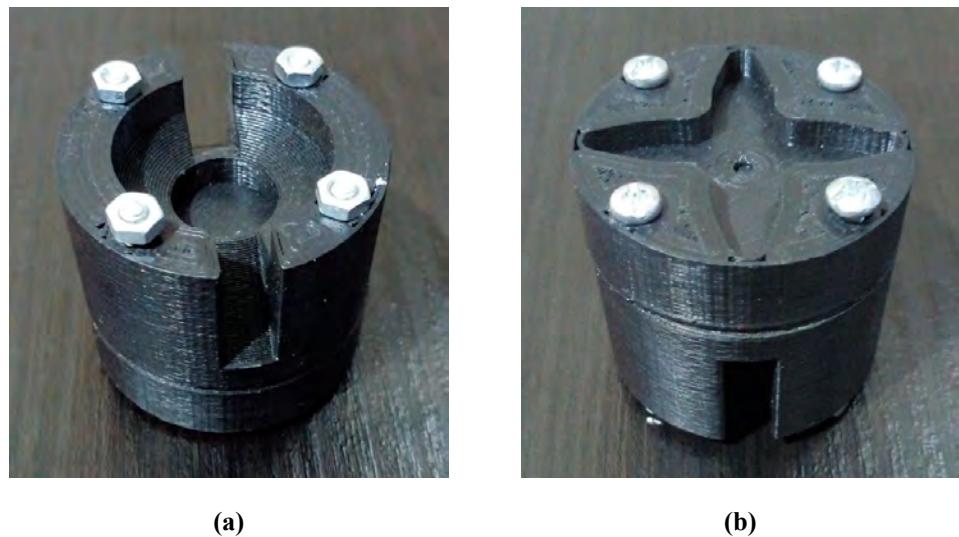
##### **3.2.3.1.1. Impresión 3D del acople servomotor-válvula**

En la sección 3.1.3.3. se realizó el diseño con el cual se procedió a imprimir con la impresora CubePro Duo, para esto se exportó el diseño en un archivo STL. En la figura 3.56., se muestra el proceso de impresión que duró aproximadamente 4 horas.



**Figura 3.56. Impresión del acople entre servo y válvula**

Después de que se realizó la impresión, se extrajo ambas piezas y se acoplaron con pernos pasantes de 4mm de diámetro. La figura 3.57., muestra el acople para el servomotor y la válvula de bola.



**Figura 3.57. Ensamble del acople entre servomotor y válvula**

### 3.2.3.1.2. Impresión 3D de la caja de acople servomotor-válvula

El diseño de esta caja fue el más complicado, aunque después de imprimir en material ABS, se puede hacer algunas modificaciones si hubiese error, como taladrar, limar las superficies o incluso hacer agujeros pasantes con calor. También en esta sección se consideró realizar un corte transversal simétrico de la caja para obtener dos partes las cuales se imprimieron bocarriba –ver figura 3.58.–. Para acoplar estas dos partes, se usaron cuatro pernos de 4mm que se atornillaron en los 4 agujeros de las esquinas de la caja.



**Figura 3.58. Impresión de las 2 piezas de la caja de la servoválvula**

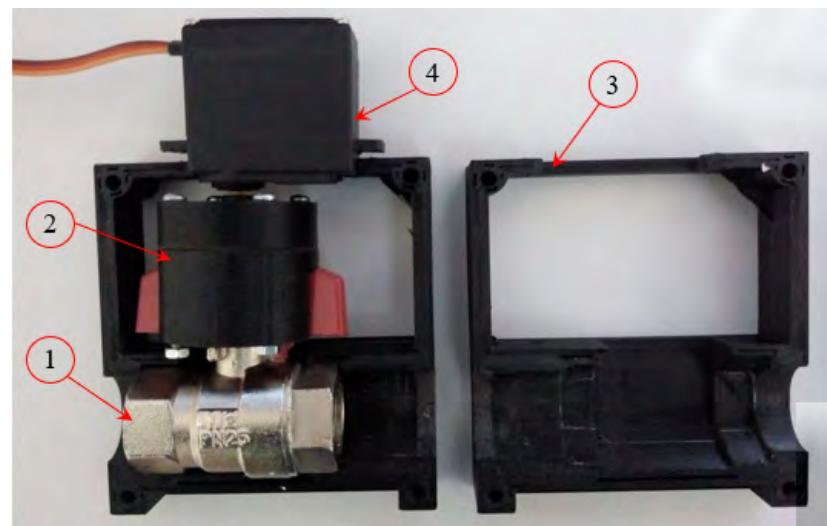
A continuación, la figura 3.59., muestra el resultado de las piezas tras haber sido extraídas, después de esperar 6 horas de impresión.



**Figura 3.59. Piezas que componen la caja de la servoválvula**

### 3.2.3.1.3. Ensamble de los accesorios de la servoválvula

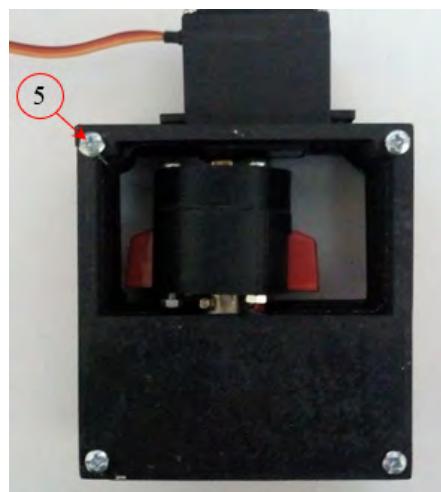
Para armar la servoválvula se debe encapsular al servomotor, la válvula de mariposa y el acople servomotor-válvula dentro de la caja de acople. El orden para ensamblar estos accesorios se describe con la siguiente figura.



**Figura 3.60. Ensamblaje de la servoválvula**

- 1. Se inserta la válvula de bola dentro de la primera mitad de la caja, haciendo coincidir la cavidad con la válvula.

- 2. Después se coloca el acople entre ejes en la manija mariposa haciendo coincidir su entrada respectiva según su forma geométrica.
- 3. Después se tapa la caja con la otra parte simétrica de la misma y se la atornilla con pernos de 4 mm de diámetro; se añade las tuercas pero no estarán muy ajustados hasta que se acople el siguiente componente. Después que se tiene la caja cerrada con el acople y la válvula dentro, se coloca por la parte superior el *horn* en la cavidad del acople
- 4. Al estar el *horn* dispuesto en la cavidad se puede colocar el servomotor en el agujero correspondiente de la caja ubicado en el techo de la misma, teniendo en cuenta que se debe orientar y hacer coincidir el eje del servomotor con la entrada del horn.
- 5. Por último se atornilla las dos mitades de la caja y se asegura con pernos el servomotor en la parte superior de la caja. Y se termina ajustando todas las tuercas tanto de la caja como del servomotor, el resultado –la servoválvula– se observa en la figura siguiente.



**Figura 3.61. Servoválvula ensamblada**

### 3.2.4. Ensamblaje de los accesorios adicionales

#### 3.2.4.1. Acople del sistema de tuberías

Como se mencionó anteriormente la salida de la bomba está hecha para ser acoplada con tubos de media pulgada. Entonces se instalaron los tubos con sus respectivos codos a 90 grados. La figura 3.62. muestra el recorrido de estas tuberías por debajo de los tanques de nivel. Es posible que posteriormente se añada un presurizador seguidamente después de la bomba, para asegurar que no se pierda presión cuando se abren las válvulas de bola. 3.62..



**Figura 3.62. Tubo transversal situado por debajo de los tanques**

La longitud de estas tuberías. llega hasta el extremo derecho de toda la estructura metálica y se dirige mediante un codo a 90° hacia el reservorio de la parte más alta. En la figura 3.63., se observa que se soldó una barra adicional para soportar el peso de la tubería.



**Figura 3.63. Barra transversal de soporte de la tubería**

Además se soldaron abrazaderas –3.64.– que sujetan a la tubería con las barras cuadrangulares de la estructura soporte, localizadas en la cara lateral derecha de la misma como se observo en el esbozo representado en 3.18..



**Figura 3.64. Abrazadera de la tubería longitudinal**

### 3.2.4.2. Acople de las cajas de poder

Para colocar las caja de poder general –panel de control– en la ubicación más adecuada, se aprovechó que esta contaban con orejas de sujeción –ver figura 3.65.–, por donde se la emperno a la estructura.



**Figura 3.65. Orejas de sujeción del panel de control**

Mientras que la caja eléctrica de la bomba, ya poseía agujeros en su propia estructura para poder ser empernada en las barras de acero de la estructura soporte, mostrado en la figura 3.66.



**Figura 3.66. Caja de control para la bomba de agua**

Para la caja de poder general que es la más grande, se soldó adicionalmente una barra cuadrangular de acero, como se observa en la figura 3.67., la cual sirve de base para soportar el peso de la caja, reduciendo así la carga que soportan los pernos en las orejas de sujeción.



**Figura 3.67. Barra transversal de soporte de la caja de poder general**

La figura 3.68., muestra el resultado del acople de las cajas en la estructura soporte.



**Figura 3.68. Cajas eléctricas ensambladas en la estructura**

### **3.2.4.3. Ensamble del soporte del sensor de nivel**

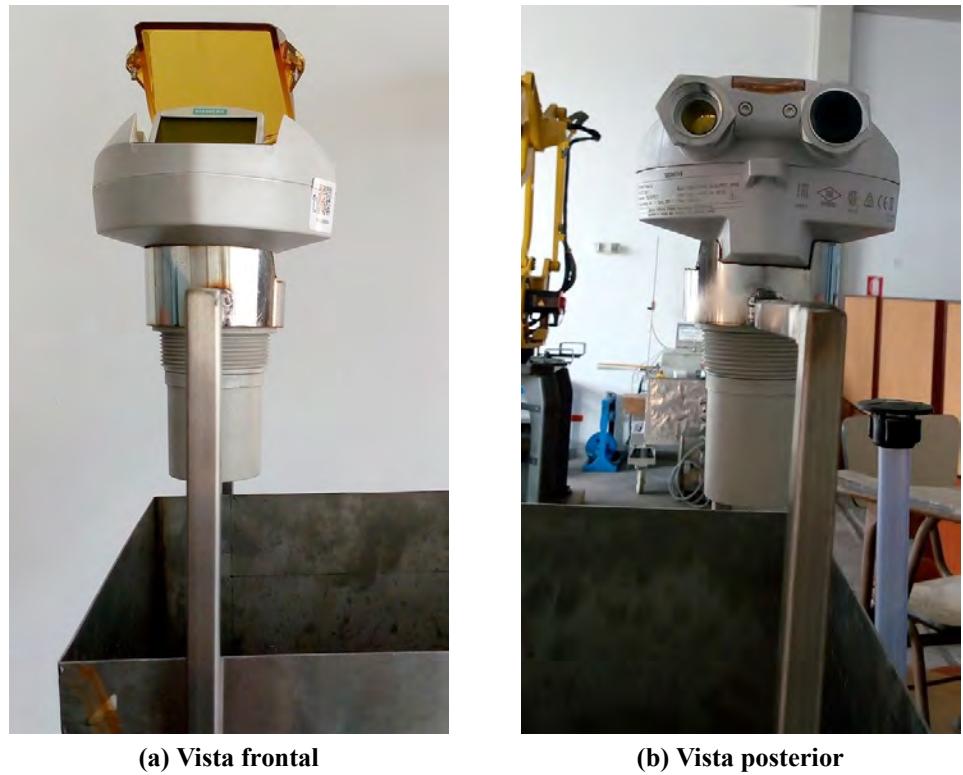
Según lo descrito en la figura 3.23. y de la ecuación 3.5, se ubicó cada sensor de nivel a una distancia de 9.1cm de la cara lateral izquierda del tanque. En la figura 3.69., las varillas de aluminio rectangulares del soporte del sensor de nivel fueron soldadas a la base de la superficie de la estructura soporte.



**Figura 3.69. Soporte del sensor de nivel soldado**

#### **3.2.4.4. Montaje del sensor de nivel**

Se ubicaron los sensores de nivel en su estructura soporte previamente soldada a la estructura soporte de los tanque, orientando sus pantallas frente al usuario que los programará como se observa en la figura 3.70.



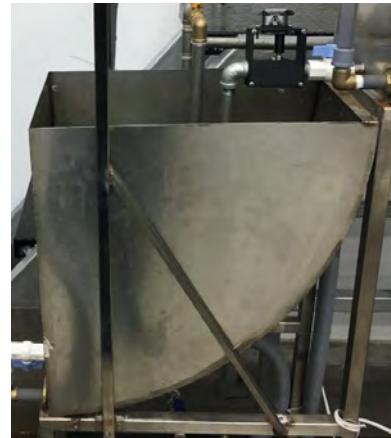
(a) Vista frontal

(b) Vista posterior

**Figura 3.70. Montaje del sensor de nivel**

### 3.2.4.5. Montaje de la servoválvula

La servoválvula se ubica en la salida de drenaje de cada tanque de nivel, además se usa un codo y una tubería que dirige el agua hacia el fondo del tanque con la finalidad de evitar salpicaduras que perturben la medición del nivel líquido.

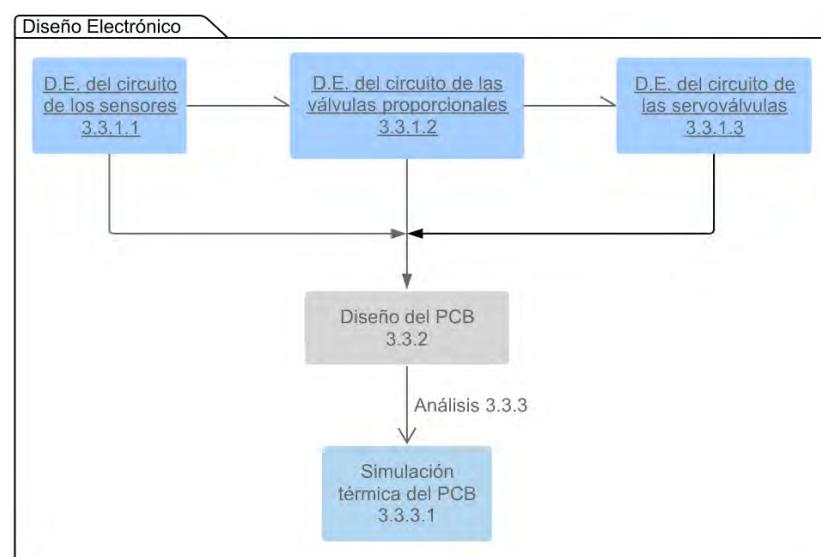


**Figura 3.71. Servoválvula instalada en el drenaje del tanque triangular**

### 3.3. DISEÑO ELECTRÓNICO

#### 3.3.1. Diseño de los circuitos electrónicos de los sensores y actuadores

El diseño del circuito electrónico tiene por propósito general, conectar a los sensores y actuadores con sus respectivos microcontroladores a través de un acondicionamiento de señales analógicas y digitales, este conjunto de pasos esta representado en el siguiente diagrama 3.72.

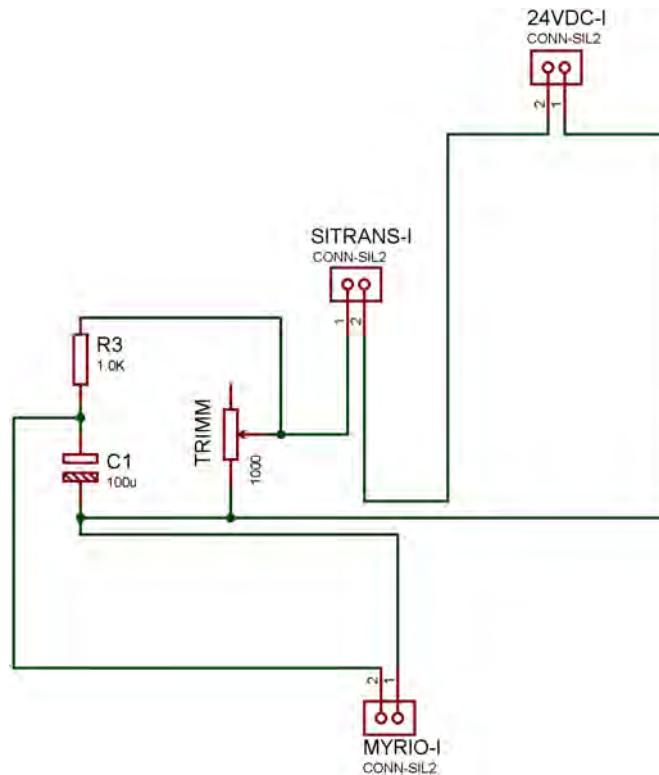


**Figura 3.72. Secuencia del Diseño Electrónico**

### 3.3.1.1. Circuito electrónico de los sensores

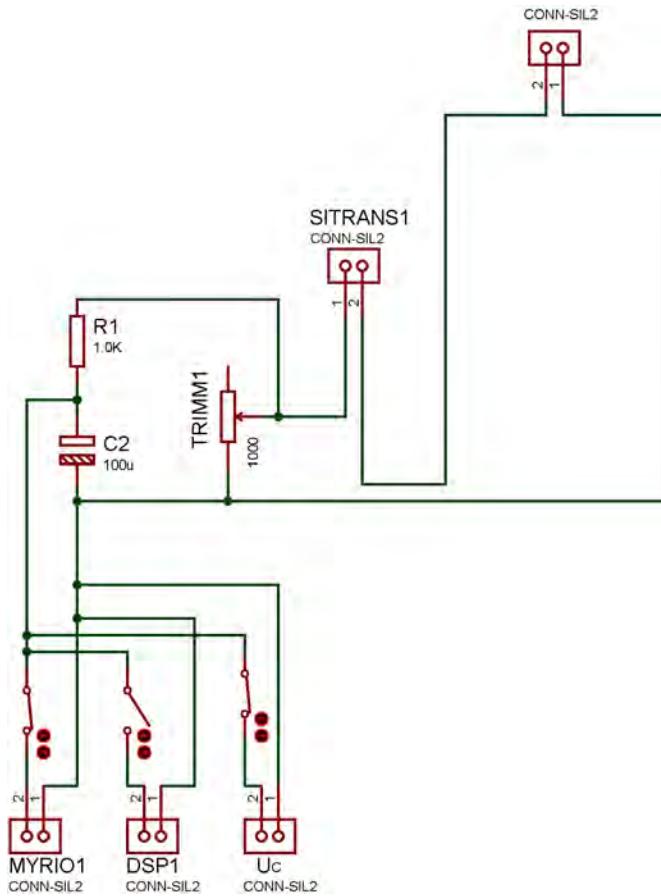
El manual del sensor de nivel sugiere que este dispositivo debe estar protegido por una resistencia equivalente no mayor a 500 ohmios. Por ese motivo se añade un potenciómetro de precisión, cuya finalidad será ajustar las medidas registradas según la calibración del sensor. Asimismo se puede ajustar el valor de esta resistencia cambiando el parámetro de distancia muerta y compensándolo con el voltaje. Además se agrega un condensador de 100 microfaradios, que está en serie con el resistor, para limpiar el ruido de la señal adquirida.

EL uso de este condensador es porque funciona como un filtro, que pasa las frecuencias de la señal que se desea y eliminando las que no. Se puedes elegir entre dos tipos básicos de filtros: pasa-bajo y pasa-alto. Un filtro pasa-bajo elimina el ruido por encima de la frecuencia de corte, mientras que un paso-alto elimina el ruido por debajo de su frecuencia de corte. Entonces una vez determinado el tipo de filtro, se determina la frecuencia de corte luego se calcula los valores de capacitancia y resistencia, y por ultimo se construye el filtro y se conecta al circuito. Para empezar con el diseño electrónico, se escogió la línea de 24VDC con la cual se alimenta al sensor de nivel, cómo se observa en el lado izquierdo del circuito de la figura 3.73.



**Figura 3.73. Circuito electrónico del sensor de nivel**

Esto implica que se necesitará una fuente DC de 24 voltios alimentada con un voltaje alterno de 220V. En la figura 3.74. se ha agregado interruptores en la entrada de cada microcontrolador para conmutar, según el uso que se haga de ellos, ya que un controlador funcionará uno a la vez. Así, los interruptores sirven para habilitar o deshabilitar la entrada de datos analógicos y digitales de los respectivos sistemas de control

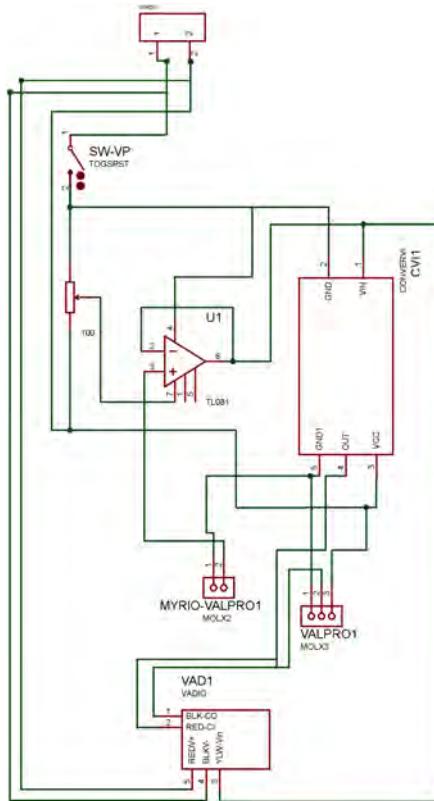


**Figura 3.74. Interruptores de activación para los microcontroladores**

### 3.3.1.2. Circuito electrónico de las válvulas proporcionales

Debido a que las válvulas proporcionales requieren de una corriente entre 4 y 20mA para su control, entonces es necesario convertir las señales analógicas de voltaje enviadas desde los controladores, hacia dichos actuadores. La conversión se realiza por un modulo convertidor de Voltaje a Corriente (CM1, ver figura 3.75.). Este módulo se protege mediante un Amplificador operacional (Opamp), que funge como seguidor de voltaje, para que cuando haya una sobrecarga de corriente en la entrada de alimentación del conversor, antes pase por el amplificador y este pueda sacrificarse en vez del conversor, así el voltaje de 5V siempre se mantiene regulado. A parte se le ha agregado un

multímetro digital que registradas los valores de voltaje de 0-5V enviados desde los Microcontroladores. y las corrientes entre 4-20mA que fueron convertidas, y las cuales servirán de señal de control para las válvulas proporcionales.

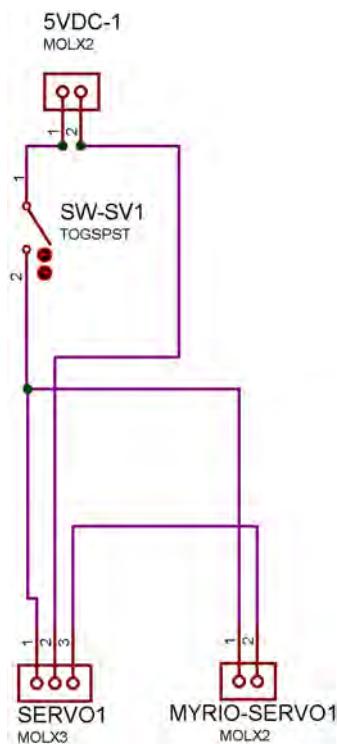


**Figura 3.75. Circuito electrónico de las válvulas proporcionales**

### 3.3.1.3. Circuito electrónico de las servoválvulas

En el diseño de este circuito solo se hizo una separación entre fuente de energía y señal de control. Los servomotores presentes en las servoválvulas requieren de una fuente externa para poder utilizar su torque máximo. Es decir, no se puede alimentar con el voltaje de los controladores ya que, a pesar de poder suministrar 7.4V, la corriente utilizada es demasiado alta, con un valor aproximado de 9A por servomotor. Entonces, las fuentes de voltaje que se ha previsto, necesariamente alimentarán a estos actuadores. Si se utiliza 3 o 4

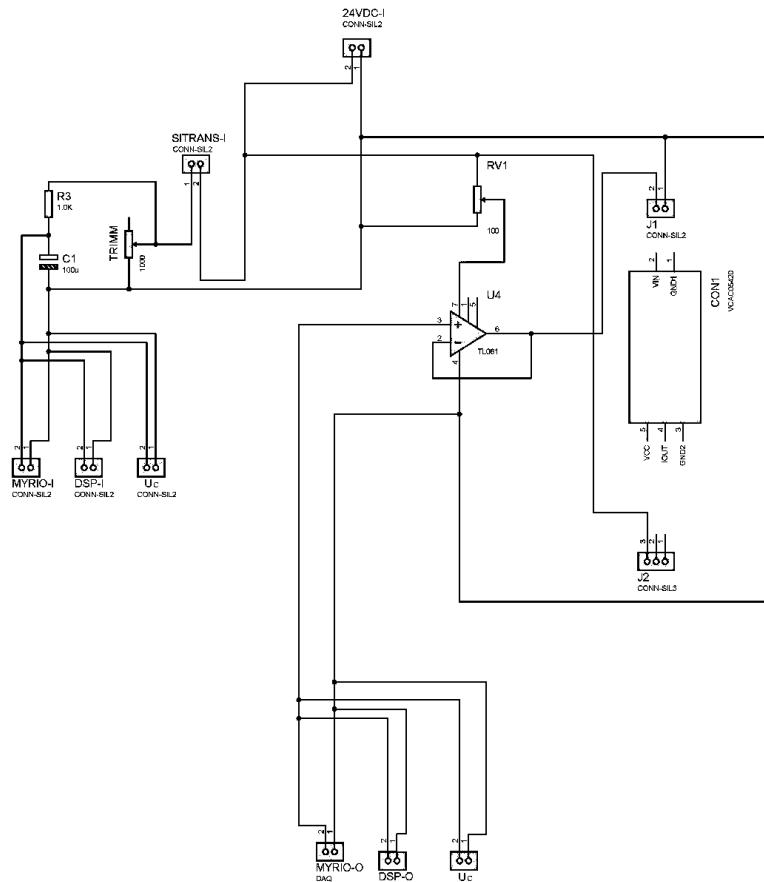
servomotores, entonces es necesaria una fuente de 36A. Por otro lado se tiene en cuenta que los controladores deben tener un punto de tierra en común con las fuentes de poder. Adicionalmente se agrega un interruptor en la entrada de las fuentes de energía, en el caso que se desea deshabilitar la funcionalidad de cada servoválvula.



**Figura 3.76. Circuito electrónico de las servoválvulas**

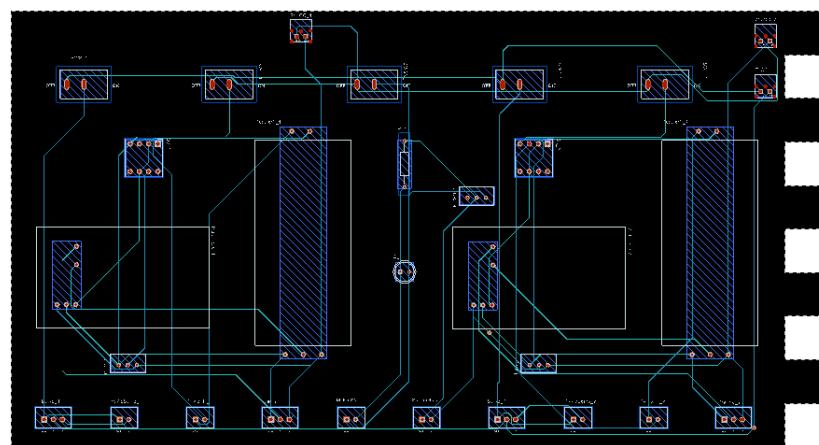
### 3.3.2. Diseño del PCB

Después se realizó el diseño del PCB que se imprimió posteriormente. Para realizar este diseño, se toma como referencia el diseño electrónico hecho en la sección previa. Además, se recurre a simplificar el diseño electrónico previo ya que se deben reemplazar ciertos elementos por borneras como se observa en la figura siguiente 3.77.

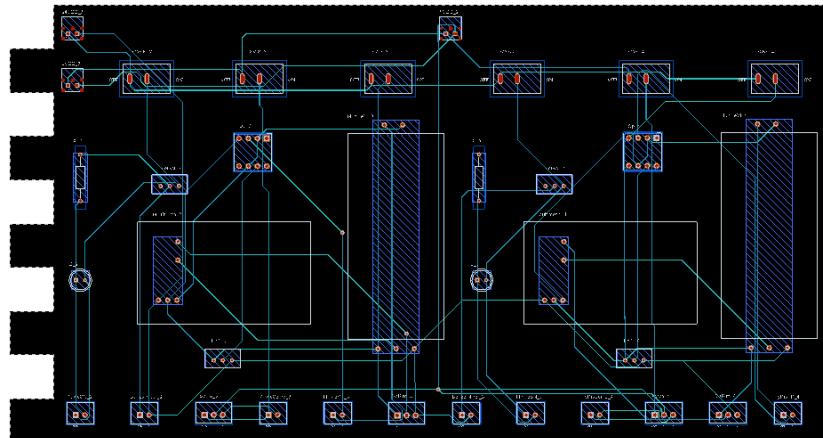


**Figura 3.77. Circuito esquemático del circuito para un tanque**

El siguiente paso es realizar las conexiones del PCB distribuyendo cada componente en el lugar más indicado como se observa en la figura ??

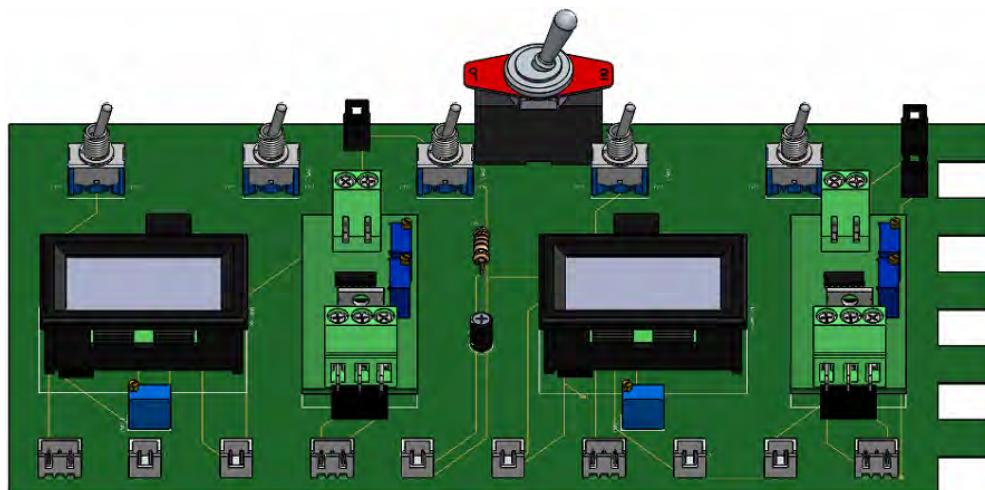


**Figura 3.78. Diseño del primer PCB**

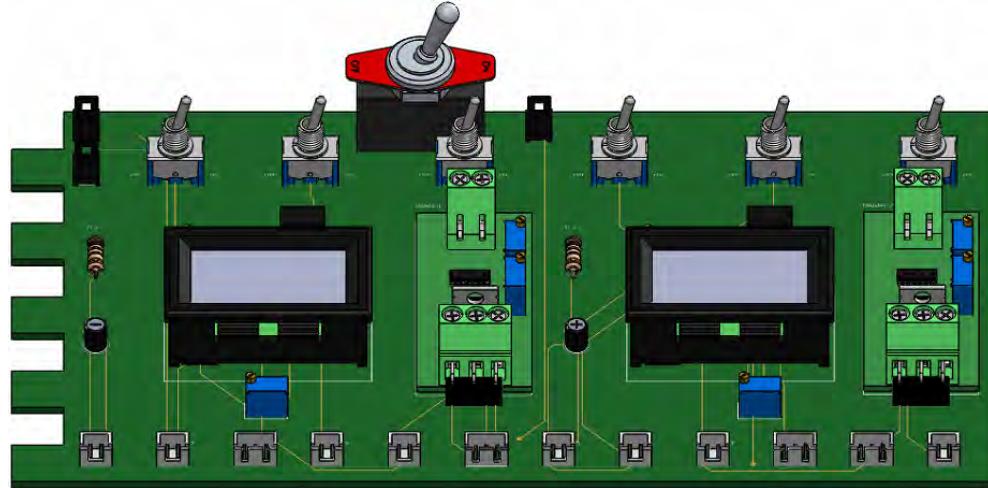


**Figura 3.79. Diseño del segundo PCB**

Una consideración que se debe hacer antes, es tener en cuenta que las fuentes de alimentación de voltaje parten desde el nivel superior hacia el nivel inferior; entonces, según esta condición, las borneras de entrada de voltaje se conectarán próximas a estas fuentes. Análogamente, como los microcontroladores están ubicados en la parte inferior, entonces, las cordilleras de entrada para estos dispositivos se ubicarán en la parte inferior de toda la placa de impresión. El resultado de cómo quedará la impresión de la placa electrónica se observa en la siguiente figura ??



**Figura 3.80. Primera tarjeta electrónica ensamblada**



**Figura 3.81. Segunda tarjeta electrónica ensamblada**

### 3.3.3. Análisis del diseño electrónico

#### 3.3.3.1. Simulación térmica de las tarjetas electrónicas PCB

En este apartado se discutirá el calor generado por los componentes electrónicos y su transferencia al entorno en las placas electrónicas, debido a que cada componente consume cierta corriente y voltaje, generando así una potencia que se traduce en calor transferido hacia el exterior. Según los tipos de materiales de manufactura para cada componente, se configura el programa de simulación térmica. Así, en este análisis solo se considera los amplificadores operacionales, las resistencias, los *trimmer* y el integrado del modulo conversor de voltaje a corriente, los cuales son los elementos que en suma consumen mayor cantidad de energía.

Para realizar la simulación se debe asignar el tipo de material de cada elemento qué constituye la placa electrónica. Generalmente los circuitos integrados están cubiertos por un encapsulado de plástico, en cuyo interior se hayan elementos

semiconductores como el silicio. También el encapsulado puede ser de material cerámico, este último material es muy usado tanto en los condensadores y en las resistencias. En cuanto a los potenciómetros, tienen una cubierta de plástico al igual que los circuitos integrados. En el caso de las placas electrónicas, el material exterior comúnmente es de fibra de vidrio, lugar por donde se propagaría el calor, a zonas de las rutas electrónicas –*paths*– de cobre dentro de las placas. La siguiente figura muestra un ejemplo de la configuración del tipo de material para los circuitos integrados opamp TL084, cuyas propiedades físicas de conductividad térmica se extrajeron de su respectivo *datasheet*.

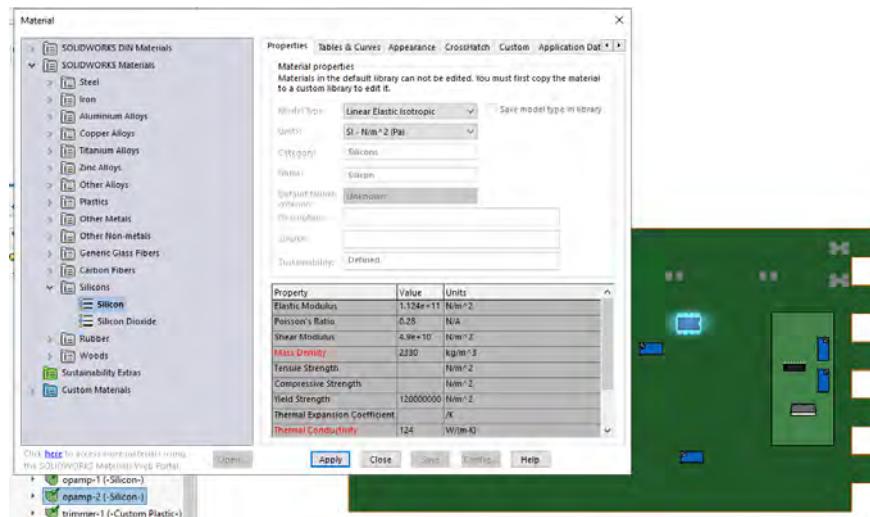


Figura 3.82. Configuración de los materiales de cada componente electrónico

Se podría detallar más ciertos parámetros físicos dependientes de la temperatura y anexar las gráficas en la configuración de las propiedades de cada material en el programa, ya que se pueden agregar gráficas de propiedades físicas de los materiales con que están fabricados cada componente electrónico, dentro del software de simulación. Sin embargo, por ahora sólo se persigue mostrar las temperaturas a las cuales llegan cada elemento trabajando a pleno voltaje y

corriente. Después de haber configurado el tipo de material para cada elemento, se procede a asignar la potencia consumida por estos, teniendo en cuenta que este parámetro se calcula con el voltaje de entrada y la corriente consumida por cada elemento. Los amplificadores operacionales –opamp– que se regulan a 15 voltios consumen un máximo de 2.8mA según su *datasheet*; en el caso del módulo conversor de voltaje a corriente, funciona a 24V con un máximo de 25mA. Para el *trimmer*, la entrada generalmente es de 24 voltios, con una corriente de máxima de 20mA, operando como reductor de voltaje. Los condensadores de 10uF, consumen un máximo de 24V. Los siguientes cálculos resumen la potencia consumida por los elementos involucrados en la transferencia de calor.

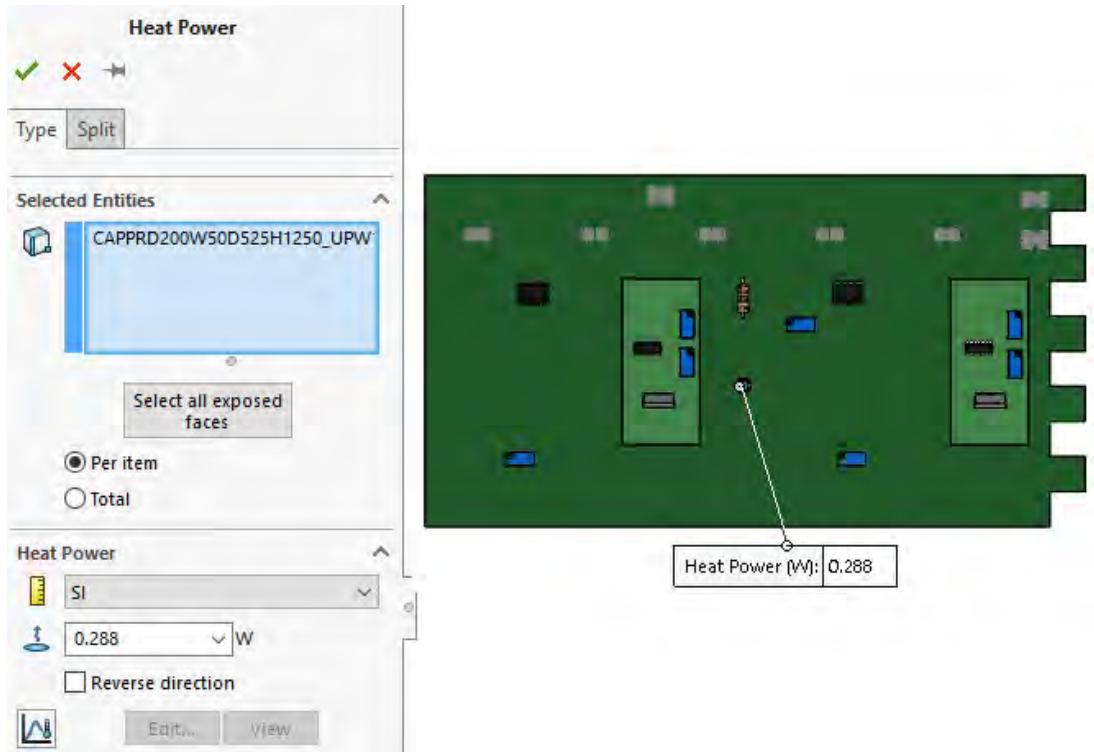
$$P_{opamp} = 15V \cdot 2.8mA = 0.042W$$

$$P_{Trimmer} = 24V \cdot 24mA = 0.576W$$

$$P_{Modulo} = 24V \cdot 25mA = 0.6W$$

$$P_{Condensador} = \frac{1}{2} \cdot (24V)^2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0.288W$$

Pero el caso de los *trimmer* que consumen 24 voltios, se asigna una potencia que se distribuye equitativamente en cada uno, al tener el mismo volumen y pertenecer a un circuito análogo (por ejemplo en cada circuito de las válvulas proporcionales). La figura 3.83., ejemplifica cómo se asignar las potencias a cada elemento de la placa electrónica.



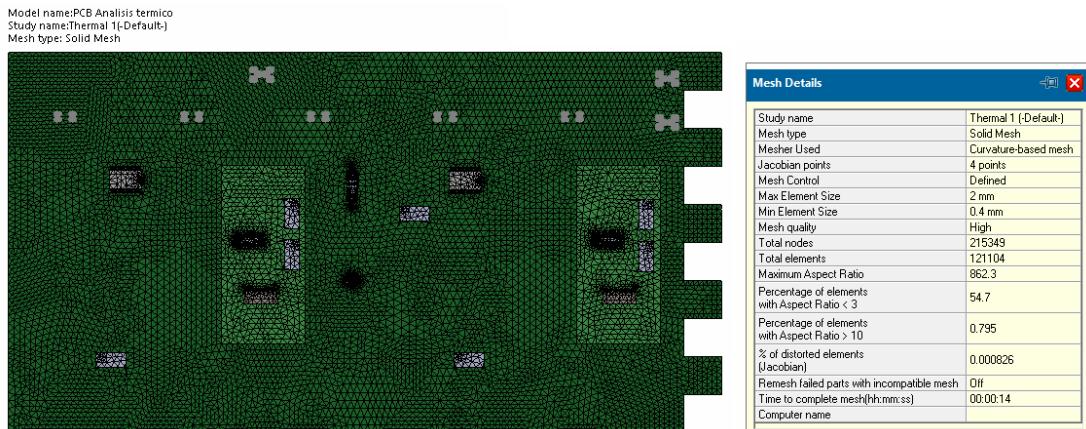
**Figura 3.83. Configuración de la potencia consumida de cada componente electrónico**

Posteriormente se establece el parámetro de convección requerido para que la transferencia de calor se ejecute de cuerpo a cuerpo según las áreas de contacto entre cada elemento como se observa en la figura 3.84., además se establece una temperatura ambiental de 293K.



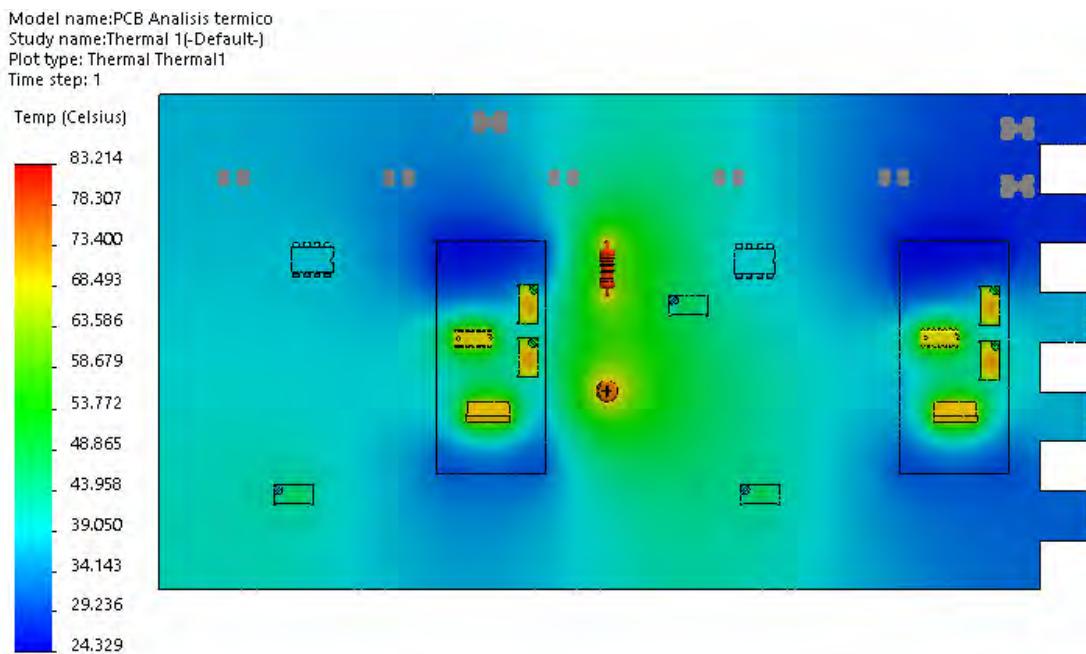
**Figura 3.84. Configuración del coeficiente de convección: 25W/m<sup>2</sup>.K**

El último paso es el mallado, donde al igual que en las otras simulaciones, se establece el número de elementos finitos en que se divide cada componente para su posterior simulación en base al cálculo infinitesimal de cada subunidad, que ahora dependen de sus respectivas potencias y propiedades de conductividad térmica. Cabe señalar que en este paso es necesario realizar una configuración mecánica adicional, dónde se llena los vacíos dejados en la placa electrónica. Por ejemplo, las perforaciones de cada componente donde se ha acoplado. Es decir, sólo existe un contacto superficial entre cada componente, incluso puede existir la perforación en la placa, por las patas de los integrados u otros elementos, pero estos no deben dejar espacios vacíos, ya que esto es una condición para que el mallado se ejecute satisfactoriamente en el programa de simulación. Es preferible realizar este último proceso con un alto grado de finura en los elementos, como se observa en la figura a continuación.



**Figura 3.85. Mallado fino para la simulación térmica, con elementos de 0.4-2mm**

El resultado de la simulación térmica muestra en un espectro de colores, las temperaturas alcanzadas tras el término de la simulación del programa. Estas temperaturas sirven para confirmar que cada elemento se encuentra dentro del rango de temperatura de funcionamiento al operar la placa electrónica a plena carga de voltaje y no se sobrecalienten.



**Figura 3.86. Temperaturas alcanzadas por los componentes electrónicos**

### 3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ELECTRÓNICO

#### 3.4.1. Impresión de las tarjetas electrónicas

El material comúnmente utilizado para fabricar tarjetas electrónicas es baquelita y fibra de vidrio, pero antes se añade cobre a todos los caminos eléctricos. Después de enviar el diseño a que sea impreso, se compraron todos los componentes electrónicos que serán requeridos.

#### 3.4.2. Soldado de componentes en las tarjetas electrónicas

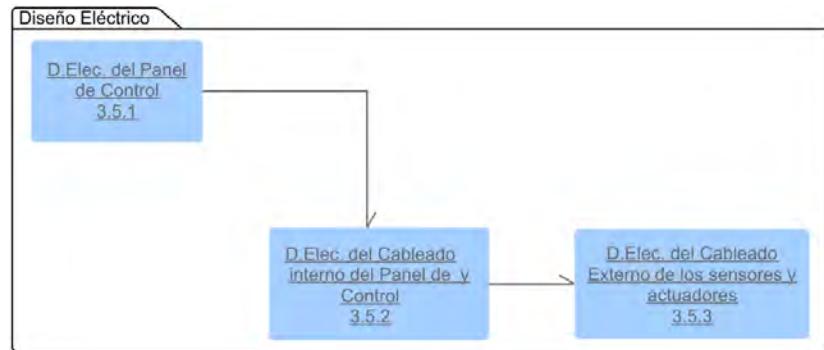
Para tener la posibilidad de intercambiar los amplificadores operaciones, módulos conversores de voltaje y multímetros digitales, se hizo uso de espaldines hembra y enchufes hembra de 8 pines. Estos últimos componentes sí van soldados a las placas PCB, mas no los dispositivos intercambiables, los cuales pueden ser susceptibles a quemarse, razón por la cual se añade los enchufes mencionados. En la figura 3.87., se muestra el resultado tras la soldadura de cada componente.



Figura 3.87. Tarjeta electrónica PCB impresa

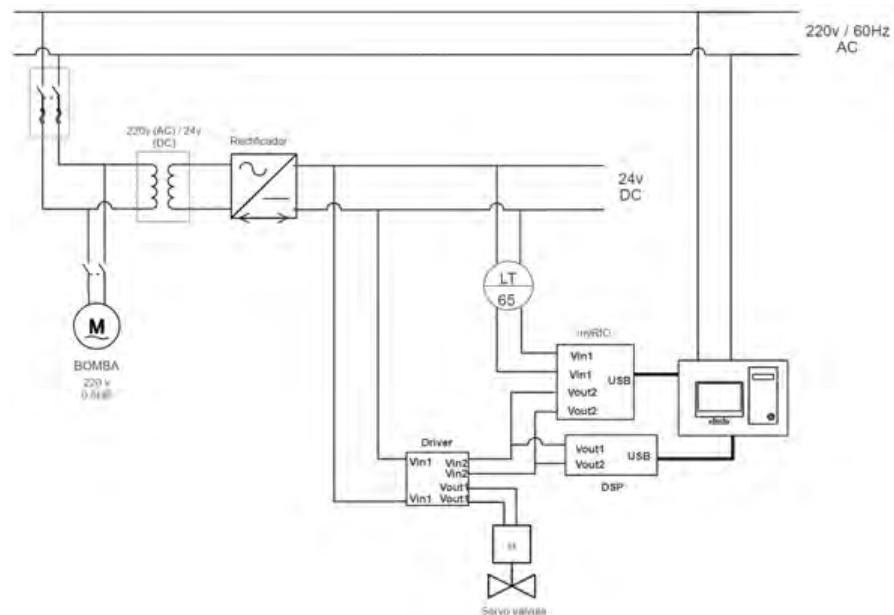
### 3.5. DISEÑO ELÉCTRICO

El diagrama 3.88., describe el proceso general para el desarrollo del diseño eléctrico.



**Figura 3.88. Secuencia del Diseño Eléctrico**

Con la finalidad de observar la conexión general de dispositivos que conforman el módulo de control de nivel, se ha elaborado un esbozo general en el programa EDRAW.



**Figura 3.89. Circuito eléctrico general**

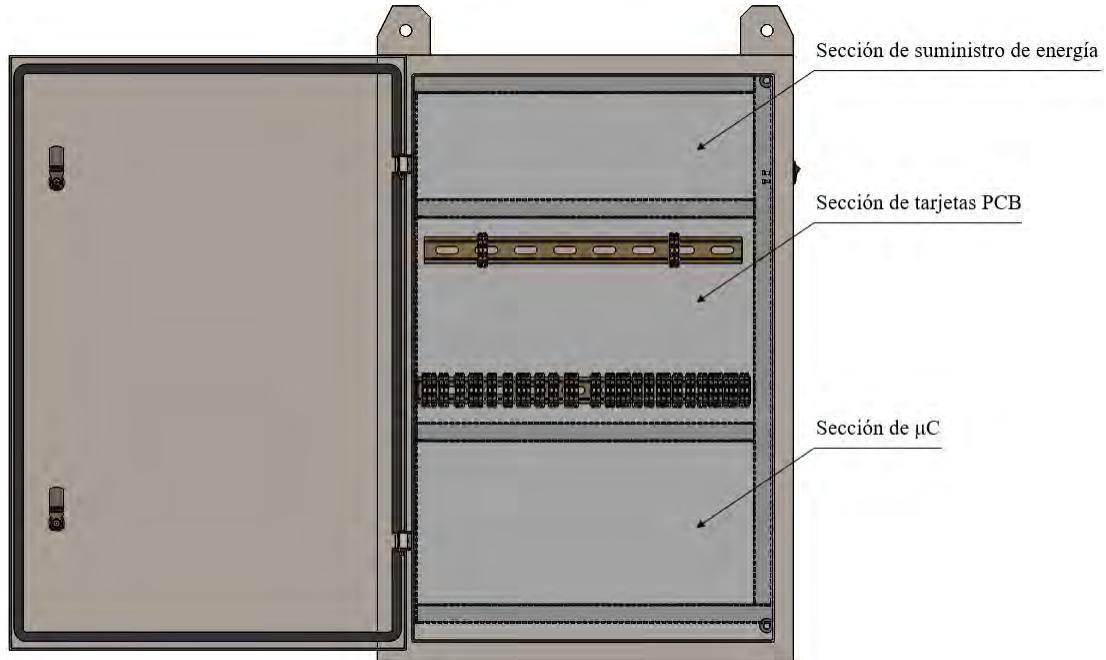
Este diagrama considera a los actuadores y sensores para el control y medición

de nivel de líquido respectivamente. También se dispone de una bomba qué suministra agua al reservorio superior. Por último se tienen los sistemas de adquisición y procesamiento de datos como son el MyRio, el DSP TM05820 y el Raspberry Pi, los cuales son alimentados por una una línea de voltaje DC. La servoválvula de igual manera, se alimenta con un voltaje DC de 7.4V. También se considera otra línea de voltaje DC de 24 voltios que solo alimenta a los sensores de nivel.

En cambio la bomba de agua requiere de 220 voltios alterno desde la fuente de poder, esta bomba debe estar protegida por un interruptor termo-magnético y un contactor.

### **3.5.1. Diseño del panel de control**

El control y monitoreo para la operación del sistema de nivel de tanques se encuentra localizado en la caja eléctrica. Dicha caja esta subdividida en tres secciones comprendidas por: una sección de suministro de voltaje para la alimentación de los sensores y actuadores, una sección para las tarjetas de circuitos electrónicos impresos –PCB– del acondicionamiento de señales de entrada y salida y por último, una sección para los microcontroladores.



**Figura 3.90. División del panel de control**

Teniendo en cuenta la funcionalidad de cada sección, se dispuso cada dispositivo dentro del panel de control. La lista siguiente etiqueta cada elemento según la designación de los planos eléctricos incluidos en los anexos.

- (G1) Fuente de alimentación de 24V (1)
- (G2) Fuente de alimentación de 5V (2)
- (F1) Fusible de voltaje (3)
- (Q1) Switch DPST ON-OFF(4)
- (C1) Canaletas (5)
- (R1) Rieles (6)
- (X1-X2) Borneras para voltaje (7)
- (X4-X15) Borneras para conectores (8)
- (E2-E3) 2 PCB de acondicionamiento (9)
- (E4) 1 FPGA MyRIO (10)

- (E5) 1 procesador DSP Delfino (11)
- (E7) 1 PCB de interfase (12)
- (E8) 1 Sistema embebido Raspberry PI 3 (13)
- (E1) Conector PLUG AC 220 VAC (14)
- (CC1) Cables y conectores molex para el PCB (15)
- (CT1) Cables y terminales tipo pin para voltaje (16)
- (RI1) Cables JST para los microcontroladores (17)
- (Hr1) Arnés de cables de los sensores y actuadores (18)

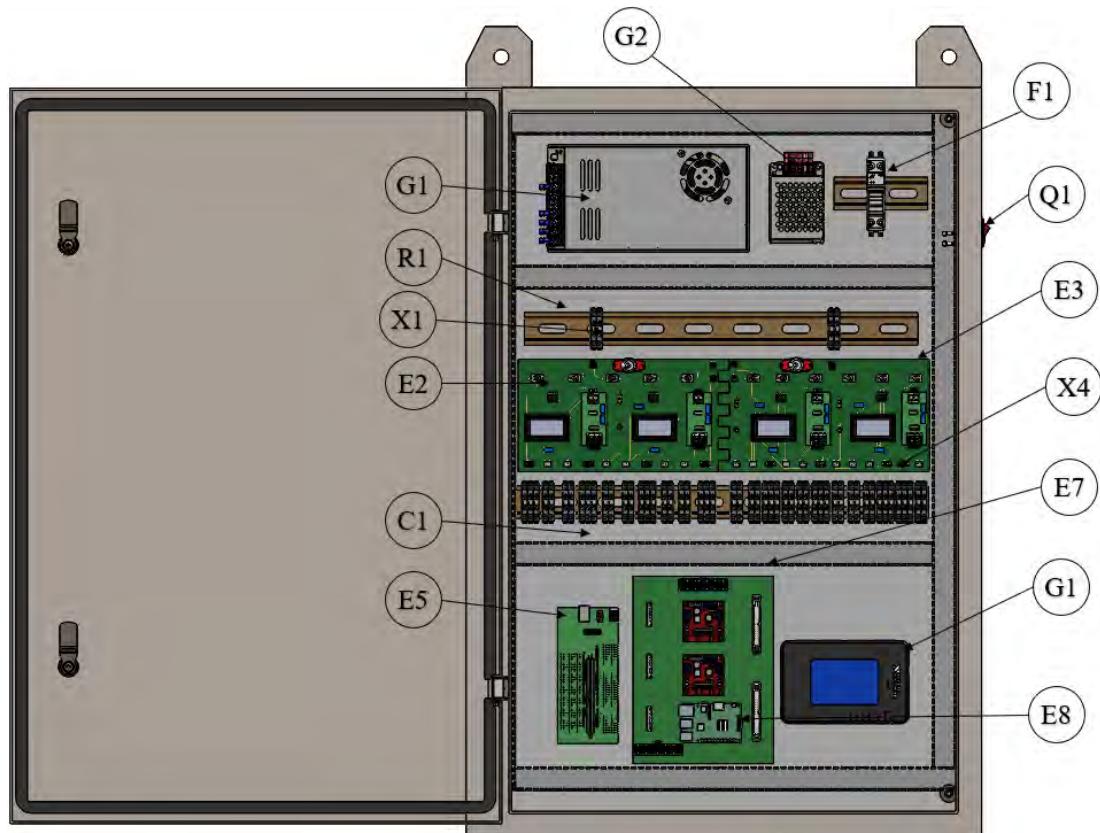


Figura 3.91. Diseño del Panel de control

### 3.5.1.1. Secciones del panel del control

La primera parte denominada Sección de suministro de energía para la alimentación de los sensores y actuadores, comprende una fuente de alimentación de 24V a 15A (G1) conectada a través de cables de 18AWG con terminales tipo redondo, una fuente de 5V a 9A conectada a través de cables de 18AWG con terminales tipo horquilla y un fusible a 32A, conectado por terminales tipo pin y cables de 18AWG.

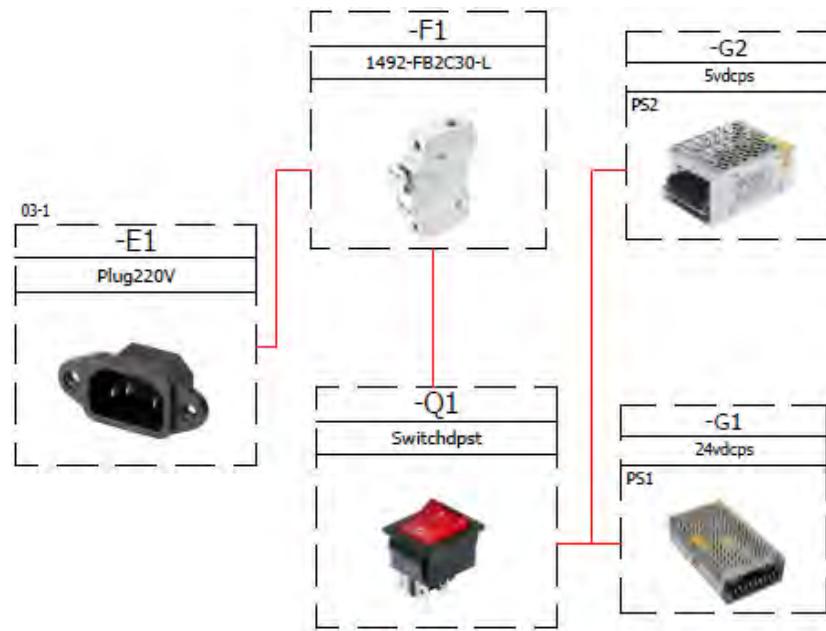
En la segunda parte denominada Sección de las tarjetas de circuitos electrónicos impresos (PCB) para el acondicionamiento de señales de entrada y salida están presentes: 2 rieles (R1), 4 borneras de voltaje (X1-X2) y 51 borneras para conectores (X4-X15), estos accesorios serán conectados a 2 placas PCB (X4-X15) mediante cables y conectores para PCB (CC1) y cables con terminales para voltaje (CT1) de 23AWG.

En la tercera parte denominada Sección de microcontroladores ( $\mu C$ ) están presentes tres microcontroladores: un FPGA, MyRio (E5), un Procesador DSP Delfino (E5) y un sistema embebido (E8) (Raspberry Pi); además está presente la placa PCB de interfase (E7) y dichos controladores se conectan por cables flat (RI1).

Externamente el panel de control posee un switch DPST de encendido y apagado (Q1) de todo el módulo y un conector *plug* de voltaje alterno de 220V (E1), ambos accesorios conectados con cables de 18AWG y terminales tipo plano.

### 3.5.1.2. Funcionamiento del panel de control

El voltaje de 220 voltios alterno que llega hacia el panel de control para alimentar a las fuentes de voltaje (1 y 2), se hace a través de un conector plug de 220VAC (E1) que atraviesa un fusible de 32A (F1), para prevenir un posible cortocircuito debido a una sobrecarga del sistema, como se muestra en la figura 3.92.. Entre este fusible y las fuentes de alimentación, se encuentra un interruptor de encendido y apagado DPST (Q1), el cual habilita o deshabilita el suministro de voltaje al sistema. El cableado dentro de la caja, para el suministro de voltaje, se realiza en las inmediaciones de las canaletas (C1).

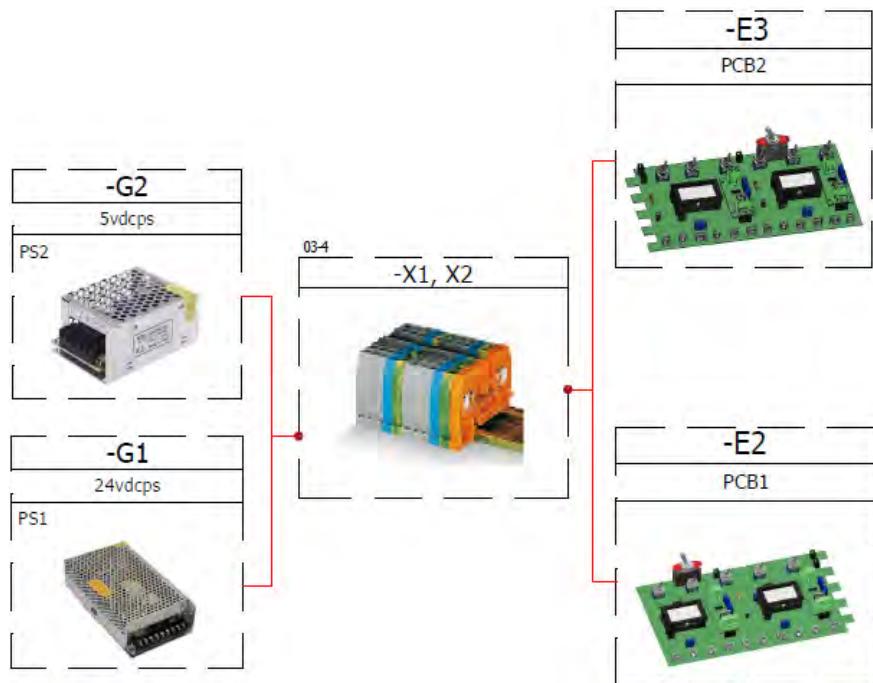


**Figura 3.92. Función de la sección de alimentación**

Fuente: Diseño eléctrico, Anexos pág. 22

En la sección de alimentación y voltaje, La fuente de 24 voltios DC (G1), desempeña la función de suministrar energía a los sensores de nivel de la marca Siemens, Sitrans Probe LU y a las válvulas solenoides proporcionales de la

marca Danfoss (con solenoide de serie BL024D), también se dispone de una fuente de 7.4 voltios DC que alimenta a los servomotores presentes en las servoválvulas, de la marca SavöX. Las placas PCB (E2-E3) de acondicionamiento de señales –ver figura 3.93.–, son alimentadas con 24V en la placa de la izquierda, y 5 voltios en la placa de la derech, a través de cables con terminales (CT1), provenientes de las borneras de voltaje (X1-X2) que reciben estos voltajes desde los suministros de energía.

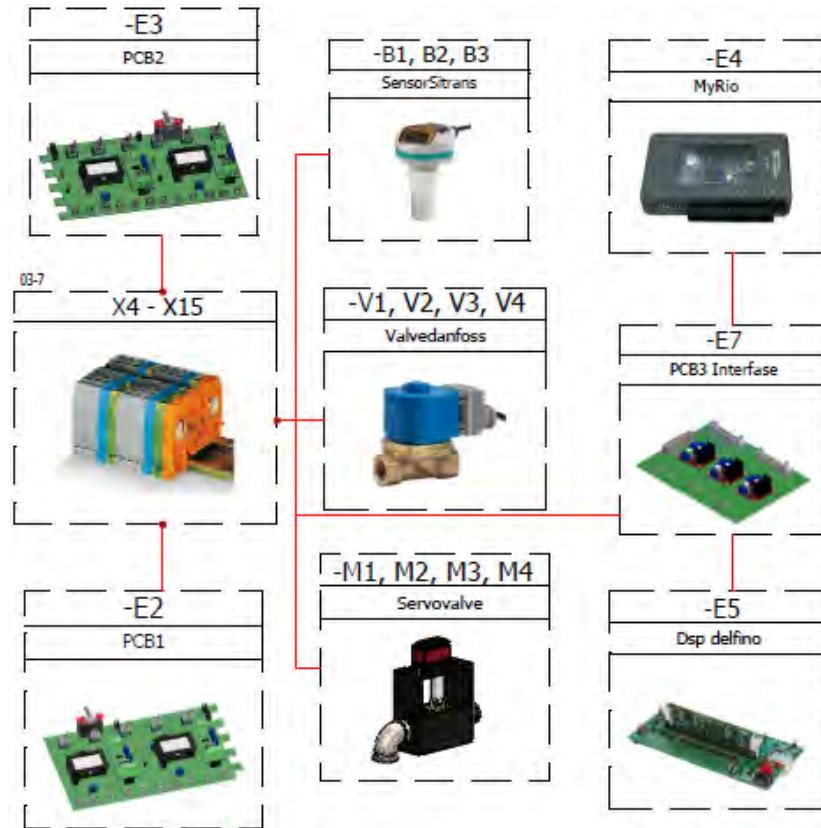


**Figura 3.93. Función de la sección de las tarjetas PCB**

Fuente: Diseño eléctrico, Anexos pág. 22

A estas mismas placas llegan las señales de los sensores y actuadores por medio de cables y conectores molex (CC1). Los cables y conectores mólex restantes (CC1) que salen desde la placa PCB sirven para el envío de las señales de cada sensor y actuador hacia los microcontroladores. Así las tarjetas PCB (E2-E3) sirven para recibir las señales de entrada de los sensores de nivel y ejecutar el

filtro de dichas señales para enviar una señal limpia por medio de los conectores adicionales (CC1) hacia los microcontroladores. Los PCB (E2-E3), a su vez reciben las señales de los microcontroladores, ya sea voltaje en el caso de los servomotores, o corriente en el caso de las válvulas solenoides proporcionales. En el caso del servomotores presentes en las servoválvulas, reciben una señal tipo PWM proveniente de los microcontroladores hacia las tarjetas PCB (E2-E3), que después serán enviadas hacia dichos actuadores. Sin embargo, las válvulas proporcionales funcionan con señales de control de corriente de 4-20mA y los microcontroladores usados no proporcionan ese rango de amperaje. Por lo tanto fue necesario acoplar conversores de voltaje a corriente, que estén incluidos dentro de los PCB (E2-E3), con un circuito de protección de corriente. Así, se envía desde los microcontroladores, voltajes entre 0 y 5 voltios, convertidos después a corrientes de 4-20mA para su control. En la figura 3.94., se muestra la interacción de estas tarjetas electronicas con los demás accesorios.



**Figura 3.94. Función de la sección de los microcontroladores**

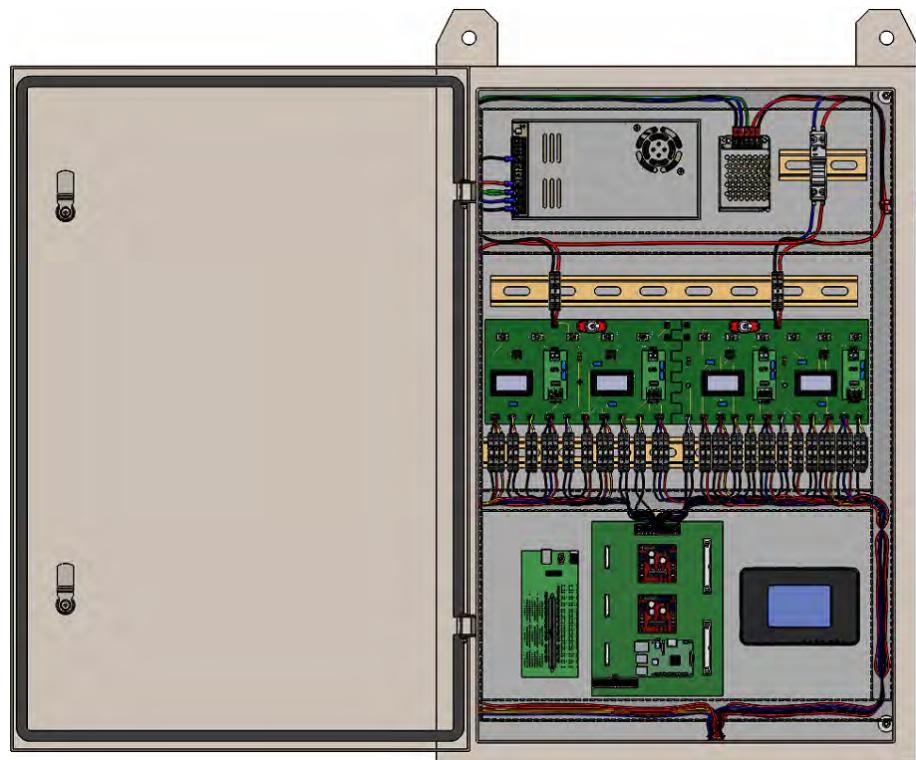
Fuente: Diseño eléctrico, Anexos pág. 22

Los microcontroladores se encargan de la conversión analógica a digital de las señales provenientes de los sensores de nivel, válvulas solenoides y servomotores a fin de mostrar sus mediciones en un tiempo de muestreo determinado en sus respectivas plataformas y lenguajes de programación. La configuración de los microcontroladores se realiza según las señales de entrada o salida en voltaje, de acuerdo al dispositivo que esté conectado. Debido a que existen múltiples señales de entradas y salidas, se hace uso de una placa PCB de interfaz (E7) que conglomerá todas las entradas y salidas en un conector de 24 pines, presente en dicha placa. Este conector subdivide las señales para cada tipo de microcontrolador que se utiliza en la implementación del control, cuya

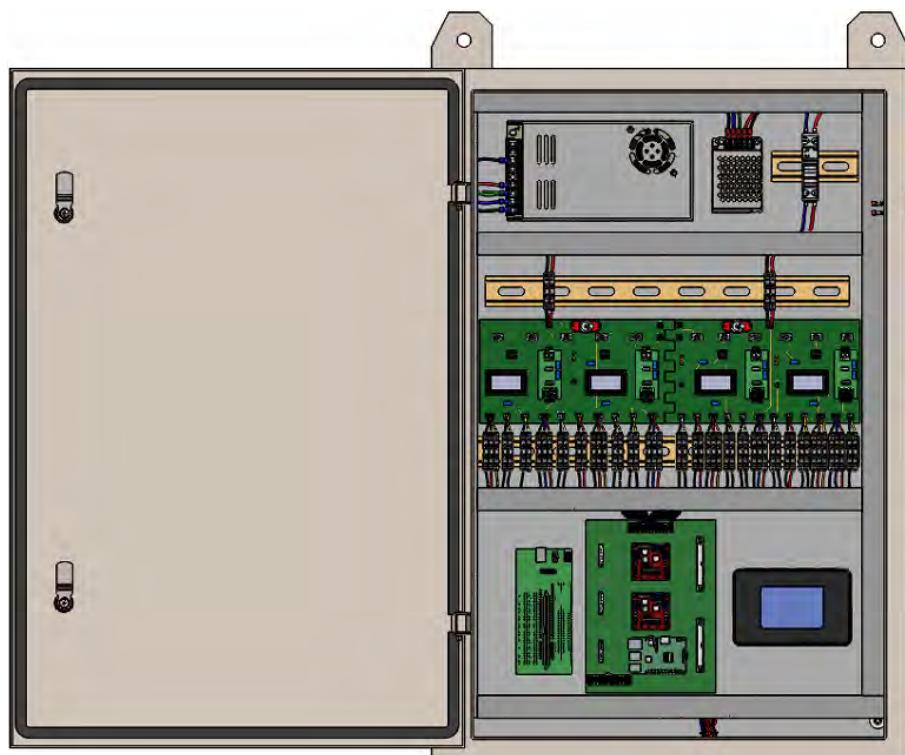
realización debe ser uno a la vez; es decir o bien se utiliza el microcontrolador MyRIO (E4) o en su defecto el DSP Delfino (E5). Estos microcontroladores tienen la capacidad de conectarse a un computador a través de conexión USB; sin embargo, el microcontrolador MyRIO (E4) posee una tarjeta de red inalámbrica que hace posible conectarse a un *router*. Así, cualquier computador conectado a la misma red puede acceder a programar dicho microcontrolador, también puede crear su propia red inalámbrica, esto para no depender de un router externo y que cualquier computadora pueda conectarse a su red local. Esta última característica posibilita que todas las medidas de los sensores y actuadores puede administrarse a través de un usuario remoto, e incluso el MyRio estando conectado a internet puede subir sus datos a Google Cloud.

### **3.5.2. Diseño del cableado interno en el panel de control**

A través de las canaletas, se conecta la toma eléctrica, el fusible y el botón de encendido. A la salida del botón de encendido se conecta las fuentes DC con cables del mismo calibre. Luego desde cada fuente se envía voltaje hacia las placas PCB por medio de las borneras. En la figura 3.3 se visualiza, este ultimo procedimiento, agregando conector a la salida los PCB que se conectan a las borneras y después una placa PCB de interfase, desde donde se distribuye las señales a todos los controladores presentes, ver figura 3.96.



(a)

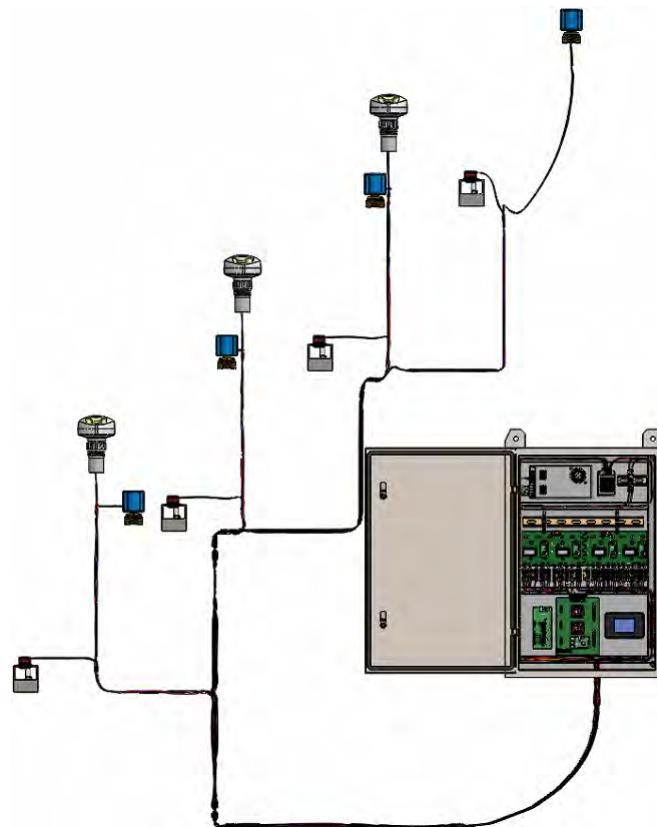


(b)

**Figura 3.95. Cableado interno del panel de control**

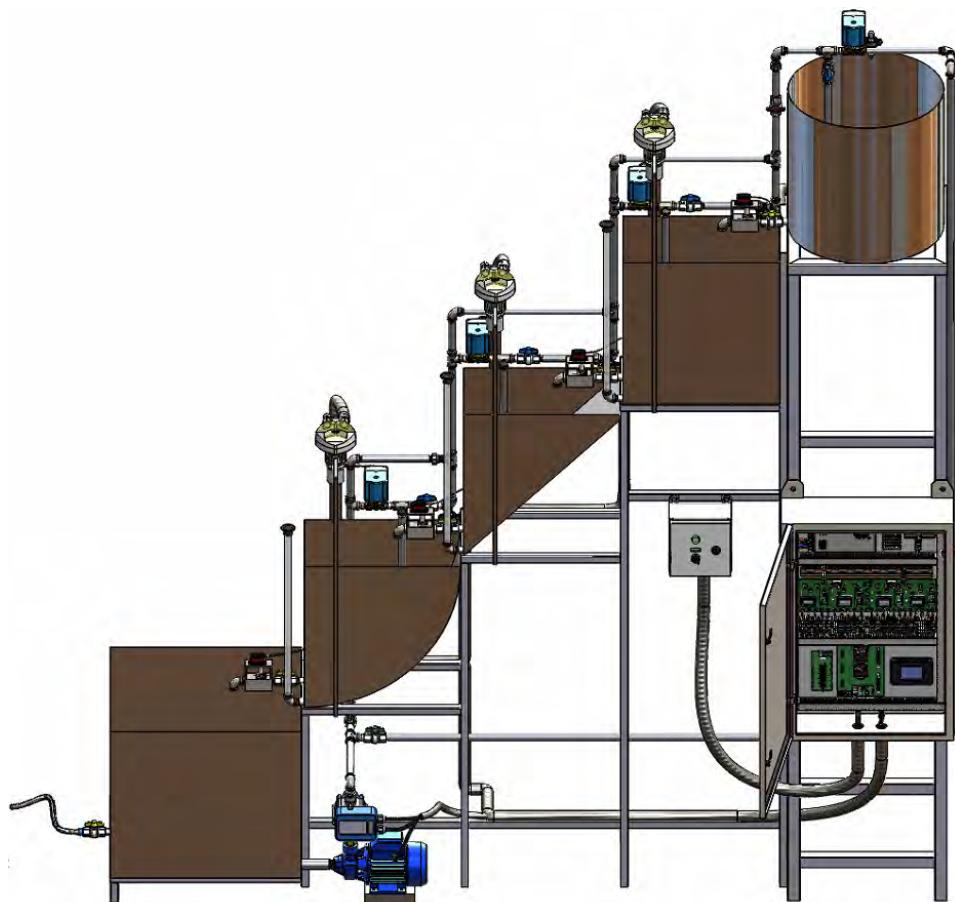
### 3.5.3. Diseño del cableado externo de los sensores y actuadores

Tras haber obtenido el resultado de la implementación mecánica y tener montado tanto los sensores y actuadores en sus respectivos lugares en torno a la estructura, se pudo conectar cada dispositivo hacia la caja de control. Tipo de cambio utilizado tanto para los sensores y actuadores fue con cables de un calibre de 22AWG, haciendo pasar cada cable por mangueras corrugadas, las cuales convergerán en una manguera corrugada única que se dirigirá directo al panel de control. La figura 2.3 muestra la localización de los sensores y actuadores con respecto al panel de control, los cuales han sido conectados directo a las tarjetas PCB (E2-E3) para su respectivo acondicionamiento de señales.



**Figura 3.96. Cableado externo del panel de control**

El cable corrugado utilizado fue de 1”, y cumple con las normas UNE 133100 para la protección y aislamiento de cables de señales en telecomunicaciones, ya que son señales analógicas y digitales las que se están enviando y recibiendo desde los controladores; más aún, considerando que en el ambiente que rodea al modulo, se encuentran grandes cantidades de agua potable con alta capacidad de conducción eléctrica. En la figura 3.97., se muestra el resultado global del diseño mecatrónico.



**Figura 3.97. Resultado del diseño del Módulo de control**

### **3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO ELÉCTRICO**

#### **3.6.1. Implementación del panel de control**

##### **3.6.1.1. Perforación del tablero del panel de control**

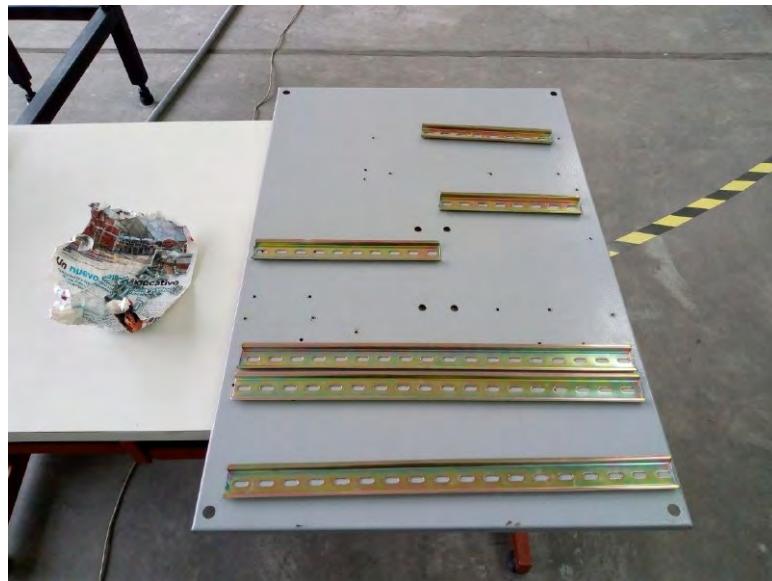
Para iniciar con el ensamblaje de cada dispositivo en el panel de control, se taladró dicho compartimento con brocas de 4 milímetros. Los agujeros fueron hechos según los orificios de cada accesorio; por ejemplo las fuentes de energía de 24 voltios y 5 voltios tenían agujeros en una línea vertical separados alrededor de 7cm, según esto se hizo marcas en el tablero para hacerle su posterior agujero. Cada elemento fue ordenado según la disposición que se ha definido en los pasos previos. La figura 3.98. muestra los huecos realizados con el taladrado en el laboratorio de Mecánica.



**Figura 3.98. Taladrado del tablero con brocas de 4mm**

##### **3.6.1.2. Acople de Rieles y borneras**

En la figura 3.99., los rieles que se colocaron, cumplen la función de soportar otros accesorios, los cuales serán empernados con tornillos de 4mm de diámetro.



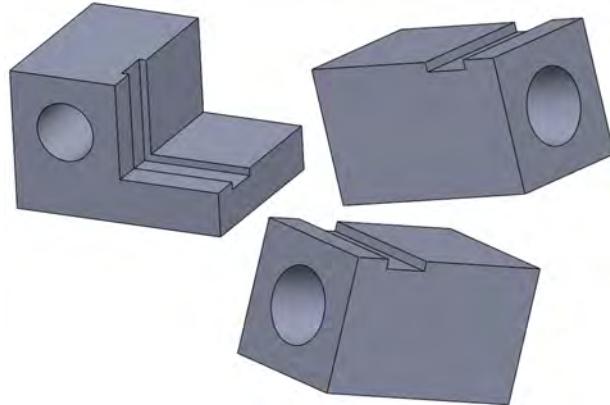
**Figura 3.99. Disposición de las rieles en el tablero**

### 3.6.1.3. Acople del los controladores: Myrio y Raspberry Pi

Para acoplar estos microcontroladores se hizo uso de los agujeros posteriores que estos poseen para empernlos en la placa interna del panel de control.

### 3.6.1.4. Acople del controlador DSP TMDSDOCK28335

En el caso del procesador DSP, la solución para empernar a la placa del panel fue diferente, ya que este procesador sólo dispone de apoyos de goma en su parte trasera y considerando que uno es uno de los dispositivos más frágiles, se tuvo mucho cuidado al manipularlo. Entonces para fijar DSP, se ideado imprimir en 3D algunas muescas que puedan sujetar al DSP, cuando éste se ubique en el tablero. Las medidas que se tomaron para el diseño fueron de acuerdo al lugar donde se desea encajar con el DSP.



**Figura 3.100. Diseño de las muescas de sujeción del DSP**

Para la impresión de estas 3 muescas se tardó alrededor de 17 minutos por pieza, la figura 3.101., muestra este proceso.



**Figura 3.101. Impresión de las muescas**

Debido a que el DSP tiene una conexión USB-B hembra ubicada en sus lados de menor longitud, entonces se plantea colocar el DSP de manera vertical para que su cable de salida se dirija de frente a la canaleta. Asimismo, se ha calculó dónde deben estar ubicadas las muescas que sujeten al DSP antes de ser impresas. Lo más conveniente fue sujetar la esquina inferior izquierda, el medio de la parte superior y cerca de la esquina inferior derecha con tres muescas en

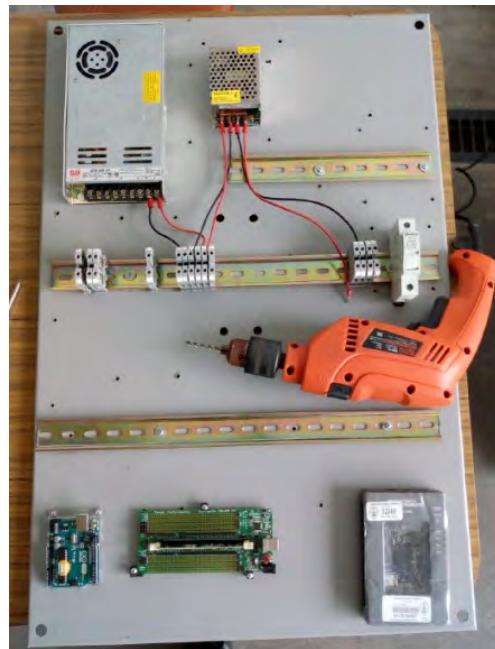
total. Esta decisión fue porque no se puede colocar en la esquina de la parte inferior derecha, ya que su estructura no lo permite. Otro detalle que se consideró, es que las muescas no deben interrumpir las entradas de conexión de la tarjeta, es por eso que se mide y se hace el respectivo diseño para que cada muesca se ubique en el lugar más adecuado y que pueda sujetar con seguridad el DSP. En La figura siguiente 3.100., se aprecia el resultado después de haber empernado las 3 muescas con el DSP en el tablero del panel.



**Figura 3.102. DSP acoplado con las muescas en el tablero**

En la siguiente implementación parcial se observa que en la figura 3.103. se ha colocado las fuentes de voltaje DC en la parte superior según el plan elaborado en el diseño del sistema eléctrico y electrónico de la sección anterior, se ha utilizado un taladro con broca para metal de 1/2”, a fin de perforar el tablero. por lo pronto se ha dispuesto de los microcontroladores y se los ha atornillado. Este primer acople se realiza de manera ordenada para permitir que en el siguiente paso, se pueda distribuir los accesorios que se ubicarán en la parte del medio en tablero, los cuales condicionarán la distribución de las borneras en las rieles como ya se

ha planeado en la sección anterior.



**Figura 3.103. Ensamblaje parcial del tablero**

### **3.6.2. Cableado externo de los sensores y actuadores**

#### **3.6.2.1. Conexión de los sensores**

El cableado tanto de los sensores como de las válvulas proporcionales y servoválvulas, se realiza desde el lugar donde se ubican estos elementos hacia el panel de control.



**Figura 3.104. Cableado del sensor del tanque con tubo corrugado**

Debido que se desea proteger estos cables contra cualquier desborde de agua, se utiliza tubos corrugados de una pulgada, con la finalidad de hacer pasar el cable de cada sensor a través de este tubo, como se observa en la figura 3.105.



**Figura 3.105. Protección de cables con tubos corrugados**

Asimismo, desde la posición de cada sensor, se utilizan tubos corrugados de corto alcance, los cuales se aunaran en un punto de convergencia como se observa en la figura 3.106..



**Figura 3.106. Convergencia de tubos corrugados**

### 3.6.2.2. Conexión de los actuadores

Igualmente para el cableado de cada servoválvula, se siguió el mismo procedimiento que se hizo para el cableado de los sensores, haciendo pasar los cables por el mismo tubo corrugado donde empieza la convergencia en un único tubo corrugado. Por otro lado también se utilizará cable corrugado para la bomba de agua, pero será individual a fin de evitar que este cable pueda influir con perturbaciones, que se manifiestan en forma de ruido en los cables de las señales de control y sensado.



**Figura 3.107. Tubo corrugado en el cable de alimentación de la bomba**

### 3.6.2.3. Etiquetado de los cables y sujeción de los tubos corrugados

Otros recurso usado en cada extremo de los cables, son etiquetas para cables.

Estos tienen un orden según el número que llevan. Por ejemplo la primera servoválvula ubicada en la parte de descarga del primer tanque de nivel tiene la etiqueta número 1, el sensor correspondiente a este tanque tiene la etiqueta número 2 –ver figura 3.108.–. Mientras que cada servoválvula tiene un número de etiqueta impar, cada sensor tiene un número de etiqueta par, por otro lado, las válvulas proporcionales tienen etiquetas enumeradas del 1 al 4 agregando un cero adicional.



**Figura 3.108. Etiqueta del sensor de nivel**

Ahora para que el tubo corrugado no esté colgado de cada sensor o cada servoválvula, se los sujetta con cintillos a la misma estructura, tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.109. Cintillos de sujeción para los cable corrugado**

### 3.6.3. Cableado interno del panel de control

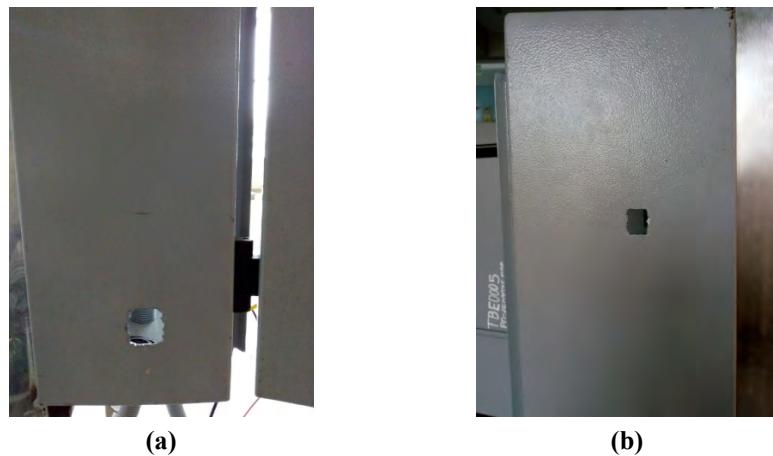
En el cableado de la parte interna de la caja de poder, se realiza siguiendo el esquema establecido en el diseño previo. Primero se conectó desde el *socket* hembra hacia el *switch* de encendido y apagado, llegando posteriormente a las borneras de las fuentes de poder, ya que éstas borneras alimentaran a sus respectivas fuentes que tienen enfrente, después se conectó las líneas de voltaje de 24VDC y 7.4VDC a los accesorios que se encuentren próximos a ellas. Y con la ayuda de un peine para borneras se establecieron varios puntos del mismo voltaje.

El peine de borneras facilita crear varias entradas con el mismo potencial por dónde se puede suministrar voltaje a la parte del nivel central dónde están ubicados los dispositivos de adquisición de datos. Gracias a que se cuenta con varios puntos de voltaje, provenientes de las borneras en las rieles, se puede conectar hacia las borneras ubicadas en la tarjeta de impresión. Para tener acceso a las medidas del sensor de nivel es necesario establecer su conexión de

entrada, para activar este sensor con una fuente de 24 voltios, entonces se sacaron dos líneas de voltaje de las borneras y se conecta directamente hacia las borneras, etiquetadas con este valor, del circuito impreso.

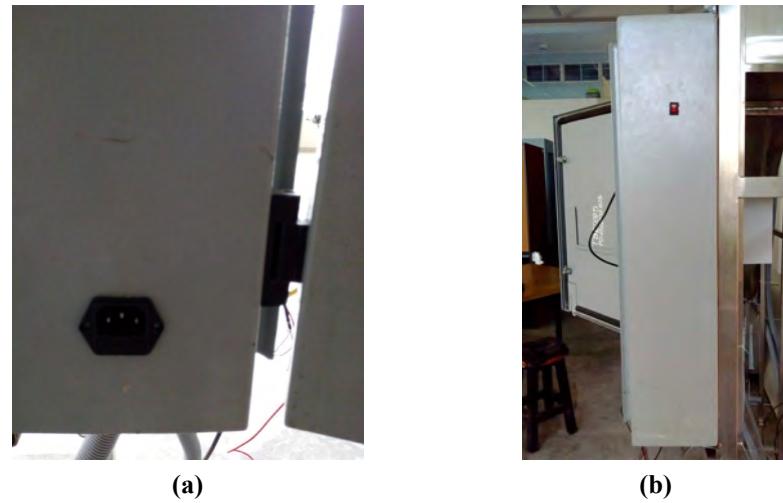
### **3.6.4. Instalación de accesorios adicionales en el panel de control**

Para poder suministrar de energía al panel de control desde un toma de corriente. se perforó la pared izquierda de esta caja con el fin de colocar un *socket* eléctrico hembra para la conexión de electricidad, a través de un cable de alimentación de corriente para PC cuyo otra extremo será conectado al toma corriente. También se desea colocar un botón de inicio que encienda o apague las fuentes de poder (Switching), las cuales suministran los voltajes requeridos por los demás dispositivos. En la figura 3.110. anterior se taladró la caja eléctrica en ambas caras laterales para ubicar el socket y el botón de encendido.



**Figura 3.110. Panel de control perforado para ensamble de accesorios**

Después se colocan los respectivos accesorios en sus agujeros correspondientes como se observa en la figura 3.111.



**Figura 3.111. Accesorios instalados en el panel de control**

En la figura 3.112., se muestra el cableado interno del panel de control, después de haber agregado cada controlador en la sección de microcontroladores.



**Figura 3.112. Cableado interno del panel de control**

El proceso de implementación concluye con el resultado obtenido que se observa en la figura 3.113.



**Figura 3.113. Módulo de control de nivel terminado**

### **3.7. CONTROL DEL PROCESO**

#### **3.7.1. Sistemas de control en el Proceso**

Los sistemas de control que se pueden generar a través de la combinación del control de las válvulas –variables de entrada,  $\mu$ – y las variables a controlar –variables de estado:  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$ –, están conformadas por: Sistemas de una entrada y una salida –SISO–, sistemas de una entrada y múltiples salidas –SIMO–, sistemas de múltiples entradas y una salida –MISO–, y sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas –MIMO–. Según la variedad de sistemas de control, se ha resumido una de las posibles formas para alcanzar los 3 tipos de sistemas de control: SISO, MISO y MISO, dejando de lado el sistema SIMO.

**Tabla 3.1. Sistemas SISO**

Sistema	Control de nivel "h"	Válvulas	SM2	V1	SM1	V2
SISO	Tanque elíptico	Modo	C	P	P	ON
			C	OFF	P	ON
			P	C	P	ON
			OFF	C	P	ON
			P	P	C	ON
			P	OFF	C	ON
			OFF	P	C	ON
	Control de nivel "h"	Válvulas	SM3	V2	SM2	V3
	Tanque triangular	Modo	C	P	P	ON
			P	C	P	ON
			C	OFF	P	ON
			OFF	C	P	ON
			P	P	C	ON
			P	OFF	C	ON
			OFF	P	C	ON
	Control de nivel "h"	Válvulas	SM4	V3	SM3	V4
	Tanque rectangular	Modo	C	P	P	ON
			P	C	P	ON
			C	OFF	P	ON
			OFF	C	P	ON

*Continua en la siguiente hoja*

**Tabla 3.1. – Continua tabla de la página anterior**

Sistema	Control de nivel "h"	Válvulas	SM4	V3	SM3	V4
		P	P	C	ON	
		P	OFF	C	ON	
		OFF	P	C	ON	

**Tabla 3.2. Sistemas MISO**

Sistema	Control de nivel "h"	Válvulas	SM2	V1	SM1	V2
MISO	Tanque elíptico	Modo	C	C	R	ON
			R	C	C	ON
			C	R	C	ON
			C	OFF	C	ON
	Control de nivel "h"	Válvulas	SM3	V2	SM2	V3
	Tanque triangular	Modo	C	C	R	ON
			R	C	C	ON
			C	R	C	ON
			C	OFF	C	ON
	Control de nivel "h"	Válvulas	SM4	V3	SM3	V4
	Tanque rectangular	Modo	C	C	R	ON
			R	C	C	ON
			C	R	C	ON
			C	OFF	C	ON

**Tabla 3.3. Sistemas MIMO**

		Control de Válvulas							
Sistema	nivel "h"	Nº de entradas	SM1	V1	SM2	V2	SM3	V3	
		Salidas	Salidas						
MIMO	Tanque elíptico	2 entradas "h1" y	C	P	C	P	P	ON	
			C	P	C	P	OFF	OFF	
			C	P	OFF	OFF	P	ON	
			C	OFF	C	P	OFF	OFF	
			C	OFF	C	OFF	P	ON	
		"h2"	C	P	P	C	P	ON	
			C	P	P	C	OFF	ON	
			C	OFF	P	C	P	ON	
			C	OFF	P	C	OFF	ON	
			C	P	P	P	C	ON	
			C	P	P	OFF	C	ON	
			C	OFF	P	P	C	ON	
			C	OFF	P	OFF	C	ON	
			P	C	C	P	P	ON/OFF	
			P	C	C	P	OFF	OFF	
			P	C	C	OFF	P	ON	
			P	C	P	C	P	ON/OFF	
			P	C	P	C	OFF	OFF	

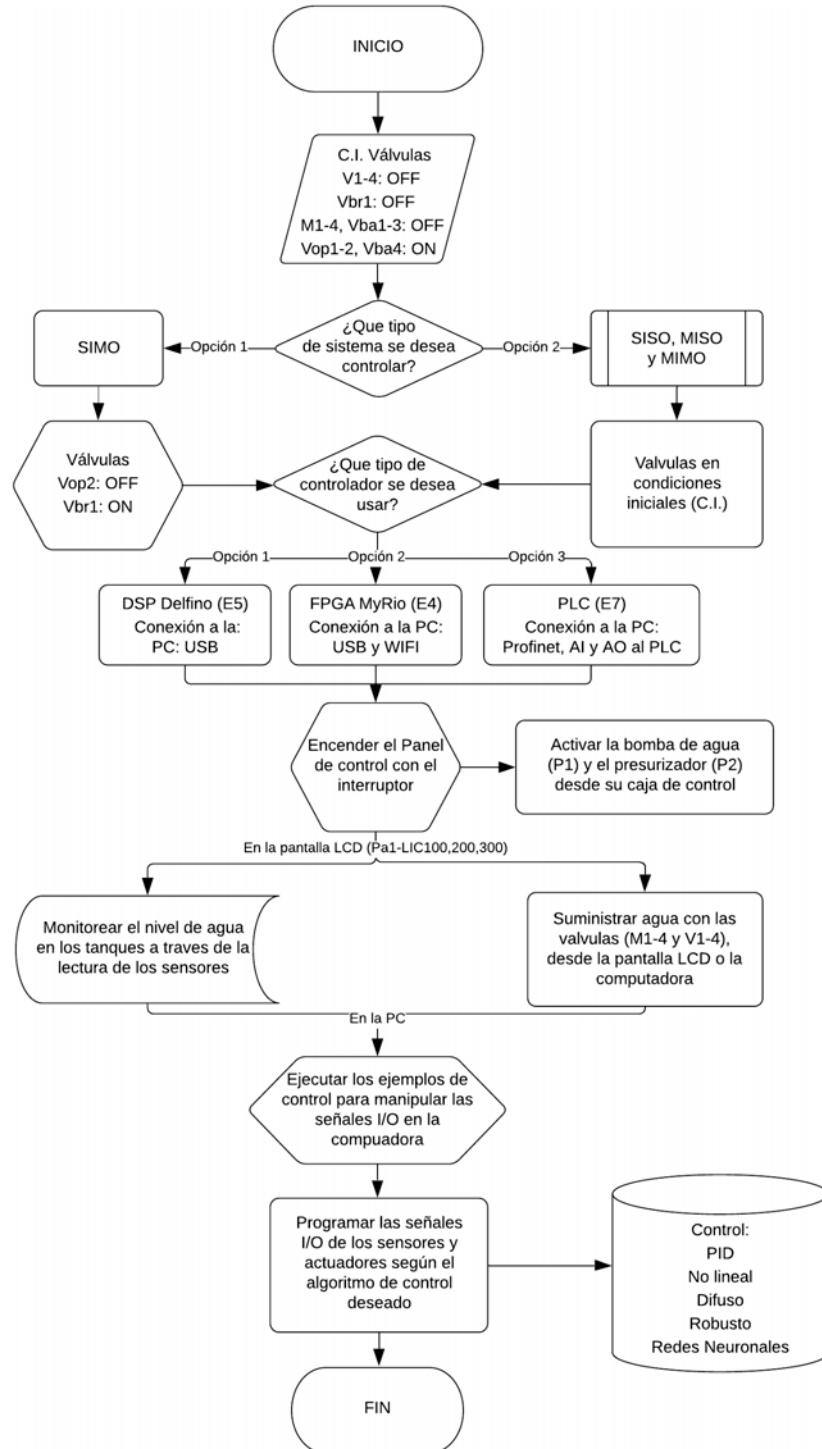
	P	C	P	P	C	ON/OFF
	P	C	P	OFF	C	ON/OFF
	P	P	C	C	P	ON/OFF
	P	P	C	C	OFF	OFF
	P	OFF	C	C	P	ON/OFF
	P	OFF	C	C	OFF	OFF
	P	P	C	P	C	ON/OFF
	P	P	C	OFF	C	ON/OFF
	P	OFF	C	P	C	ON/OFF
	P	OFF	C	OFF	C	ON/OFF
3	C	C	C	P	P	ON/OFF
entradas	C	C	C	P	OFF	ON/OFF
	C	C	C	OFF	P	ON
	C	C	ON	C	P	ON
	C	C	ON	C	OFF	ON
	C	C	P	C	P	ON/OFF
	C	C	P	C	OFF	OFF

---

Donde C representa a la válvula a controlar, P representa la válvula que genera las perturbaciones y ON-OFF son los estados de abierto y cerrado de las válvulas en su respectivo proceso.

### 3.7.2. Proceso de Funcionamiento

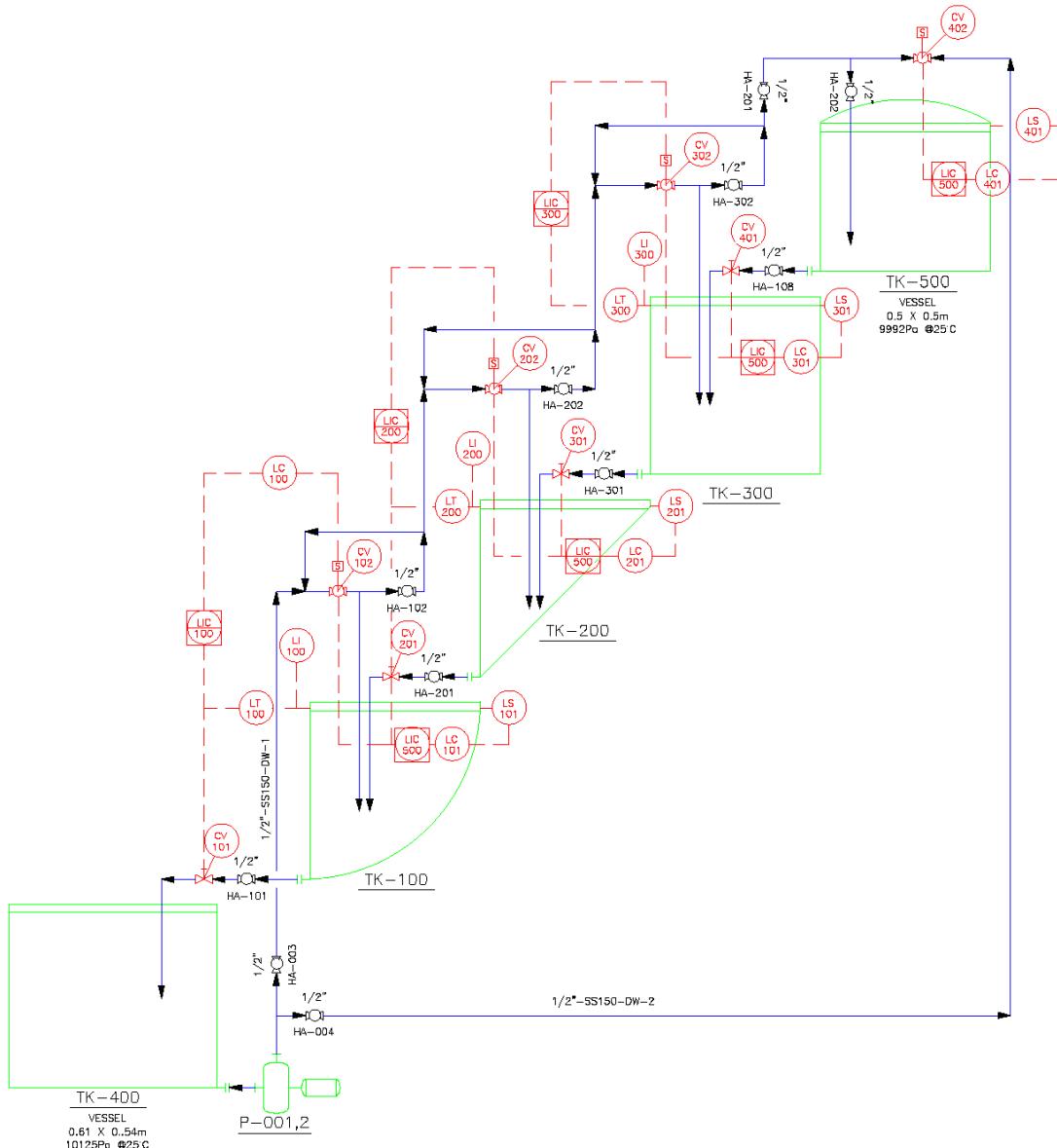
El proceso general de operación se resumen con el siguiente diagrama de flujo:



**Figura 3.114. Proceso general de operación del módulo de control**

Un proceso de control cualquiera comienza con unas condiciones iniciales establecidas por defecto en el sistema, que comprende las válvulas proporcionales solenoides –V14–, las válvula de bola roja –Vbr1–, la servoválvulas –M1-M4– y las válvulas de bola azul –Vba1-Vba3–, todas cerradas, mientras que las válvulas de operación –Vop1 y Vop2–, y la válvula de bola azul –Vba4– abiertas. A continuación se elige el sistema que se desea controlar para cambiar las válvulas de operación –Vop2 y Vbr1– o dejarlas según las condiciones iniciales. Luego se elige que tipo de unidad o dispositivo de control se utilizará, en este proyecto se provee de hasta 3 posibilidades para ejecutar el control siendo estas usando un Procesador –Dsp Delfino E5–, un FPGA –MyRio - E4– y un PLC externo –E7– de cualquier gama. Luego se procede a encender el panel de control y encender la bomba de agua junto al presurizador, este último paso suministra agua desde el reservorio de la parte inferior hacia los tanques de nivel, pero debido a las condiciones iniciales de las válvulas, las cuales están cerradas, se esperará la orden de control dirigido desde la computadora. El control de nivel en los tanques involucra: sensores de nivel –LT100, LT101, LT200, LT201, LT300 y LT301–, actuadores –CV101, CV102, CV201, CV202, CV301, CV302, CV201, CV202, CV302, CV401 y CV402–, indicadores de nivel –LI100, LI200 y LI300–, y un dispositivo de control con una interfase donde se muestre los resultados, estos dos últimos elementos pertenecen al proceso de control y monitoreo de nivel –LC y LIC–, ejecutados desde las unidades de control y visualizados en un ordenador. El diagrama P&ID a continuación, muestra tantos a los sensores y actuadores agrupados según la cercanía o proximidad a un tanque de nivel en específico,

donde los subprocessos de control relacionan, tanto al envío de señales de las unidades de control, como a la recepción de señales mediante su propia circutería presente en la tarjeta electrónica. Adicionalmente se ha pensado en un sistema de seguridad que evite el desborde de agua en los tanques de nivel y en el reservorio superior, para esto se ha instalado boyas de nivel de agua a 2cm por debajo de la superior de cada tanque, estos sensores desactivarán todas las válvulas de suministro de agua en un tanque específico y su control es automático e independiente de los controladores ya que está ligado a un circutería electrónica externa donde el sensor al detectar en su tope el agua, desactiva el voltaje de suministro de las válvulas, este clase de procesos se identifica por la etiqueta LIC400 y conglomera a las 3 boyas en una mismo circuito electrónico.



**Figura 3.115. Diagrama P&ID del sistema de tanques de nivel.**

La equivalencia de los dispositivos usados y etiquetados en el diagrama P&ID con respecto a los planes mecánicos y eléctricos, se resume en la siguiente tabla. Para un control de cualquier tipo de sistema, se ejecutará partiendo desde el envío de una o varias señales de control desde los controladores –E4, E5 y E7– hacia las válvulas proporcionales solenoides –CV102, CV202, CV302 y CV402– y/o servoválvulas –CV101, CV201, CV301, CV401– para abrir las en

**Tabla 3.4. Equivalencia de nombres y etiquetas**

Items	Diagrama Eléctrico y mecánico	Diagram P&ID	Funcionamiento y/o uso
Servovalvulas	M1	CV101	Regulacion del nivel
	M2	CV201	
	M3	CV301	
	M4	CV401	
	V1	CV102	
Valvulas	V2	CV202	
Solenoides	V3	CV302	
	V4	CV402	
Sensores	B1	LT100	Medicion del nivel
	B2	LT200	
	B3	LT300	
	B4	LS101	
	B5	LS201	
	B6	LS301	
	B7	LS401	
	I1	LI100	
	I2	LI100	Visualización del nivel
	I3	LI200	
	I4	LI300	
Bomba	P1	P001	Suministro de agua
Presurizador	P2	P002	
Valvulas manuales	Vba1	HA-102	Mantenimiento de la presión Seguridad y suministro de agua manual
	Vba2	HA-202	
	Vba3	HA-302	
	Vba4	HA-402	
	Vbr1	HA-201	
	Vbam1	HA-101	
	Vbam2	HA-201	
	Vbam3	HA-301	
	Vbam4	HA-401	
	Vop1	HA-004	
Tanques	Vop2	HA-003	Objeto de estudio del nivel
	TK241	Tk-100	
	TK242	Tk-200	
Reservorios	TK243	Tk-300	Reserva de agua
	Tk251	Tk-400	
	Tk252	Tk-500	

un determinado porcentaje, esto permitirá un mayor o menor flujo de agua hacia los tanques. Es decir, si en determinado instante se desea controlar el nivel de agua en el primer tanque, para que alcance una altura de referencia deseada, por

ejemplo  $x_f$ , partiendo desde unas condiciones iniciales de volumen de agua depositado en el tanque  $V_i$  que determina una altura inicial  $x_i$ , siendo este último parámetro, una altura en cualquier instante de tiempo. Además  $x_i$  que denota el estado del espacio-estados y puede elegirse como la salida del sistema si se desea controlar dicha variable. Así las válvulas se regularán de tal forma que permitan un mayor o menor flujo de agua, para llenar o drenar más o menos agua respectivamente, y por consecuencia se conseguirá alcanzar el nivel de agua deseado.

### 3.8. Modelamiento del sistema

En este proyecto de tesis se desea hacer el control para el tanque número 1, a partir de la apertura automática y regulada por la ley de control sobre la servoválvula instalada en el tanque 2, la cual suministra agua debido a su funcionamiento de descarga de líquido. El siguiente esbozo muestra lo descrito.

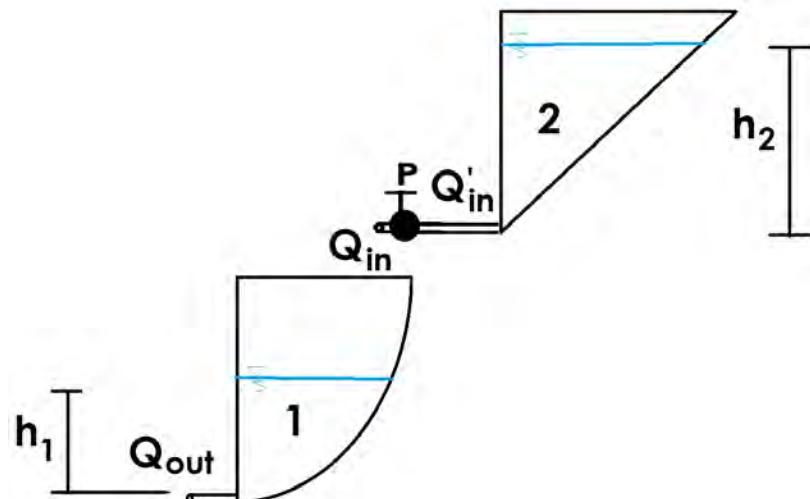


Figura 3.116. Esbozo del tanque 1

### 3.8.1. Consideraciones previas

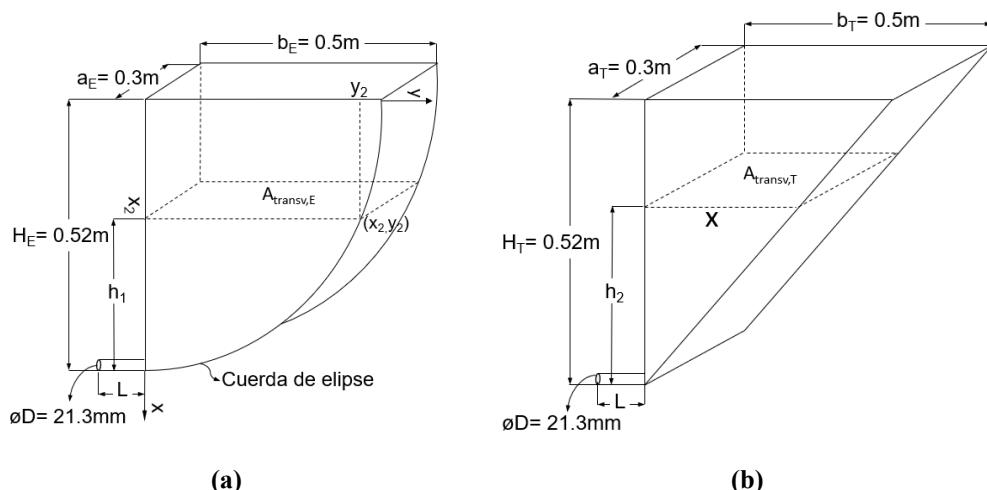
- Las áreas transversales de los tanques 1 y 2, están definidas por las ecuaciones (2.13) y (2.10), descritas en el marco teórico, como:

$$A(h_1) = a_E \cdot b_E \sqrt{1 - \frac{(H_E - h_1)^2}{H_E^2}}$$

$$A(h_2) = \frac{a_T \cdot B_T \cdot h_2}{H_T}$$

Donde los parámetros geométricos de los tanques están dados por:

- $a_E = 0.3m$
- $b_E = 0.5m$
- $\beta_1 = a_E \cdot b_E = 0.15$
- $H_E = 0.52m$
- $a_T = 0.3m$
- $b_T = 0.5m$
- $H_T = 0.52m$



**Figura 3.117. Parámetros geométricos de los tanques de nivel**

- Los caudales a la salida de cada tanque están en función de tanto la altura de agua como de la apertura de la válvula por donde se drena este líquido. Además la rugosidad también interviene en el proceso, ya que causa que el caudal no sea constante. Sin embargo, se puede soslayar el efecto directo de la rugosidad describiendo el caudal de salida en base a la toma de datos a diferente porcentajes de apertura de las válvulas de drenaje. Así, se estará considerando implícitamente la acción de la rugosidad dentro de la expresión del caudal en función de la altura y la apertura de la válvula  $Q(h, a)$ .

$$Q_{out} = Q_{salida,E} = a_{dis}^b \cdot Q(h)$$

Para efectos prácticos solo se considerará el caudal variable en el tanque 1 (tanque elíptico) en función de los 2 parámetro que son altura y apertura de válvula de drenaje, ya que es en este tanque dónde se controlara el nivel de agua, entonces es necesario encontrar la relación del caudal de salida en términos de la altura de agua y la apertura de la válvula por donde se drena el agua, la cual hace papel de disturbio ( $a_{dis}$ ), y es una constante que el usuario puede elegir alterar. Por otro lado, el tanque triangular, hará el rol de suministro de agua, dónde el volumen de ingreso de agua es controlado por la servoválvula, la cual recibe la señal de control. Es así que, su caudal de salida solo dependerá de la apertura de la apertura de la válvula. ( $Q_{salida,T} = \mu$ ). Posteriormente se escalará este caudal para determinar la apertura de la válvula, habiendo antes realizado pruebas de descarga a diferentes porcentajes de apertura de la válvula de drenaje en el tanque triangular.

Después de haber tomado esas ciertas consideraciones en cuanto a la geometría de los tanques se procede a formular las ecuaciones de carga y descarga en los tanques de estudio.

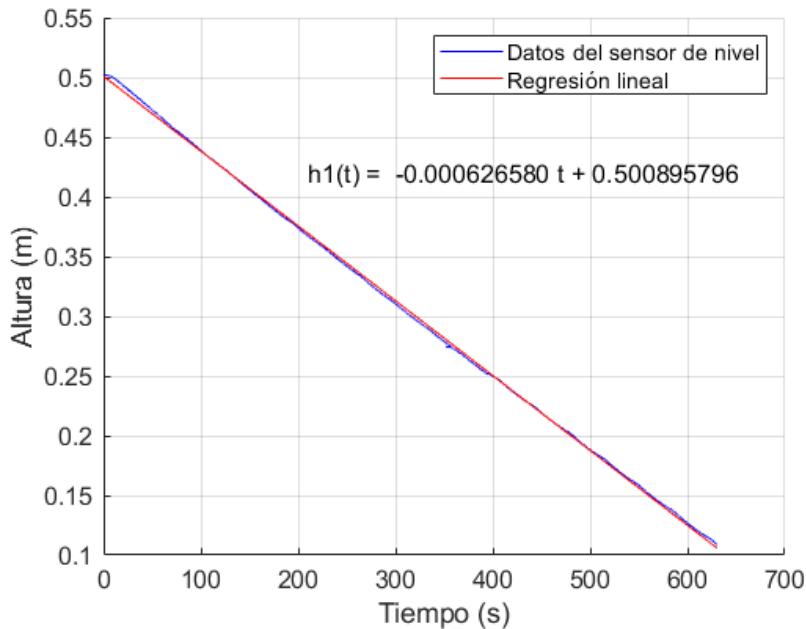
Tanque cuarto de elipse con  $A_{transversal,1} = A_1$  y  $\alpha_1 = c_{d,1} \cdot A_0 \cdot \sqrt{2g}$

$$\begin{aligned} A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} &= Q_{in} - Q_{out} \\ A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} &= Q_{salida,T} - Q_{salida,E} \\ A_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} &= \mu - a_{dis}^b \cdot Q(h_1) \\ \beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_1}{H_E}\right)^2} \frac{\partial h_1}{\partial t} &= \mu - a_{dis}^b \cdot Q(h_1) \\ \frac{\partial h_1}{\partial t} &= \frac{\mu - a_{dis}^b \cdot Q(h_1)}{\beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_1}{H_E}\right)^2}} \end{aligned}$$

Ahora se agrega la salida del sistema para obtener el espacio-estados del sistema. Como se desea controlar el nivel de agua en el tanque curvo, entonces la salida del sistema sería  $h_1$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{\mu - a_{dis}^b \cdot Q(h_1)}{\beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_1}{H_E}\right)^2}} \\ y = h_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Para hallar el caudal del tanque 1 ( $Q_{salida,E}$ ), se procede a analizar la toma de datos del sensor 1 que registra la altura de agua cada 0.1s a partir de la descarga de agua desde aproximadamente 50cm de agua hasta que el volumen de líquido se haya consumido en el interior. La primera prueba se ejecuta cuando el la válvula de drenaje está abierta en un 100%. La figura siguiente muestra el tiempo que demora en vaciarse todo el agua contenido en el tanque.



**Figura 3.118. Descarga del tanque elíptico desde 0.5m de altura a 100% de apertura de la válvula**

Lá relación lineal entre la altura y el tiempo, permite ajustar la curva con una regresión lineal, generando así la función del cambio de nivel con respecto al tiempo, considerando la servoválvula 100% abierta:

$$h(t) = -0.00062658 t + 0.500895796$$

Está expresión permite obtener el caudal de agua que se descarga en cada instante de tiempo, a través de la relación dada por:

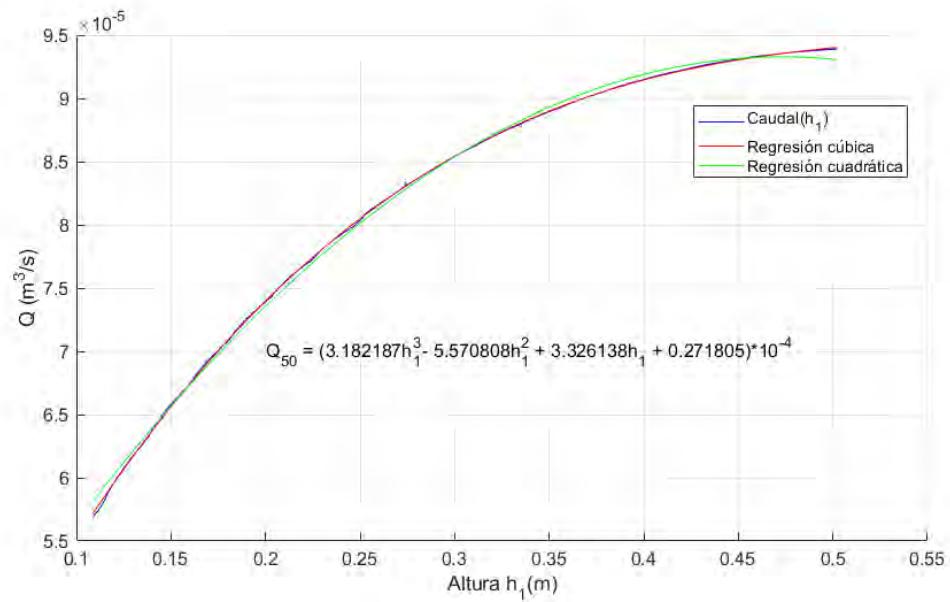
$$\begin{aligned} Q_E(t) &= V \cdot A = \dot{h} \cdot A_E(h) \\ Q_E(t) &= \frac{\partial h}{\partial t} \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_1}{H_E}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Solo queda remplazar la función de la altura con respecto al tiempo para obtener el caudal ( $Q(t)$ ), teniendo en cuenta que la constante  $\beta = 0.15$ , ya que se deter-

mino anteriormente.

$$Q_{E100}(t) = -9.3987752 \cdot 10^5 \sqrt{1 - (0.001204961538 t + 0.0367388539)^2}$$

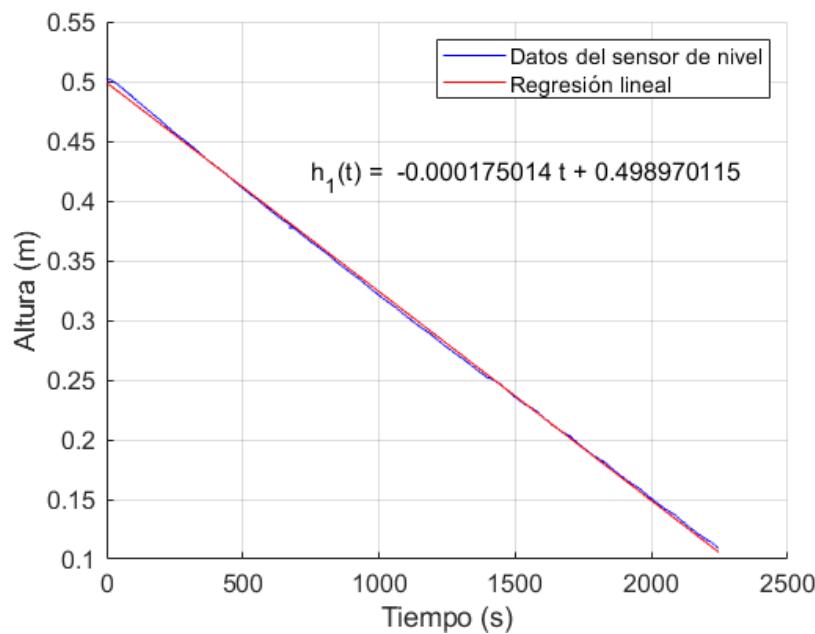
Ahora se comparará el caudal en cada instante de tiempo con respecto a la altura, para encontrar la relación entre estos dos parámetros mediante regresión con el ajuste que se adecue mejor a la curva.



**Figura 3.119. Caudal vs  $h_1$  a 100% de apertura de la válvula**

En la figura de arriba (3.119.), se observa que el ajuste mediante un polinomio de grado 3, describe mejor la tendencia de la curva desde un nivel de agua de 50cm hasta su descarga total. En esta función de  $Q(h_1)$  se encuentra relacionado la apertura de agua ( $a_{dis}$ ); para esta prueba fue de 100% pero es necesario introducir este parámetro en la ecuación de caudal. Por lo tanto se tomará una segunda medida de descarga de agua cuando la válvula esté abierta a 50%, así se podrá entender la relación del caudal con el porcentaje de apertura de la válvula, con el fin de determinar una función de caudal que incluya el parámetro de apertura

de la válvula. La gráfica siguiente muestra la relación de la altura con respecto al tiempo con una válvula al 50% abierta, esta relación será remplazada en la ecuación 3.9.

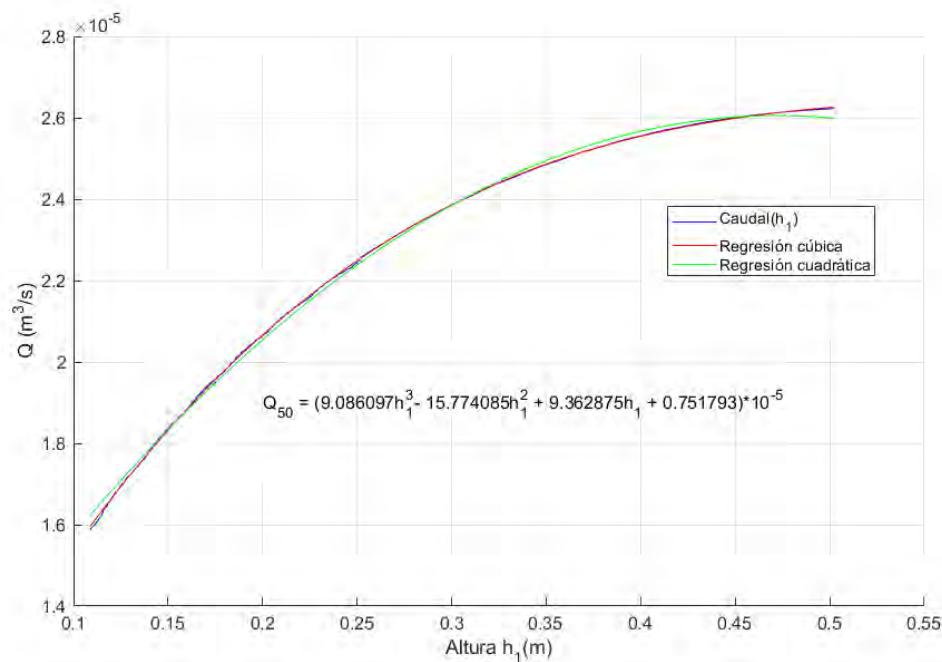


**Figura 3.120. Descarga del tanque elíptico desde 0.5m de altura a 50% de apertura de la válvula**

Donde la relación lineal esta descrita por la ecuación:

$$Q_{E50}(t) = 0.000175014 t + 0.498970115$$

Después mediante la siguiente gráfica de comparación de  $h$  vs  $Q$ , se obtiene la función que los relaciona mediante un ajuste polinómico de grado 3.



**Figura 3.121. Caudal vs  $h_1$  a 50% de apertura de la válvula**

Así se puede comparar las 2 ecuaciones de caudal con las válvulas de drenaje a 100% y 50% abiertas.

$$Q_{E100}(h) = (3.181287 h_1^3 - 5.570808 h_1^2 + 3.326138 h_1 + 0.271805) \cdot 10^{-4}$$

$$Q_{E50}(h) = (9.086097 h_1^3 - 15.774085 h_1^2 + 9.562875 h_1 + 0.751793) \cdot 10^{-5}$$

Si bien, se idealiza que simplemente la apertura de la válvula multiplique al caudal dando una relación lineal, también se espera que exista un factor que multiple a cada coeficiente en la función de caudal con respecto a la altura ( $Q(h)$ ). Y aproximadamente después de dividir los coeficientes de cada

polinomio se obtiene un valor aproximadamente constante.

$$\frac{q3_{E100}}{q3_{E50}} = \frac{3.181287}{0.9086097} = 3.502259$$

$$\frac{q2_{E100}}{q2_{E50}} = \frac{-5.570808}{-1.5774085} = 3.531620$$

$$\frac{q1_{E100}}{q1_{E50}} = \frac{3.326138}{0.9562875} = 3.552475$$

$$\frac{q0_{E100}}{q0_{E50}} = \frac{0.271805}{0.0751793} = 3.552475$$

El promedio de estos valores es  $3.550446 (\bar{f}_{ap})$ , y se puede aproximar que en este valor se incremente el caudal cada vez que se abre la válvula de 100% a 50%.

Ahora si se supuso la relación del caudal con la expresión  $a_{dis}^b \cdot Q(h1)$ , entonces queda determinar la ecuación general de  $Q(h1, u)$ . Para esto se debe determinar el polinomio de grado 3 general que después de ser multiplicado por la apertura de la válvula genere la función de caudal respecto a h como  $Q_{E100}(h)$  y  $Q_{E50}(h)$

$$Q_{salida,E} = a_{dis}^b \cdot (q_3 h_1^3 + q_2 h_1^2 + q_1 h_1 + q_0)$$

A partir de las ecuaciones de caudal con una válvula al 100% y 50% abiertas y el factor promedio, se puede determinar los coeficientes del polinomio general.

$$\begin{cases} q3_{E100} = q_3 \cdot 100^b \\ q3_{E50} = q_3 \cdot 50^b \end{cases}$$

Entonces se puede obtener  $b$  dividiendo las 2 ecuaciones anteriores y después

hallar los coeficientes del polinomio general, así:

$$\bar{f}_{ap} = 2^b$$

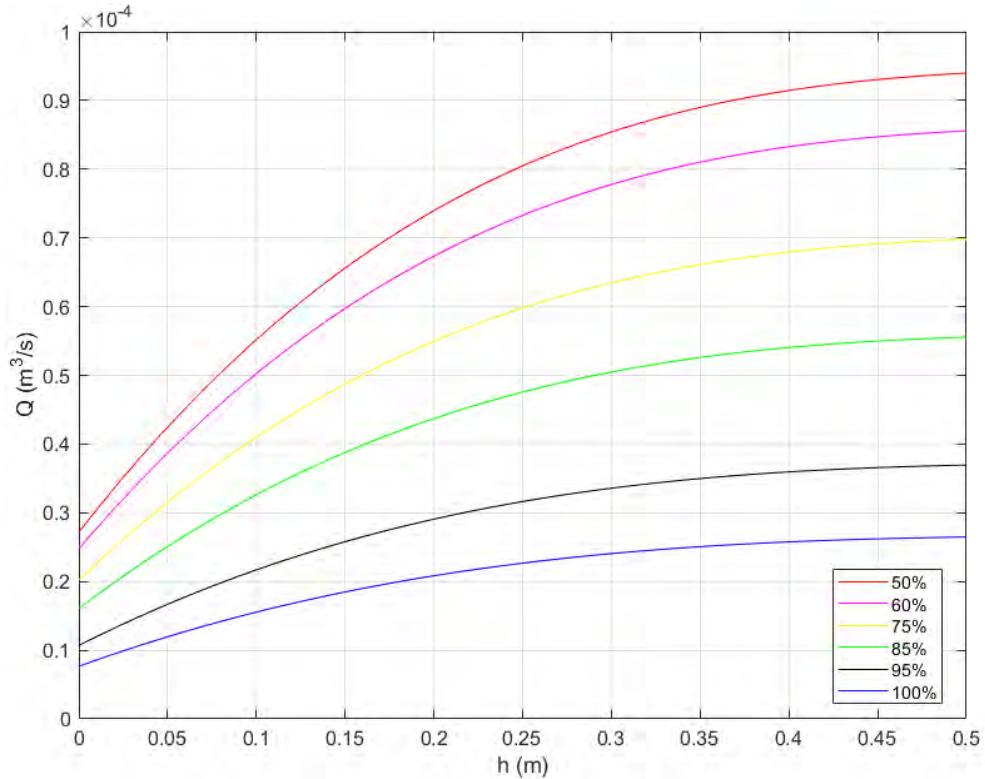
$$b = \log_2 3.550446 = 1.82800065$$

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{q3_{E100}}{100^b} = \frac{3.181287 \cdot 10^{-4}}{100^{1.828}} = 7.02626294 \cdot 10^{-8} \\ q_2 &= \frac{q2_{E100}}{100^b} = \frac{-5.570808 \cdot 10^{-4}}{100^{1.828}} = -1.23003337 \cdot 10^{-7} \\ q_1 &= \frac{q1_{E100}}{100^b} = \frac{3.326138 \cdot 10^{-4}}{100^{1.828}} = 7.34410693 \cdot 10^{-8} \\ q_0 &= \frac{q0_{E100}}{100^b} = \frac{0.271805 \cdot 10^{-4}}{100^{1.828}} = 6.00146569 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

Ahora ya está definido completamente el caudal de salida en el tanque elíptico:

$$Q_{salida,E} = a_{dis}^{1.828} \cdot (7.0262h_1^3 - 12.3003h_1^2 + 7.3441h_1 + 0.6001) \cdot 10^{-8} m^3/s$$

Donde  $a_{dis}$  es la apertura de la válvula para generar el disturbio, la cual se cambia según se requiera. Con esta ecuación se puede tabular para varios porcentajes de apertura de la válvula de descarga ( $a_{dis}$ ), generando un conjunto de curvas que describe el caudal en función de la altura y la apertura de la válvula.



**Figura 3.122. Caudal vs  $h_1$  a 50% de apertura de la válvula**

### 3.8.2. Linealización con Series de Taylor

Debido a que el sistema es altamente no lineal, se utiliza el método de Taylor, descrito en el Marco Teórico, para obtener un sistema lineal en torno a un punto de operación. Hay que tener en cuenta que el control se ejecuta en el tanque 1 ya que es el nivel de agua  $h_1$  la variable de interés, mientras se regula la servoválvula (entrada del sistema, caudal:  $\mu$ ).

Entonces establecemos la funciones a analizar como  $F_1$  y  $G_1$

$$F_1 = \frac{\mu - a_{dis}^b \cdot (q_3 h_1^3 + q_2 h_1^2 + q_1 h_1 + q_0)}{\beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_1}{H_E}\right)^2}}$$

$$G_1 = h_1$$

Según las condiciones de operación en los puntos ( $h_{iop}$  y  $\mu_{op}$ ), la 2 primera ecuación del sistema se iguala a cero y la salida se iguala al valor del punto de referencia ( $y_{ref}$ ), entonces:

$$\begin{cases} 0 = \frac{\mu_{op} - a_{dis}^b \cdot (q_3 h_{1op}^3 + q_2 h_{1op}^2 + q_1 h_{1op} + q_0)}{\beta_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{H_E - h_{1op}}{H_E}\right)^2}} \\ h_{1op} = y_{ref} \end{cases} \quad (3.10)$$

Se tiene un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas, que son los puntos de operación. Debido a que el punto de referencia (setpoint:  $y_{ref}$ ), lo elige el usuario para controlar un nivel de líquido especificado, entonces solo quedaría despejar el caudal de operación ( $\mu_{op}$ ).

$$\mu_{op} = a_{dis}^b \cdot (q_3 h_{1op}^3 + q_2 h_{1op}^2 + q_1 h_{1op} + q_0)$$

Luego de obtener los puntos de operación, se halla las constantes  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  y  $D_1$  para generar la ecuación de espacio estados del modelo linealizado para un punto de equilibrio específico; es decir, se obtendrán múltiples ecuaciones de estado según se cambie el valor de referencia o *setpoint*, que depende de  $h_1$ , lo que producirá sus propios puntos de operación. Entonces, según Taylor:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial F_1}{h_1} \Big|_{h_1=h_{1op}, \mu=\mu_{op}} \\ B &= \frac{\partial F_1}{\mu} \Big|_{h_1=h_{1op}, \mu=\mu_{op}} \\ C &= \frac{\partial G}{h_1} \Big|_{h_1=h_{1op}, \mu=\mu_{op}} \\ D &= \frac{\partial G}{\mu} \Big|_{h_1=h_{1op}, \mu=\mu_{op}} \end{aligned}$$

Lo cual resulta en  $C_1 = 1$  y  $D_1 = 0$ , mientras que para  $A_1$  y  $B_1$  se obtiene las

siguientes expresiones:

$$A = -\frac{-a_{dis}^b \cdot (3h_{1op}^2q_3 + 2h_{1op}q_2 + q_1)}{\beta_1 \sqrt{1 - \frac{(H_E - h_{1op})^2}{H_E^2}}} -$$

$$\frac{[\mu_{op} - a_{dis}^b \cdot (q_3h_{1op}^3 + q_2h_{1op}^2 + q_1h_{1op} + q_0)] [H_E - h_{1op}]}{\beta_1 H_E^2 \left(1 - \frac{(H_E - h_{1op})^2}{H_E^2}\right)^{3/2}}$$

$$B = \frac{1}{\beta_1 \sqrt{1 - \frac{(H_E - h_{1op})^2}{H_E^2}}}$$

Según lo anteriormente establecido, las constantes se pueden resumir en la siguiente lista:

- $a_E = 0.3m$
- $b_E = 0.5m$
- $H_E = 0.52m$
- $\beta_1 = 0.15$
- *setpoint*:  $h_{1op} = y_{ref}$
- $q_0 = 6.00146569 \cdot 10^{-9}$
- $q_1 = 7.34410693 \cdot 10^{-8}$
- $q_2 = -1.23003337 \cdot 10^{-7}$
- $q_3 = 7.02626294 \cdot 10^{-8}$
- $b = 1.82800065$
- $u_{op} = a_{dis}^b \cdot (q_3h_{1op}^3 + q_2h_{1op}^2 + q_1h_{1op} + q_0)$
- $a_{dis} = 0 - 100\%$

Después estas constantes se reemplazarán para reconstruir la ecuaciones de estados linealizada, considerando las nuevas variables de estado:  $h_{td}$  y  $\mu_{td}$

obtenidas a partir de la sustitución de  $h_1 - h_{1op}$  y  $\mu - \mu_{op}$  respectivamente.

$$\dot{h}_{td} = A \cdot h_{td} + B \cdot \mu_{td}$$

$$y = C \cdot h_{td} + D \cdot \mu_{td}$$

Para obtener la FT se aplica la transformada de Laplace:

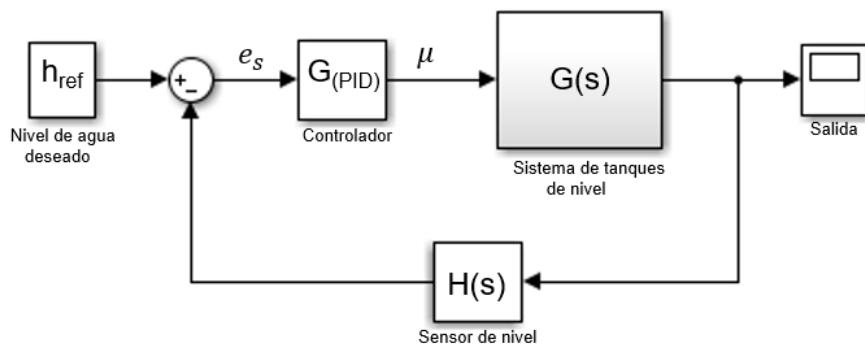
$$sH(s) = AH(s) + BU(s)$$

$$Y(s) = CH(s) + DU(s)$$

Debido a que los parámetros  $A_1, B_1, C_1$  y  $D_1$  son de una dimensión, entonces se puede despejar sin mayor inconveniente la relación para la FT:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ds + C \cdot B - A \cdot D}{s - A} \quad (3.12)$$

Esta función define la planta del sistema  $G(s)$ . Solamente quedaría determinar el control PID ( $G_{PID}$ ), con el cálculo de sus respectivas constantes ( $K_p, K_i$  y  $K_d$ ).  
lazodecontrol



**Figura 3.123. Lazo de control**

### 3.9. Planta según los diferentes puntos de operación

Según la expresión obtenida en 3.12, se puede reemplazar los valores de  $A$ ,  $B$ ,  $C = 1$  y  $D = 0$  en base a varios puntos de operación, pero antes se puede simplificar la planta.

$$G(s) = \frac{B}{s - A}$$

Entonces se evalúa la planta, sustituyendo los valores de A y B, según los puntos de operación cada 5cm, considerando una válvula abierta,  $a_{dis} = 100$ .

$h_{1op}(m)$	$A$	$B$	$G(s)$
0.05	-0.0043518	15.5815	$\frac{15.5815}{s + 0.0043518}$
0.1	-0.002609	11.307	$\frac{11.307}{s + 0.00260903}$
0.15	-0.001774	9.48793	$\frac{9.48793}{s + 0.00177395}$
0.2	-0.0012515	8.4578	$\frac{8.4578}{s + 0.00125148}$
0.25	-0.00088724	7.80061	$\frac{7.80061}{s + 0.000887237}$
0.3	-0.00062013	7.35759	$\frac{7.35759}{s + 0.00062013}$
0.35	-0.00042045	7.05429	$\frac{7.05429}{s + 0.000420454}$
0.4	-0.00027197	6.8516	$\frac{6.8516}{s + 0.000271969}$
0.45	-0.00016523	6.7279	$\frac{6.7279}{s + 0.00016523}$
0.5	-0.000094717	6.6716	$\frac{6.6716}{s + 0.000094717}$

**Tabla 3.5. Plantas con válvula de disturbio abierta en 100% y setpoint cada 5cm**

$h_{1op}(m)$	$A$	$B$	$G(s)$
0.1	-0.001542	11.307	$\frac{11.307}{s + 0.00154202}$
0.2	-0.00073967	8.4578	$\frac{8.4578}{s + 0.000739667}$
0.25	-0.00052439	7.80061	$\frac{7.80061}{s + 0.000524386}$
0.35	-0.0002485	7.05429	$\frac{7.05429}{s + 0.000248503}$
0.4	-0.00016074	6.8516	$\frac{6.8516}{s + 0.000160742}$
0.45	-0.000097657	6.7279	$\frac{6.7279}{s + 0.0000976566}$
0.5	-0.000055981	6.6716	$\frac{6.6716}{s + 0.0000559809}$

**Tabla 3.6. Plantas con válvula de disturbio abierta en 75% y setpoint cada 5cm**

$h_{1op}(m)$	$A$	$B$	$G(s)$
0.1	-0.00073485	11.307	$\frac{11.307}{s + 0.000734845}$
0.2	-0.00035249	8.4578	$\frac{8.4578}{s + 0.000352486}$
0.25	-0.00024989	7.80061	$\frac{7.80061}{s + 0.000249894}$
0.35	-0.00011842	7.05429	$\frac{7.05429}{s + 0.000118423}$
0.4	-0.000076601	6.8516	$\frac{6.8516}{s + 0.0000766012}$
0.45	-0.000046538	6.7279	$\frac{6.7279}{s + 0.0000465379}$
0.5	-0.000026677	6.6716	$\frac{6.6716}{s + 0.0000266775}$

**Tabla 3.7. Plantas con válvula de disturbio abierta en 50% y setpoint cada 5cm**

h1op	A	B	Gs
0.05	-0.00034523	15.5815	$\frac{15.5815}{s + 0.000345225}$
0.1	-0.00020697	11.307	$\frac{11.307}{s + 0.000206973}$
0.15	-0.00014073	9.48793	$\frac{9.48793}{s + 0.000140726}$
0.2	-0.000099279	8.4578	$\frac{8.4578}{s + 0.0000992792}$
0.25	-0.000070384	7.80061	$\frac{7.80061}{s + 0.0000703839}$
0.3	-0.000049195	7.35759	$\frac{7.35759}{s + 0.0000491945}$
0.35	-0.000033354	7.05429	$\frac{7.05429}{s + 0.0000333544}$
0.4	-0.000021575	6.8516	$\frac{6.8516}{s + 0.0000215751}$
0.45	-0.000013108	6.7279	$\frac{6.7279}{s + 0.0000131076}$
0.5	$-7.5138 \cdot 10^{-6}$	6.6716	$\frac{6.6716}{s + 0.00000751384}$

**Tabla 3.8. Plantas con válvula de disturbio abierta en 25% y setpoint cada 5cm**

### 3.10. Diseño del control PI

Para verificar las plantas obtenidas en las tablas adjuntas arriba, se las somete a una entrada escalón unitario con la finalidad de ver su respuesta a lazo abierto y comprobar que converja a 1. Se elegirán plantas con puntos de operación y porcentajes de apertura de la válvula de disturbio que están en los límites para tener un panorama más concreto de lo que ocurre en el sistema a controlar posteriormente en un lazo cerrado a través de un controlador PI. Las plantas que se eligen serán las siguientes:

- Planta con *setpoint* a 20cm y válvula de disturbio abierta en 100%:

$$\frac{8.4578}{s + 0.00125148} \quad (3.13)$$

- Planta con *setpoint* a 40cm y válvula de disturbio abierta en 100%:

$$\frac{6.8516}{s + 0.000739667} \quad (3.14)$$

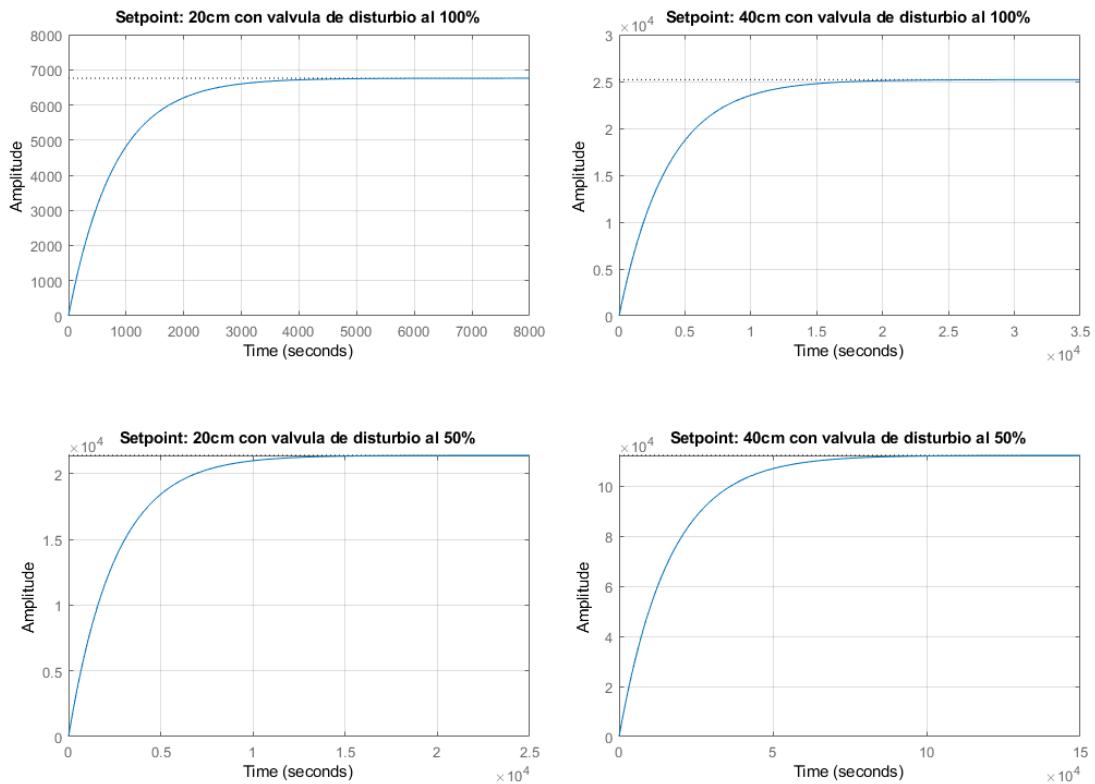
- Planta con *setpoint* a 20cm y válvula de disturbio abierta en 50%:

$$\frac{8.4578}{s + 0.000352486} \quad (3.15)$$

- Planta con *setpoint* a 40cm y válvula de disturbio abierta en 50%:

$$\frac{6.8516}{s + 0.0000766012} \quad (3.16)$$

Las figuras siguientes muestran la respuesta a partir de la excitación de estas plantas con un escalón unitario.

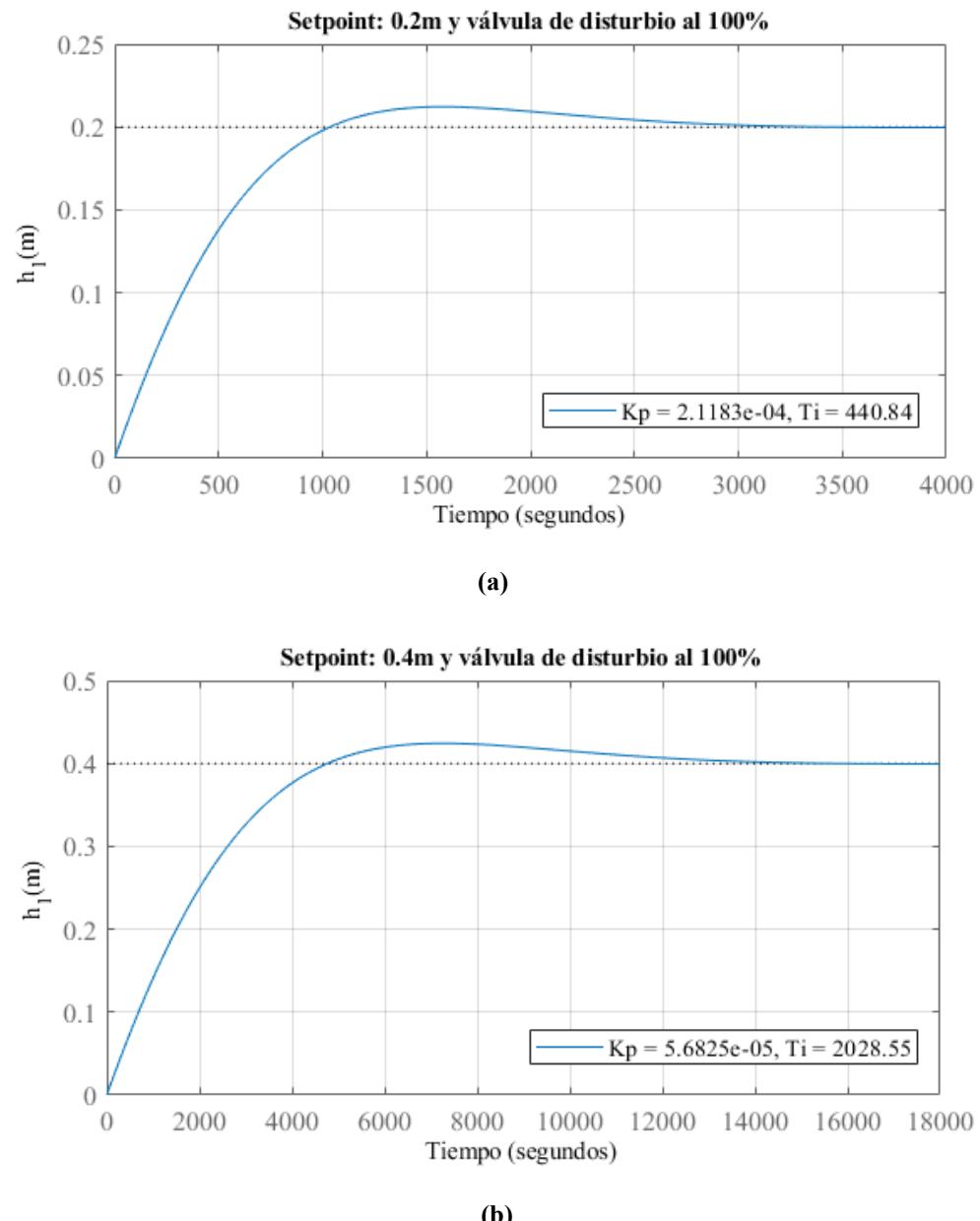


**Figura 3.124. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

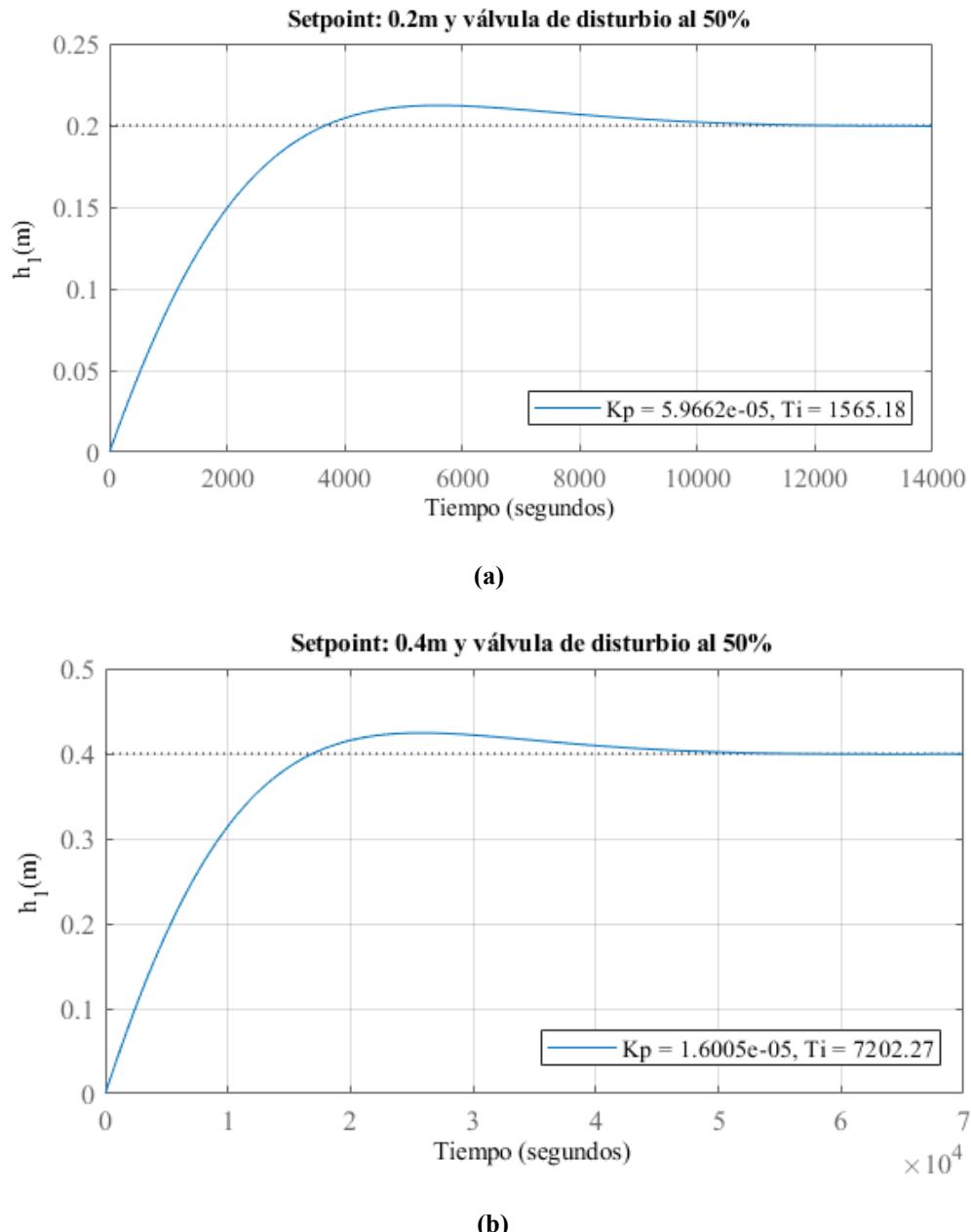
### 3.10.1. Implementación del control PI

Después de haber obtenido la planta que describe al sistema del tanque elíptico, alimentado por un tanque triangular, es posible diseñar el controlador digital. Tras haber hallado las plantas que describen al sistema, se observa que estas plantas son de primer orden, entonces se entiende que al multiplicar por un control con acción derivativa producirá un sistema no realizable. Por ende el control digital está limitado a un control PI que es suficiente para estabilizar el sistema de este tipo. Es así que para esta primera parte se utilizará la función de *pidtune* que provee Matlab para verificar un primer resultado. Ahora es posible diseñar un controlador que satisfaga alcanzar un *setpoint* o punto de operación

especificado, a manera de ejemplo se probará con las plantas anteriormente citas; sin embargo estás numero de plantas no está restringido a esa cantidad ya que se puede obtener plantas en cualquier punto de operación que sea menor o igual a la altura máxima del tanque (52cm), por motivos de seguridad se sugiere elegir los primeros 50cm de altura ya que sobrepasar esa altura podría ocasionar un desborde de agua que sería propenso a alcanzar en el caso que el sobreimpulso sube más de 2cm, esto se corroborará con algunas precisiones extras después cuando se implemente el control de manera física. Para sintonizar el control se usará a modo práctico la función *pidtune* que provee Matlab con los plantas ya mencionadas y después se comparará los resultados con el diseño del algoritmo genético que sintoniza los valores de K<sub>p</sub> y K<sub>i</sub> del control. En la siguientes figuras se muestra los resultados tras haber aplicado el control PI en las plantas en un sistema de lazo cerrado para verificar que se ha alcanzado de punto de referencia de 20 y 40cm mediante las ganancias obtenidas de la sintonización mediante la función Pidtune



**Figura 3.125. Implementación del control PI con una válvula de disturbio 100% abierta**



**Figura 3.126. Implementación del control PI con una válvula de disturbio 50% abierta**

Si bien es cierto, se puede concluir que se ha alcanzado la estabilidad después de un lapso tiempo prudente, debido a que el tanque demora en llenarse hasta el punto de operación requerido, es necesario justificar que el sistema a alcanzado la estabilidad describiendo la acción conjunta del controlador y la planta dentro

del lazo unitario de control. Por tal razón, se lleva el sistema continuo a un sistema discretizado que considera un tiempo de muestreo inherente a las medidas tomadas por el sensor de nivel, concernientes a la altura de agua presente en el tanque. Esta planta discretizado describe un sistema físico real y es plausible de ser implementado en el proyecto. Al inicio de tomar las medidas con el sensor para obtener la alturas de nivel, se considero un tiempo de muestreo de 0.1s, pero esto presunción tiene una mayor repercusión a la hora de discretizar el sistema ya que explicaría que un tiempo de muestreo puede generar un sistema estable o inestable según su adecuada elección.

### **3.10.2. Estabilidad del sistema con el controlador PID de autotune**

A continuación se evaluará la estabilidad de la función de transferencia en lazo cerrado del sistema discretizado por el método de Jury, eligiendo la planta con *setpoint* igual a 20cm y válvula de disturbio abierto al 50%, que se obtuvo en la ecuación 3.15, con control PI según los parámetros de ganancia mostrados en la figura 3.126.. Entonces, se probará con diferentes tiempos de muestreo, para corroborar la elección adecuada del tiempo de muestreo en la toma de datos posterior. En el uso del criterio de estabilidad de Jury, solo es necesario que se cumplan ciertas condiciones que provee la tabla que genera este método, aplicado al polinomio característico del sistema en lazo cerrado. Entonces se elegirá, según la hipótesis, un tiempo de muestreo de 0.1s, para después generar la planta discreta del sistema  $G_{SPID}$  y el subsecuente polinomio característico,

esto con la ayuda de las función *c2d* de Matlab.

$$Gs = \frac{8.4578}{s + 0.000352486}$$

Según el algoritmo de sintonización de Matlab –Pdtune–, se obtuvo el control PI definido con ganancias  $K_p = 5.966 \cdot 10^{-5}$  y  $K_i = 5.966 \cdot 10^{-5} / 1565.18 = 3.812 \cdot 10^{-8}$ , definido por:

$$G_{PID} = 5.966 \cdot 10^{-5} + \frac{3.812 \cdot 10^{-8}}{s}$$

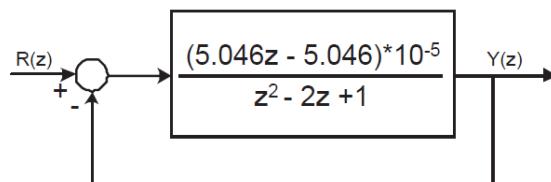
Entonces la planta con el control esta definida por:

$$\begin{aligned} G_{s,PID} &= G_s \cdot G_{PID} \\ &= \left( \frac{8.4578}{s + 0.000352486} \right) \cdot \left( \frac{5.966 \cdot 10^{-5}s + 3.812 \cdot 10^{-8}}{s} \right) \\ &= \frac{0.0005046s + 3.224 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.0003525s} \end{aligned}$$

Después se discretiza la planta con un  $T_s = 0.1s$ , obteniendo:

$$G(z) = \frac{(5.046z - 5.046) \cdot 10^{-5}}{z^2 - 2z + 1}$$

En la figura 3.127., se observa la simplificación de la planta para obtener seguidamente el polinomio característico definido en  $Y(z)/R(z)$ .



**Figura 3.127. Planta discreta para un *setpoint* de 20cm y válvula de 50% de apertura, usando un  $T_s = 0.1s$**

Ahora se obtiene la función de transferencia del lazo cerrado:

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{L(z)}{1 + L(z)} = \frac{(5.046z - 5.046) \cdot 10^{-5}}{z^2 - 2z + 0.9999}$$

Como el polinomio característico es de 2do grado, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- $P(z = 1) > 0 \rightarrow 3.22 \cot 10^{-9} \rightarrow \text{cumple}$
- $(-1)^n P(z = -1) \rightarrow 4 > 0 \rightarrow \text{cumple}$
- $|a_n| > |a_0| \rightarrow |1| > |0.999| \rightarrow \text{cumple}$

Se concluye que el sistema es estable por la veracidad de las 3 condiciones anteriormente establecidas. Ahora se prueba con un tiempo discreto de 1s, obteniendo la siguiente planta discreta.

$$G(z) = \frac{0.0005047z - 0.0005044}{z^2 - 2z + 0.9996}$$

Y cuya función de transferencia en lazo cerrado es:

$$\frac{Y_1(z)}{R_1(z)} = \frac{0.0005047z - 0.0005044}{z^2 - 1.999z + 0.9991}$$

Entonces en las condiciones:

- $P(z = 1) > 0 \rightarrow 3.22 \cot 10^{-9} \rightarrow \text{cumple}$
- $(-1)^n P(z = -1) \rightarrow 4 > 0 \rightarrow \text{cumple}$
- $|a_n| > |a_0| \rightarrow |1| > |0.99914| \rightarrow \text{cumple}$

Por lo tanto, este rango  $< 0.1, 1 >$  para periodos de muestreo que utiliza el sensor de nivel, garantiza que el sistema sea estable en los puntos de operación.

### 3.11. Diseño del control PI con Algoritmos genéticos

Cómo se describió en el marco teórico, se utilizará la función de Matlab llamada GA para implementar los algoritmos genéticos, donde se utilizará una población de 25 miembros con 10 iteraciones, calculando así, las ganancias presentes en el controlador PI. Y a través de los procesos de selección, recombinación –o cruzamiento– y reemplazo, se selecciona a los mejores candidatos que minimicen la función objetivo, según transcurren las generaciones.

$$t = 0 : dt : 0.1$$

$$Q = 1$$

$$R = 0.001$$

$$J = dt * \text{sum}(Q * (1 - y(:)).^2 + R * u(:).^2)$$

Esta función objetivo J, tiene como finalidad minimizar el error que cada control produce; es decir que al multiplicar el control por la planta, se evalúa su respuesta a una entrada escalón en lazo cerrado, donde se obtiene el valor y de salida, después a través de la operación del error cuadrático medio se determina el valor de la función objetivo. Los valores que adquieren esta función objetivo, mientras transcurren las iteraciones debe ser el mínimo, ya que la intención es estar más próximo al valor de 1 que es de la entrada escalón. De esta forma el algoritmo determina las mejores ganancias que minimizan el valor esta función objetivo en base al error cuadrático medio. El resultado del control para la planta de estudio escogida, con *setpoint* igual a 0.2cm y válvula de disturbio abierta en 5% fueron los siguientes: Se observa que los valores de las

constantes  $K_p$  y  $K_i$  obtenidas para el controlador PI a través del algoritmo genético, se asemejan a los obtenidos por la función Pidtune. Cabe destacar que el rango de valores usados como población para que se encuentre los valores de las ganancias está debidamente limitado ya que de otro modo si se ejecutara una búsqueda sin fronteras, el algoritmo genético podría encontrar, incluso un controlador PID que en la realidad no podría ser implementado, esto se mostrará para probar el error de este tipo de plantas que teóricamente presentan un corto tiempo de establecimiento –menos de 10s–, pero en la práctica esto no sucede hasta después de algunos minutos de haber empezado el control, ya que el tanque siempre demora en llenarse de agua, porque el caudal de suministro de agua solo depende de la descarga por gravedad del tanque de alimentación. Este caudal de alrededor de 0.2L/s, va decreciendo y considerando al volumen de agua que tiene el reservorio elíptico de 61L aproximadamente, se infiere que demora unos minutos en poder llenarse.

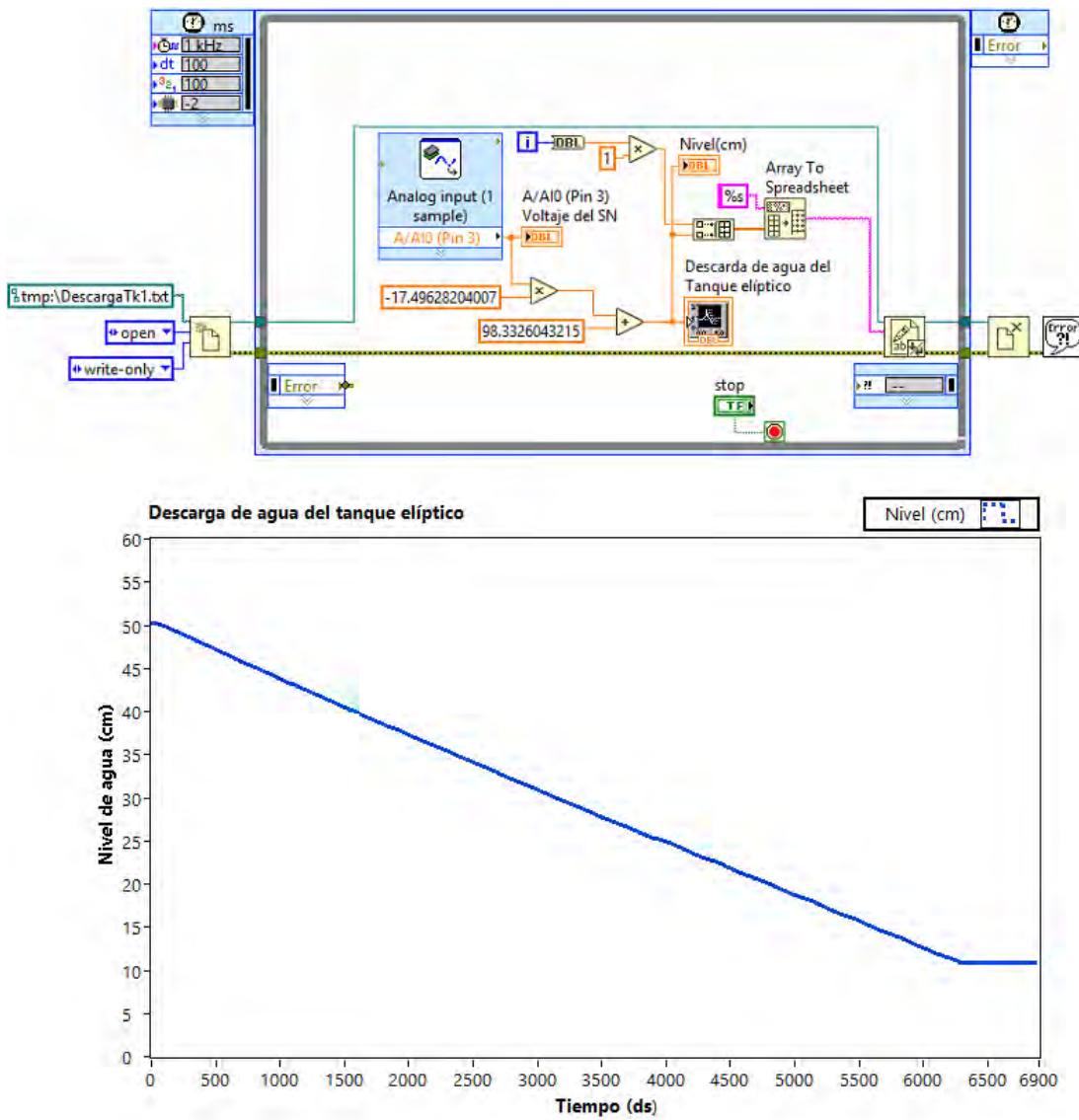
## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS**

#### **4.1. Implementación física del control**

En la implementación del control, se compara los performance de los métodos de sintonización del PI con Algoritmos genéticos y el Pidtune de Matlab. Así, se utilizará la planta discreta en el programa de adquisición de datos Labview, donde el sensor de nivel adquiere cada 0.1s la altura de agua en el tanque elíptico. Los pasos previos a la realización de la implementación se divide en dos etapas: Adquisición de datos del nivel y envío de la señal de control hacia la servoválvula.

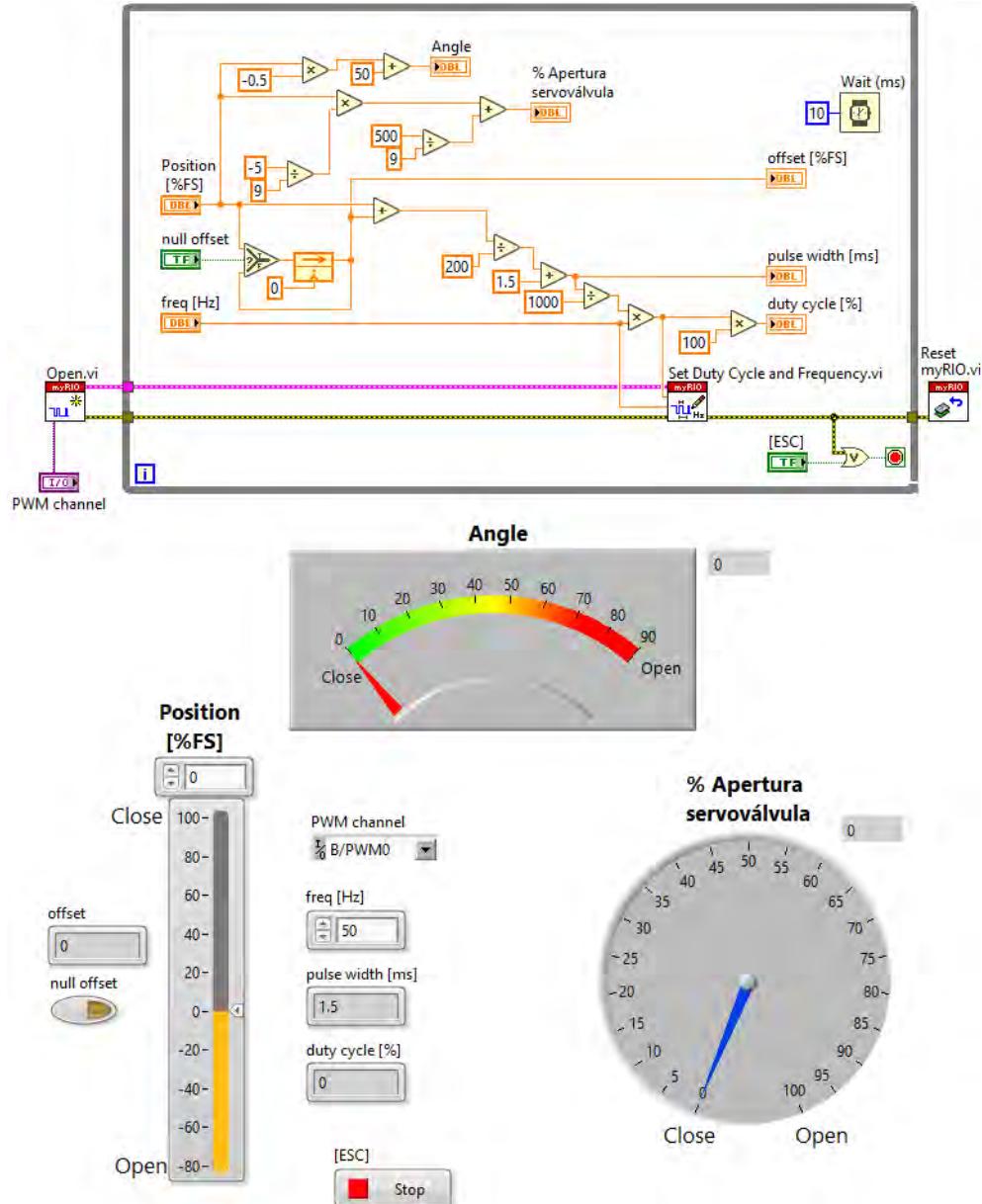
- Adquisición de datos del sensor de nivel. En este paso se toma los datos, para hacer el escalamiento de la señal analógica del sensor de nivel, que envía voltajes hacia el sistema de adquisición de datos, Myrio. Estos datos serán escalados según una conversión de voltaje a distancia. En la figura 4.1., se observa el archivo VI de Labview dónde se configura y guarda un archivo de texto que almacena los datos; a su vez, el bloque de salida que contiene la información del nivel de líquido se gráfica en tiempo real mientras se toma los datos con un tiempo de muestreo de 100ms o 0.1s.



**Figura 4.1. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

- Envío de la señal de control hacia la servoválvula. La servoválvula, recibe la señal digital PWM proveniente del Myrio, donde se ejecuta su correspondiente VI. Las conversiones referentes a la salida son para representar la escala definida con la etiqueta *Position* en la figura 4.2.. Estás conversiones se representan con los indicadores: Angle, que representa el angulo que gira la servoválvula y está en un rango de  $0^\circ$  a

90°, donde este último ángulo representa la válvula completamente cerrada. El otro indicador se denomina Porcentaje de apertura de la servoválvula y su rango es de 0 a 100%, tal como lo sugiere su nombre. Estas equivalencias se han agregado con el fin de facilitar la visualización de la posición de giro de la servoválvula, a fin de permitir una fácil verificación de que el proceso se está ejecutando correctamente, al observar el ingreso mayor o menor volumen de agua según la apertura de la servoválvula a través del control.



**Figura 4.2. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

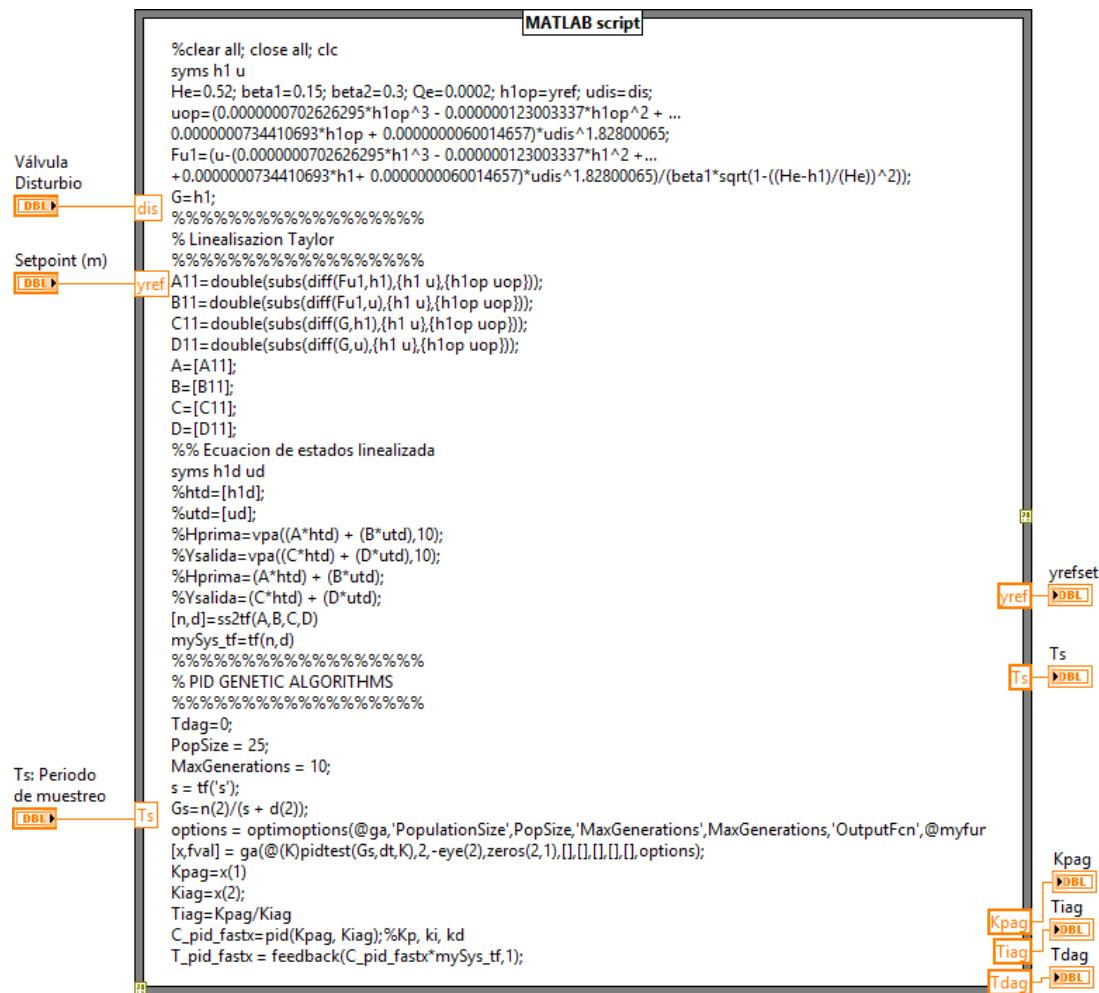
#### **4.1.1. Sintonización del PI con Algoritmos Genéticos**

Debido a que las iteraciones que realiza el algoritmo genético, para encontrar las ganancias del PI a diferentes porcentajes de apertura de la válvula de disturbio, se calcula un estimado de 30 segundos por cada solución, por esta

razón se efectúa previamente un cálculo amplio de un sin numero de controles para diferentes puntos de operación –que genera fierentes plantas lineal izadas–, como de aperturas de la válvula de disturbio. Así se pudo generar un arreglo que almacena todos estas plantas y controles por cada punto de operación.

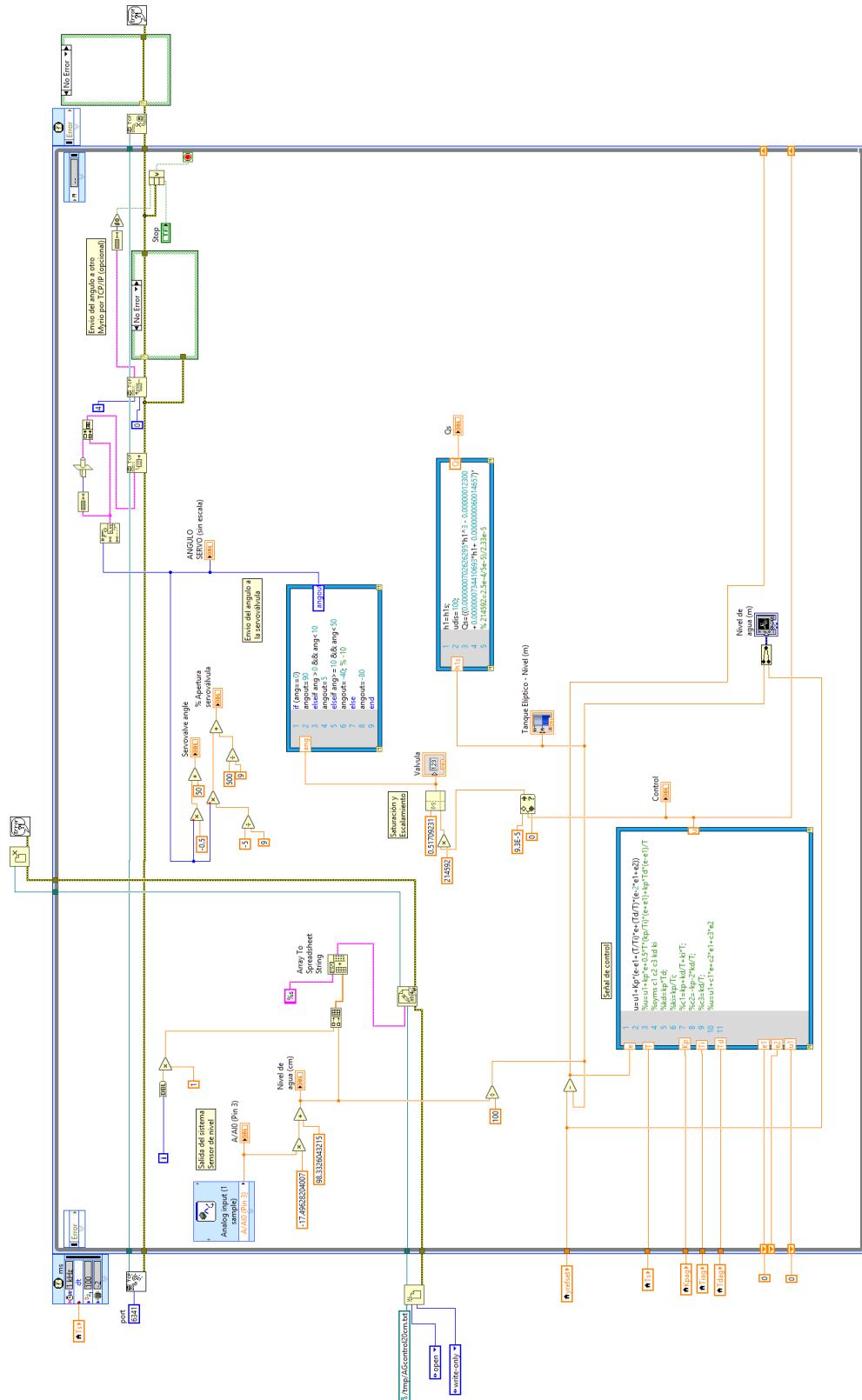
El diagrama de bloques del archivo VI que se representa en la figura, muestra el algoritmo que ejecuta los siguientes pasos:

- Se establecen tres variables de entrada: Setpoint, Tiempo de muestreo y Válvula de disturbio (porcentaje de su apertura para generar ruido). Estás variables definen los parámetros de inicialización para que el algoritmo de la figura 4.3., calcule la planta linealizada por el método de Taylor y consecuentemente halle las ganancias del PI a través del algoritmo genético, en caso de que no se recurra del arreglo con la base datos ya calculada de las plantas.



**Figura 4.3. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

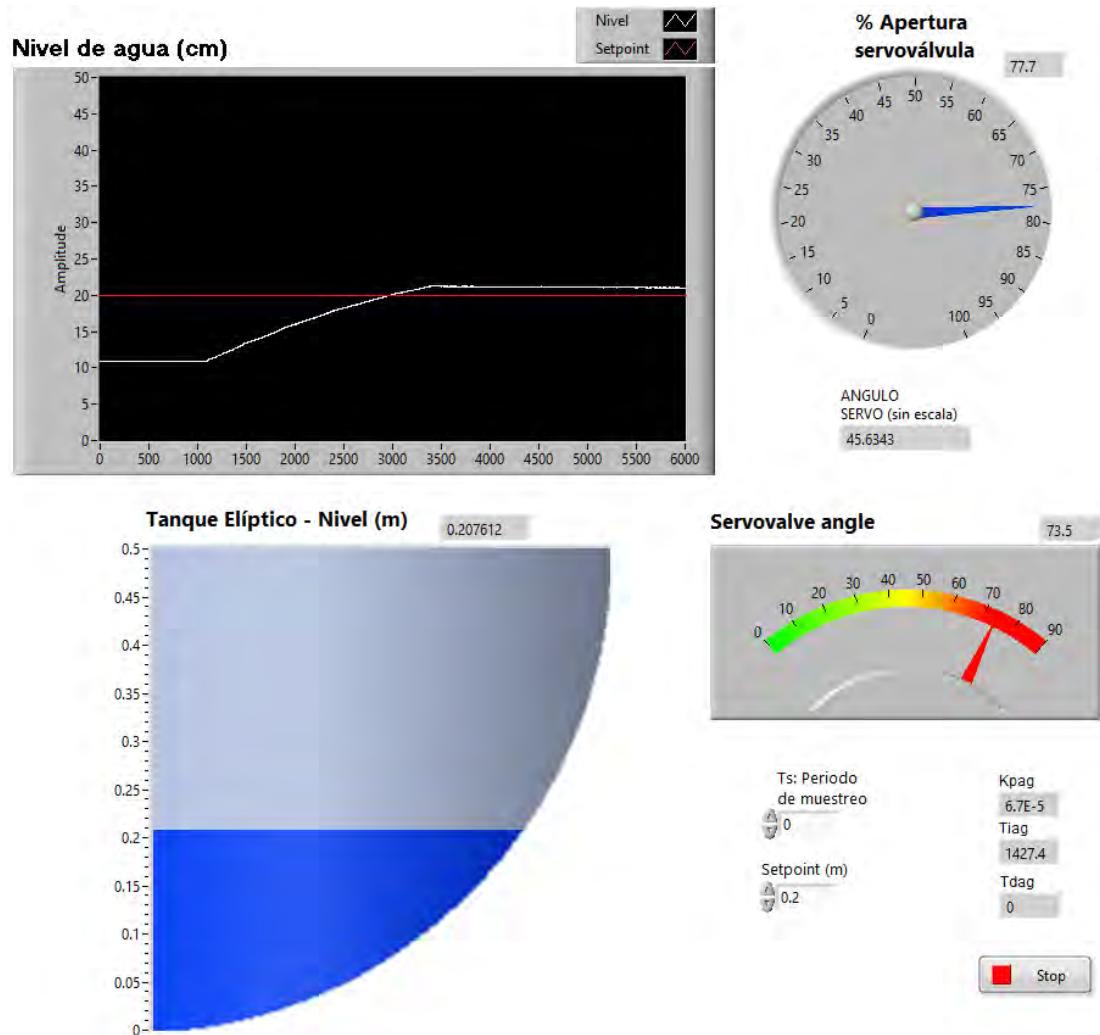
- Después de haber hallado las constantes de  $K_p$  y  $T_i$ , se envían estas a través de una variable local al *script* dentro del bucle de la figura 4.4., donde la señal de control discreta recibe estos parámetros para generar cada 0.1s una señal de control actualizada.



**Figura 4.4. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

- En el bucle ingresa también el *setpoint* al bloque donde se compara con la señal de salida, que viene dado por la lectura del sensor de nivel. Esta diferencia produce una señal de error que se enviará al *script* del control, este lazo cerrado, irá ajustando la señal de salida tal que se aproxime al valor de referencia.
- La señal de control es escalada y limitada antes de ser enviada a la servoválvula. Debido a que esta señal está en términos de caudal y no de altura, se escala teniendo en cuenta que el caudal de entrada de agua debe ser aproximadamente igual al caudal de salida cuando se ha alcanzado el nivel de referencia. Esto último permite hacer una analogía para averiguar el escalamiento de la señal de control. Pero esta señal después de ser escalada no debe ser enviada si antes establecer unos límites de caudal máximo ( $9.3 \cdot 10^{-5}$ ) y mínimo (0). La servoválvula a pesar de poseer un alto torque y precisión, no responde a cambios de posición de ángulos pequeños. La posición máxima según el VI 4.2. es 100 cuando la válvula está totalmente cerrada y -80 cuando está totalmente abierta. Cuando se probaron varios cambios de posición, menores a 40, la válvula no giraba, por eso se establecieron cambios de posición con rangos mayores a 40, esto último se añadió en seguida después de la limitación de la señal de control.
- Para hacer una prueba del Control con Algoritmos genéticos, se utilizó el *setpoint* igual a 20cm y una válvula de disturbio abierta al 50%, además se empezó el proceso con una altura de agua inicial en el tanque elíptico de 10cm. La figura 4.5., muestra el panel de control del mismo VI, donde se

observa que el nivel de agua se estabiliza en la 3500 décimas de segundo, es decir en 5 minutos con 50 segundos, ya que el tiempo de muestreo es 0.1ms. A partir de ese instante el nivel desciende lentamente hasta aproximarse a 20cm.



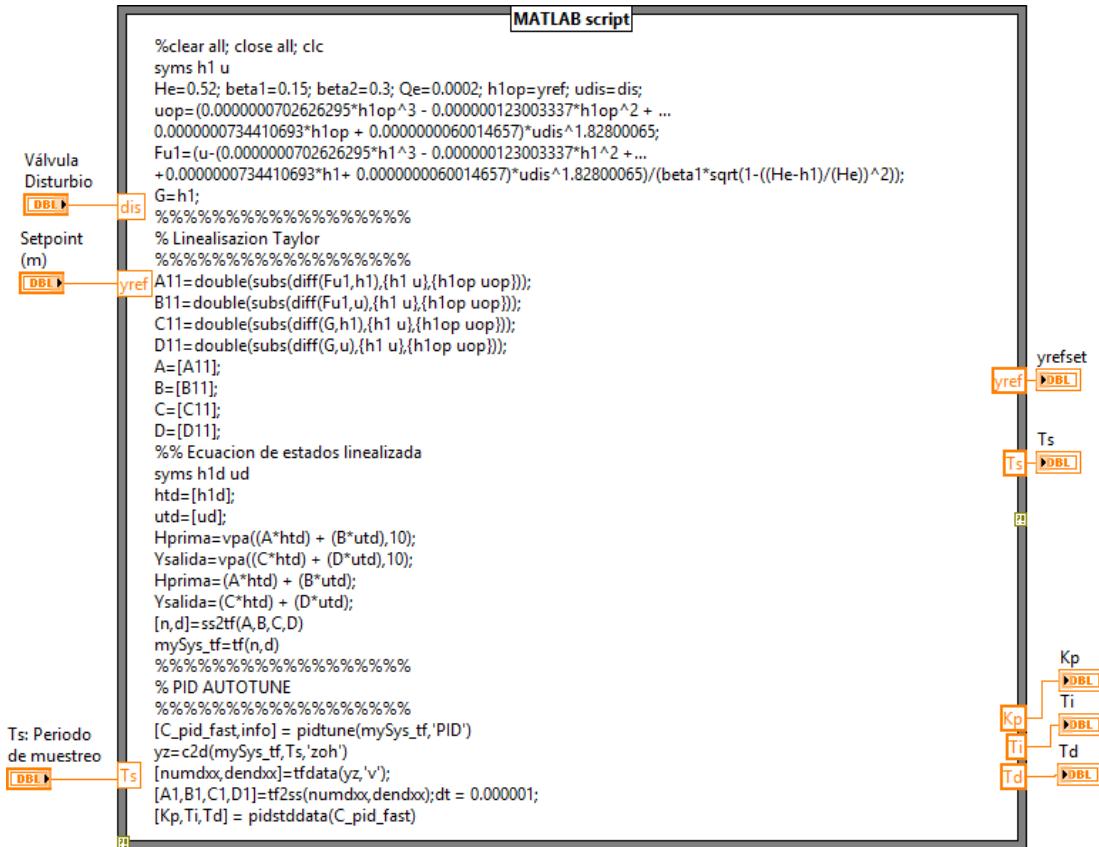
**Figura 4.5. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

#### 4.1.2. Sintonización del PI con Pidtune

El método que provee Matlab para la sintonización mediante esta función, usa un algoritmo basado en el dominio de la frecuencia que fue desarrollado por

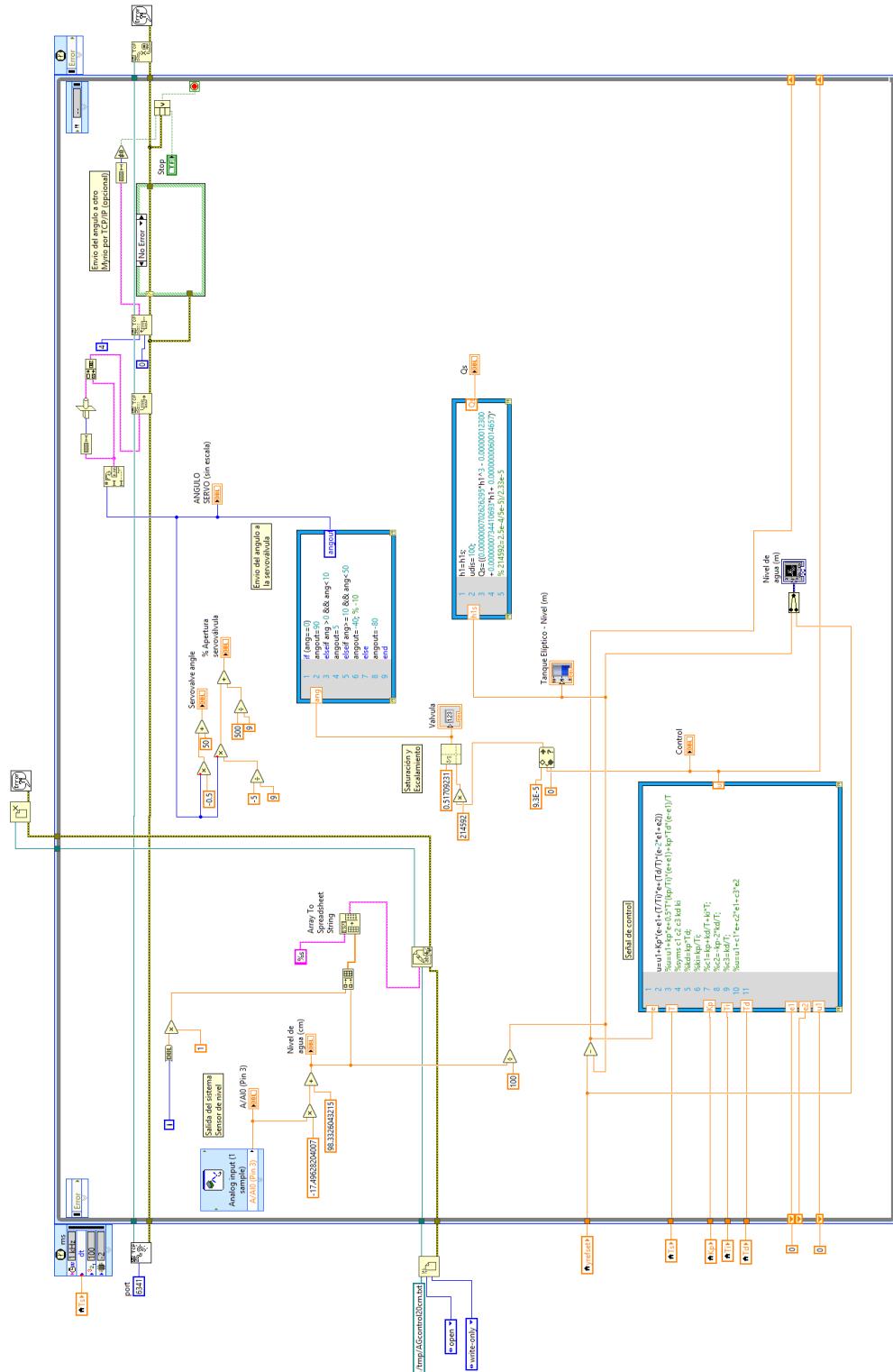
Mathworks. Para la implementación de este método, los pasos a seguir fueron los mismos seguidos anteriormente, con la diferencia que se incluye la función Pidtune dentro del *script* en el diagrama de bloques de su correspondiente VI.

- Las variables de inicialización, *setpoint*, tiempo de muestreo y válvula de disturbio ingresan al algoritmo de la figura 4.6., donde se calcula la planta linealizada y se ejecuta la función Pidtune sobre la planta hallada.



**Figura 4.6. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

- Cuando se obtienen las constantes de *Kp* y *Ti*, estas se envían a través de sus respectivas variables locales al *script* dentro del bucle de la figura 4.7.. Luego la señal discreta se actualiza cada 0.1s según el tiempo de muestreo.

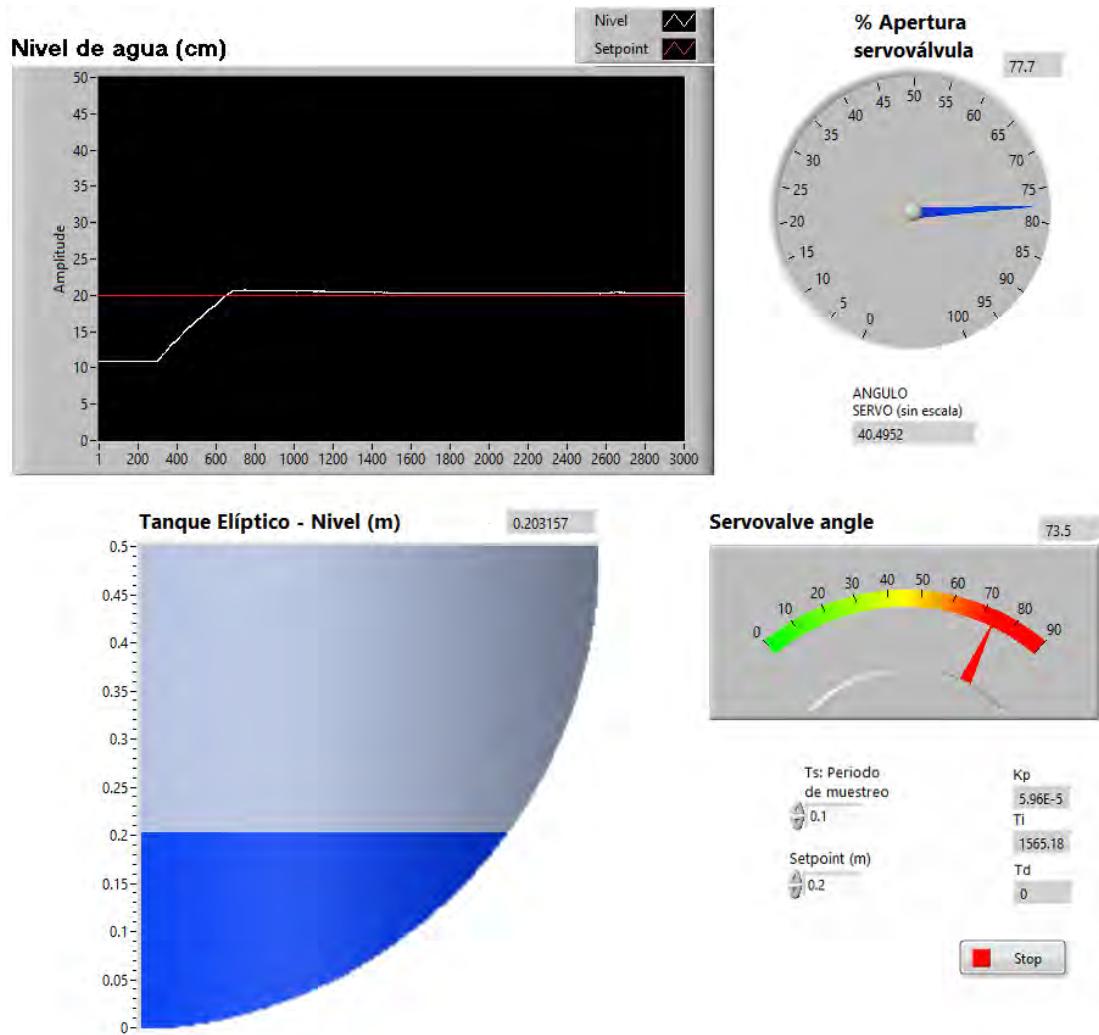


**Figura 4.7. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

- En el bucle ingresa también el *setpoint* para compararse con la señal de

salida, lo cual produce una señal de error que se enviará al control que forma parte del lazo cerrado.

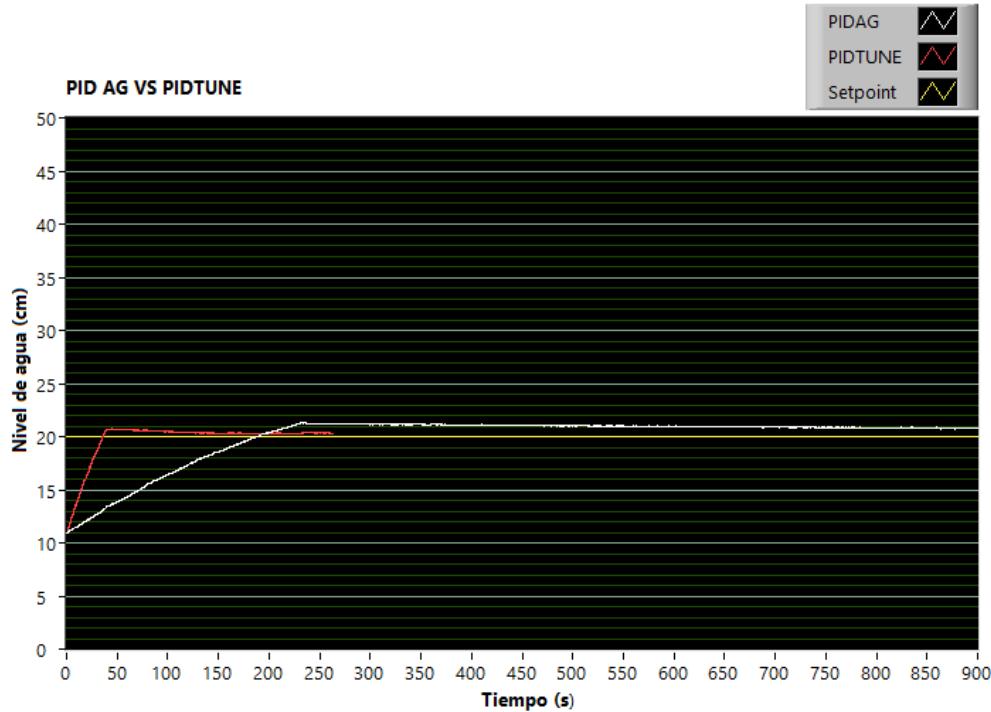
- Asimismo, la señal de control es escalada y limitada como en el paso anterior.
- Para hacer una prueba del Control con Pidtune, se utilizó el *setpoint* igual a 20cm y una válvula de disturbio abierta al 50%, también se empezó el proceso con una altura de agua inicial en el tanque de 10cm. En la figura 4.8., se observa el panel de control del VI, donde la planta empieza a estabilizarse en 700 décimas de segundo, es decir en 1 minuto con 10 segundos. Luego en 1600 décimas de segundo (2min con 40 segundos), que el nivel del tanque se aproxima lentamente a 20.3cm.



**Figura 4.8. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

#### 4.2. Comparación de los dos métodos de control

En la figura 4.9. se ha superpuesta las gráficas del nivel de agua cuando se utilizan el control con la función Pidtune y el control con Algoritmos Genéticos para determinar las ganancias del control PI. El punto de partida de la gráfica se ha hecho coincidir para ambos casos donde se empieza a efectuar el control con la finalidad de observar el *performance* de uno con respecto al otro.



**Figura 4.9. Respuesta en el tiempo a un escalón unitario de las plantas del Tanque elíptico**

- El tiempo pico del control PI con algoritmos genéticos resulta ser de 234s, y del PI con Pidtune, es 41.8 segundos.
- La estabilización del control con Pidtune resulta alcanzarse en aproximadamente 250 segundos o 4 minutos, mientras que el tiempo de establecimiento para el control con AG demora más de 15 minutos.
- El sobreimpulso del control PI con algoritmos genéticos es de 21.25cm equivalente a un porcentaje de sobreimpulso igual a 6.25%, en tanto que el sobreimpulso con el método de Pidtune es 20.71 a un porcentaje de sobreimpulso de 1.05%.
- Las fronteras de la población del Algoritmo genético, en los casos anteriormente citados, no se han definido específicamente con valores cercanos a lo que un método de sintonización pueda sugerir, cuando se

calcula las ganancias. Esto implica que si se añade al control con algoritmos genéticos, un rango con valores de ganancia cercanos a los calculados con cualquier método, entonces el algoritmo genético es capaz de mejorar incluso los resultados del control PI predecesor.

## **CONCLUSIONES**

1. Se verifica que el diseño mecánico del soporte general, para el sistema de tanques, tiene un factor de seguridad de 2.6, lo cual garantiza el uso de los tanques de agua a plena carga, es decir llenos de líquido sin ocasionar ninguna deformación mayor a  $2.92 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  en la estructura.
2. Se verifica que los componentes electrónicos de las tarjetas PCB no superan los  $83^\circ\text{C}$  al consumir un valor máximo de potencia de  $0.6\text{W}$  a  $24\text{V}$ , lo que permite el uso en el rango de trabajo de temperaturas de cada componente según su manual técnico.
3. Se verifica que el control PI mediante la función Pidtune es 5.2% más eficiente que el método de sintonización con Algoritmos Genéticos, en términos del sobreimpulso para un punto de operación de  $20\text{cm}$ , cuando no se ha establecido límites específicos, donde se elige los miembros de la población del Algoritmo Genético, para las constantes de ganancia.
4. Se verifica que el control PI utilizando la función Pidtune es 3.75 más rápido para alcanzar el tiempo de establecimiento, que usando el método de sintonización con Algoritmos Genéticos, cuando se establece un nivel de referencia de  $20\text{cm}$ , donde los límites de frontera para la selección del rango de la población del Algoritmo Genético no esta establecida.

5. Se verifica que la velocidad para alcanzar el tiempo pico por el control PI obtenido mediante el método de la función Pidtune es 5.7 veces más rápido que cuando se hace uso del método de sintonización con Algoritmos Genéticos, para una nivel de referencia de 20cm y sin un límite de frontera en la elección de la población del algoritmo.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda limitar las fronteras para la elección de los miembros de la población del Algoritmo Genético, ya que puede ser útil precisar en qué rango se puede encontrar los mejores candidatos para las ganancias del control en cada iteración.
2. Se recomienda para una posterior investigación, analizar el control del sistema con múltiples entradas y salidas mediante el uso del Control no lineal, donde se podría ofrecer una mejor eficiencia en los tiempos de establecimiento y tiempo pico.
3. Se recomienda estudiar la posible existencia de un sistema de una entrada y múltiples salidas, a través del control, no de las válvulas, sino de la velocidad de la bomba para suministrar un volumen de agua constante.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Fadali, M. (2009). Digital Control Engineering. Elsevier, Burlington.
- [2] Ogata, K. (2010). Introducción a los sistemas de Control y Modelado matemático de sistemas de control.
- [3] Owa, K., Sharma, S., y Sutton, R. (2015). A wavelet neural network based non-linear model predictive controller for a multi-variable coupled tank system. International Journal of Automation and Computing, 12:156–170.
- [4] Prasad, T. y Nagaraju, N. (2015). Artificial intelligence based liquid level control of coupled tanks using fuzzy logic controller. International Journal of latest trends in Engineering and Technology, 5:47–55.
- [5] Pritchard, P. y Leylegian, J. (2011). Fluid Mechanics. Wiley, Massachusetts.
- [6] Rosinová, D. y Kozáková, A. (2012). Decentralized robust control of mimo systems: Quadruple tank case study. IFAC Proceedings Volumes, 45:72–77.
- [7] Senthilkumar, S. y Lincon, A. (2012). Design of stabilizing pi controller for coupled tank mimo process. International Journal of Engineering Research and Development, 3:47–55.
- [8] Siemens (2019). Probe lu 279. [https://www.equysis.com/producto/probe-lu\\_279](https://www.equysis.com/producto/probe-lu_279).

## **ANEXOS**

**ANEXO A**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

TÍTULO	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y $f(x)$	INDICADORES	MÉTODO
"Diseño e implementación de una estrategia de control para un modelo no lineal aplicado a un sistema multitanques en procesos industriales, basado en algoritmos genéticos"	<b>PROBLEMA GENERAL:</b> Brindar un módulo de entrenamiento para el uso en los cursos de control y avances dentro de la Facultad de Ingeniería Mecánica.  <b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) ¿Qué tipo de módulos son necesarios en la Facultad de Ingeniería Mecánica para el entrenamiento de los estudiantes en las áreas de control y automatización?</li> </ul>	<b>OBJETIVO GENERAL:</b> Brindar un módulo de entrenamiento para Los módulos industriales de control de nivel pueden ofrecer un material didáctico de estudio capaz de ser implementados mediante diferentes estrategias de control	<b>HIPÓTESIS PRINCIPAL:</b> Los módulos industriales de control de nivel pueden ofrecer un material didáctico de estudio capaz de ser implementados mediante diferentes estrategias de control	<b>VARIABLE DEPENDIENTE (y):</b> — Entrenamiento de los alumnos en el área de control y automatización	a) Mayores espacios en b) Mayor número de alumnos en ingeniería mecatrónica c) Mayor demanda de profesionales en el campo de la automatización y control d) Crecimiento paulatino de la industria 4.0 nacional	<b>TIPO DE LA INVESTIGACIÓN</b> Aplicada, experimental y descriptivo
	<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) ¿Qué cursos de la Facultad de Ingeniería Mecánica pueden utilizar el módulo en sus laboratorios?</li> <li>b) ¿Cómo se implementará el diseño mecatrónico para un sistema multitanques en cascada y modo de operación independiente?</li> <li>c) ¿Qué y cuantos sistemas de control se pueden definir en el módulo?</li> <li>d) ¿Cuántos controladores se podrán usar para la implementación del módulo?</li> <li>e) ¿En qué medida los tipos de control influencian el rendimiento de cada uno?</li> </ul>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</b> Diseñar un sistema mecatrónico que cumpla con el rol de adquisición de datos, control y monitoreo del nivel de líquido, sobre un sistema multitanques acoplados de estructura variable.	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS:</b> En el diseño eléctrico y electrónico se presume que se elaboraran tarjetas electrónicas y se diseñará una caja eléctrica para poder recibir las señales analógicas y digitales de los sensores y actuadores.	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE (x):</b> — Necesidad de contar con más módulos de control	a) Evaluación del diseño mechatrónico b) Implementos del módulo en diferentes cursos de Control c) Programación remota del módulo de control d) Utilización de diversos tipos de controladores	<b>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</b> Los métodos usados en este proyecto son de hipotético deductivo, observación y experimentación científica

**ANEXO B**

**CÓDIGOS GENERADOS**

### **B.1. Códigos de PID**

El siguiente código de Matlab explica como funciona el algoritmo de control.

```

1 %clear all; close all; clc
2 syms h1 h2 u
3 He=0.52;
4 beta1=0.15;
5 yref=0.2;
6 h1op=yref;
7 udis=100;
8 Ts=0.1;
9 uop=(0.0000000702626295*h1op^3 - ...
       0.000000123003337*h1op^2 + ...
10 0.0000000734410693*h1op + ...
       0.0000000060014657)*udis^1.82800065;
11 Fu1=(u-(0.0000000702626295*h1^3 - ...
       0.000000123003337*h1^2 + ...
12 +0.0000000734410693*h1+ ...
       0.0000000060014657)*udis^1.82800065)...
13 /(beta1*sqrt(1-((He-h1)/(He))^2));
14 %Qs=((0.0000000702626295*h1^3 - ...
       0.000000123003337*h1^2 + ...
15 %+0.0000000734410693*h1+ ...
       0.0000000060014657)*udis^1.82800065)...
16 /(beta1*sqrt(1-((He-h1)/(He))^2))
17 %Fu1=(u-alpha1*sqrt(h1))/...
18 (beta1*sqrt(1-((He-h1)/(He))^2));
19 G=h1;
20 A11=double(subs(diff(Fu1,h1),{h1 u},{h1op uop}));
21 B11=double(subs(diff(Fu1,u),{h1 u},{h1op uop}));
22 C11=double(subs(diff(G,h1),{h1 u},{h1op uop}));
23 D11=double(subs(diff(G,u),{h1 u},{h1op uop}));
24 A=[A11];
25 B=[B11];
26 C=[C11];
27 D=[D11];
28 %% Ecuacion de estados linealizada
29 syms h1d ud
30 htd=[h1d];
31 utd=[ud];
32 %Hprima=vpa((A*htd)+(B*utd),10);
33 %Ysalida=vpa((C*htd)+(D*utd),10);
34 Hprima=(A*htd)+(B*utd);
35 Ysalida=(C*htd)+(D*utd);
36 [n,d]=ss2tf(A,B,C,D);
37 mySys_tf=tf(n,d)
38 [C_pid_fast,info] = pidtune(mySys_tf, 'PID ')
39 [Kp,Ti,Td] = pidstddata(C_pid_fast)

```

```

40 yz=c2d(mySys_tf,Ts,'zoh')
41 [numdxx,dendxx]=tfdata(yz,'v');
42 [A1,B1,C1,D1]=tf2ss(numdxx,dendxx);
43 %step(feedback(C_pid_fast*mySys_tf,1))
44 %%%
45 dt = 0.000001;
46 PopSize = 25;
47 MaxGenerations = 10;
48 s = tf('s');
49 %G = 1/(s*(s*s+s+1));
50 Gs=n(2)/(s + d(2));
51 options = optimoptions(@ga, 'PopulationSize',PopSize, ...
52 'MaxGenerations',MaxGenerations, 'OutputFcn',@myfun);
53 %[x,fval] = ga(@(K) pidtest(Gs,dt,K),3,-eye(3),...
54 zeros(3,1),[],[],[],[],options);
55 [x,fval] = ga(@(K) pidtest(Gs,dt,K),2,-eye(2),...
56 zeros(2,1),[],[],[],[],options);
57 %%
58 Kpag=x(1)
59 Kiag=x(2);
60 %Kdag=x(3);
61 Tix=Kpag/Kiag
62 %Tdx=Kdag/Kpag
63 %C_pid_fastx=pid(Kpag, Kiag, Kdag);
64 C_pid_fastx=pid(Kpag, Kiag);%Kp, ki, kd
65 T_pid_fastx = feedback(C_pid_fastx*mySys_tf,1);
66 %figure
67 %step(T_pid_fastx)
68 %axis([0 100 0 5])

```

**ANEXO C**

**HOJA DE DATOS**

### **C.1. Hoja de datos del sensor de nivel**



# Unbeatable accuracy in ultrasonic level measurement

With the reliability of Sonic Intelligence echo processing



## SITRANS Probe LU

Answers for industry.

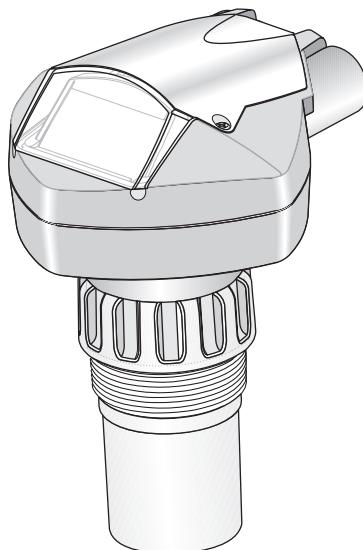
**SIEMENS**

# SITRANS Probe LU (Ultrasonic)

SITRANS Probe LU is a 2-wire loop-powered ultrasonic transmitter for level, volume, and flow monitoring of liquids in storage vessels and simple process vessels, as well as in open channels.

The transducer is available as ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene) or PVDF (polyvinylidene fluoride) to suit the chemical conditions of your application. For applications with varying material and process temperatures, the Probe LU incorporates an internal temperature sensor to compensate for temperature changes.

SITRANS Probe LU uses field-proven Sonic Intelligence® signal processing.



## Applications

### Level, volume or flow

SITRANS Probe LU is designed to measure levels of liquids in a variety of applications:

- storage type vessels
- simple process vessels with some surface agitation
- liquids
- slurries
- open channels

### Volume

By using the volume parameters (P050 to P055) you can obtain the measurement as volume instead of level.

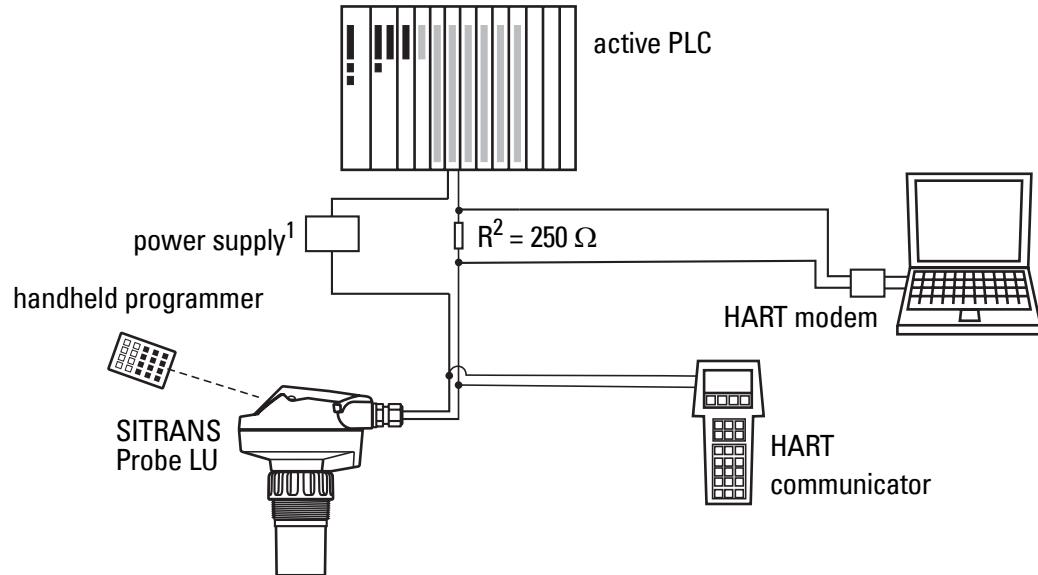
### Flow

If you have an open channel system (a Parshall flume, v-notch weir or other open channel device), you can obtain flow values instead of level. By using the universal linear function of parameter P051, and entering values for Head and Flow in the breakpoint parameters P054 and 055, you can use SITRANS Probe LU to convert head levels into flow rates.

# SITRANS Probe LU System Implementation

SITRANS Probe LU supports the HART communications protocol and SIMATIC® PDM software.

## Typical PLC/mA configuration with HART



SITRANS Probe LU

## Programming

SITRANS Probe LU carries out its level measurement function according to the set of built-in parameters. Parameter changes can be made via the handheld programmer, via a PC using SIMATIC PDM, or via a HART Handheld Communicator.

## SITRANS Probe LU Approvals and Certificates

**Note:** Please see *Approvals* on page 9 for an approvals listing.

- 
1. Depending on the system design, the power supply may be separate from the PLC, or integral to it.
  2. A 250 Ohm resistor may be required if the loop resistance is less than 250 Ohms.

# Specifications

**Note:** Siemens makes every attempt to ensure the accuracy of these specifications but reserves the right to change them at any time.

## SITRANS Probe LU

### Power

<b>!</b> Nominal 24 V DC at max. 550 Ohm.	For other configurations, see the chart <i>Loop Voltage versus Loop Resistance</i> on page 89.
<ul style="list-style-type: none"><li>• Maximum 30 V DC</li><li>• 4 to 20 mA</li><li>• Max startup current</li></ul>	see <i>Startup Behavior</i> on page 86

### Performance<sup>1</sup>

Reference operating conditions according to IEC 60770-1

- ambient temperature +15 to +25 °C
- humidity 45 to 75% relative humidity
- ambient pressure 860 to 1060 mbar

Measurement Accuracy (measured in accordance with IEC 60770-1)

- non-linearity (accuracy) greater of 6 mm (.24") or 0.15% of span (including hysteresis and non-repeatability)
- non-repeatability 3 mm (0.19") [included in non-linearity specification]
- deadband (resolution) 3 mm (0.19") [included in non-linearity specification]
- hysteresis error 0 mm

Analog Output Accuracy (measured in accordance with IEC 60770-1)

- non-linearity (accuracy) 0.125% of span (including hysteresis and repeatability)
- non-repeatability 0.025% of span (included in non-linearity specification)
- deadband (resolution) 0.0375% of span [included in non-linearity specification]
- hysteresis error 0%

Frequency 54 KHz

Measurement range<sup>2</sup> 6 m (20 ft) model: 0.25 m to 6 m (10" to 20 ft) liquid  
12 m (40 ft) model: 0.25 m to 12 m (10" to 40 ft) liquid

1. Reference conditions.

2. Reference point for measurement is the transducer face.

Blanking distance <sup>2</sup>	0.25 m (0.82 ft)
Update time at 4mA	≤ 5 s
Beam angle	10° at -3 dB boundary
Temperature compensation	built in to compensate over temperature range
Memory	non-volatile EEPROM, no battery required

## Interface

- HART
  - configuration
  - analog output
  - display (local)
- standard, integral to analog output  
Siemens SIMATIC PDM (PC), or HART handheld communicator, or Siemens infrared handheld programmer  
4–20 mA ± 0.02 mA accuracy  
multi-segment alphanumeric liquid crystal with Bar graph (representing level)

## Programmer (infrared keypad)

Siemens Infrared IS (Intrinsically Safe) Handheld Programmer: for all locations, including hazardous.

- approval
  - ambient temperature
  - interface
  - power
  - weight
  - color
- ATEX II 1 G EEx ia IIC T4, SIRA 01ATEX2147  
FM/CSA Class I, Div. 1, Groups A, B, C, D  
-20 to +40 °C (-5 to +104 °F)  
proprietary infrared pulse signal  
3V lithium battery (non-replaceable)  
150 g (0.3 lb)  
black

## Mechanical

### Process Connections

- threaded connection
  - flange connections
  - other connections
- 2" NPT, BSP, or G (EN ISO 228-1) / PF2 (JIS B 0202)  
3" (80 mm) universal flange  
FMS 200 mounting bracket, or customer-supplied mount

### Transducer (2 options)

- ETFE (ethylene-tetrafluoroethylene), or
- PVDF (polyvinylidene fluoride)

**Enclosure**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• body construction</li> <li>• lid construction</li> <li>• cable inlet</li> <li>• ingress protection</li> </ul> | PBT (polybutylene terephthalate)<br>hard-coated PEI (polyether imide)<br>2 x M20x1.5 conduit gland, or 2 x 1/2" NPT thread<br>Type 4X / NEMA 4X, Type 6 / NEMA 6, IP67, IP68 (see note below) |
|--|---|

**Notes:**

- Please check the ambient and operating temperatures under *Environmental* on page 8, and *Process* on page 8; also check *Approvals (verify against device nameplate)* on page 9, for the specific configuration you are about to use or install.
- The use of approved watertight conduit hubs/glands is required for Type 4X / NEMA 4X, Type 6 / NEMA 6, IP67, IP68 (outdoor application).

**Weight**

Standard model	2.1 kg (4.6 lb.)
----------------	------------------

**Environmental**

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• location</li> <li>• altitude</li> <li>• ambient temperature</li> <li>• relative humidity</li> </ul> | indoor/outdoor<br>5000 m (16,404 ft) max.<br>–40 to +80 °C (–40 to +176 °F)<br>suitable for outdoor<br>(Type 4X / NEMA 4X, Type 6 / NEMA 6, IP67, IP68 enclosure) |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• installation category</li> <li>• pollution degree</li> <li>• pressure rating</li> </ul>             | I<br>4<br>0.5 bar g/7.25 psi g  |

**Process**

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• temperature (at flange or threads)</li> <li>• pressure (vessel)</li> </ul> | –40 to +85 °C (–40 to +185 °F)<br>0.5 bar g/7.25 psi g |
|---|--|

# Quick Start (P001 to P010)

## P001 Operation

**Note:** Default values are indicated with an asterisk (\*) in the parameter tables, unless explicitly described.

*Sets the type of measurement required for the application. (This affects the local LCD only: the primary variable for HART is controlled by P201.)*

To measure how full the vessel is, select **Level**. The reading can be returned as level or as volume:

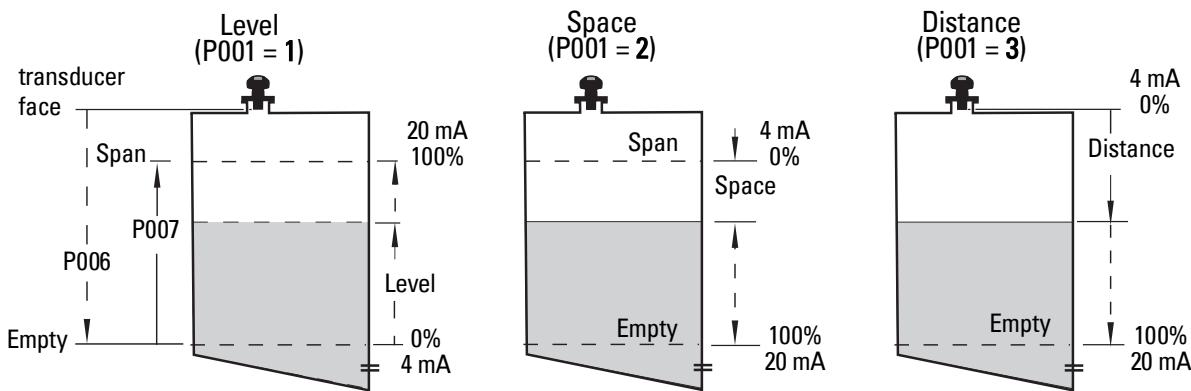
- for a level reading, ensure P050 is set to **0**: the reading returns the distance from process empty level (Empty) to the current level
- for a volume reading, select a vessel shape at P050, and set volume parameters 051 to 055 as required

To measure how much space remains in the vessel, select **Space**:

- **Space** returns a reading for the distance between current level and process full level (Span)

To measure the distance from the transducer face to the current level, select **Distance**.

<b>Values</b>	<b>0</b>	Instrument out of service.
	<b>1</b> *	<b>Level</b> returns material level referenced from Empty (process empty level). The reading is returned in volumetric units if parameters 050 to 055 are set to enable this.
	<b>2</b>	<b>Space</b> returns material level referenced from Span (process full level).
	<b>3</b>	<b>Distance</b> returns material level referenced from the transducer face.



**Notes:**

- Setting P001 resets Span (P007), unless Span has previously been set to a different value. Span is set to Empty distance minus 110% of Blanking<sup>1</sup> unless P001 is set to 3 (distance measurement). In this case Span is set to the same value as Empty (P006).
- Changing P001 may reset Output Function (P201).

## P002 Material to be monitored

**Note:** For use only by Siemens service personnel.

## P003 Measurement Response

*Sets the rate of response to level changes.*

Related Parameters	P003			Failsafe Timer P070 (minutes)	Max. Measurement Response P700/P701	Damping Filter P709	Echo Verification P711
Values	1	*	slow	100.00	0.100 m/minute	10.000 s	2
	2		medium	10.00	1.000 m/minute	10.000 s	2
	3		fast	1.00	10.000 m/minute	1.000 s	2

**Note:** Changing P003 resets the following parameters: P070, P700, P701, P709, and P711.

Use a setting just faster than the maximum filling or emptying rate (whichever is greater). Slower settings provide higher accuracy; faster settings allow for more level fluctuation.

- **Echo Verification (P711):** discriminates between agitator blades in motion (spurious noise) and the target surface (true echo).
- **Failsafe timer (P070):** establishes the period from the time a loss of echo (LOE) starts until the Failsafe default (P071) is triggered. P070 takes precedence over P003.

<sup>1</sup>. Blanking distance is 0.25 m (10"). See *Blanking Distance* on page 83 for more details.

## P005 Units

*Specifies measurement units used for dimensional values.*

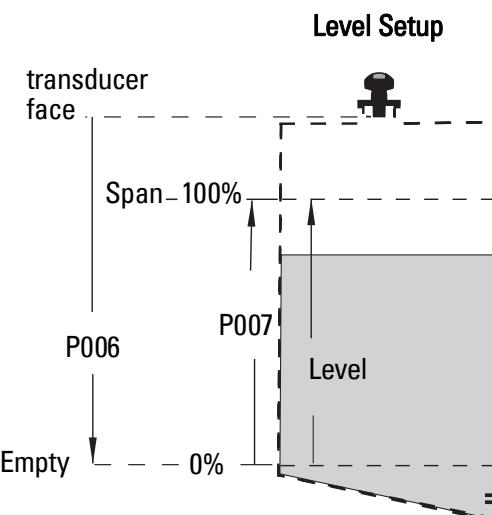
<b>Values</b>	1	*	meters
	2		centimeters
	3		millimeters
	4		feet
	5		inches

## P006 Empty (process empty level)

*Sets the distance from the transducer face to the process empty level, in units selected at P005.*

<b>Values</b>	Range (depends on model)	0.0000 to 6.00 m (20 ft) or 0.0000 to 12 m (40 ft)
	Default	Max. range: 6.00 m (20 ft) or 12 m (40 ft)

Enter the distance from the transducer face to Empty (process empty level), using units set in P005. Empty can be set to any distance: not necessarily the bottom of the vessel



### Notes:

- Default setting is maximum range.
- P006 and P007 are interlinked: see note attached to P007.

## P007 Span (process full level)

*Sets the range to be measured (referenced from Empty) in units selected at P005.*

<b>Values</b>	Range (depends on model)	0.0000 to 6.00 m (20 ft) or 0.0000 to 12 m (40 ft)
	Default	5.725 m (18.78 ft) or 11.725 m (38.47 ft) See note on next page for more details.

Enter the distance between Empty (process empty level) and Span (process full level), in units set in P005. Span can be set at any distance above Empty level.

**Notes:**

- Setting P006 will reset Span, if it has not previously been set to a different value.
- The default setting for Span is based on Operation (P001) and Empty (P006). Span is set to Empty minus 110% of Blanking<sup>1</sup> distance, unless Operation is set to **Distance** (P001 = 3). In this case, Span is set to Empty distance.
- Always prevent the monitored surface from approaching within 0.3 m (1 ft) of the transducer face. This provides a 0.05 m (2") safety margin, as the minimum detectable distance is 0.25 m (10").

## P010 Language

*Selects the language used for the auxiliary reading on the display.*

<b>Values</b>	<b>0</b>	*	Numeric / None
	<b>1</b>		English
	<b>2</b>		German
	<b>3</b>		French
	<b>4</b>		Spanish

If a language is selected, parameter titles for the Quick Start parameters are displayed. (See the table on page 22 for the titles displayed.)

## Volume (or Flow) P050 to P055

*Set SITRANS Probe LU to calculate readings based on reservoir volume instead of level; see P050 Vessel (or Channel) Shape on page 34 for details on displaying flowrate.*

1. Operation must be set to Level (P001 = 1).
2. Select a vessel shape matching the monitored vessel (P050).
3. If required, add dimensions A or L (as shown in the chart on page 35), using P052 and P053,  
or, if vessel shape 9 is selected, add level and volume breakpoints in P054 and P055.
4. Enter the value for the maximum vessel volume in P051.
5. Return to **RUN** mode: readings are now displayed in volumetric units. To select **PERCENT**, press **▲ %**: the displayed volume reading will be a percentage of Maximum Volume.

---

<sup>1</sup>. Blanking distance is 0.25 m (10").

## P050 Vessel (or Channel) Shape

*Defines the vessel (or open channel) shape (see chart on next page) and allows SITRANS Probe LU to calculate volume or flow instead of level. The default setting for P050 is 0 (volume calculation not required).*

Enter the value for the vessel shape matching the monitored vessel or reservoir (see chart on page 35).

## P051 Maximum Volume

*For readings in volumetric units instead of percentage values, enter the vessel volume corresponding to Span (P007). Any volumetric units can be chosen, because the volume calculation is based on the maximum volume, and scaled according to the Vessel Shape (P050) value. If no value is entered, the default is 100, and the reading will be a percentage value.*

<b>Values</b>	Range	0.0000 to 99999
	Default	100.0
<b>Related Parameters</b>	P006 Empty P007 Span	

Enter the vessel volume corresponding to Span (P007).

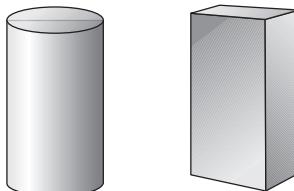
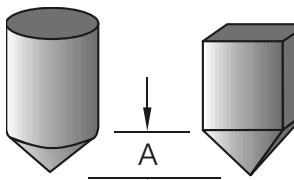
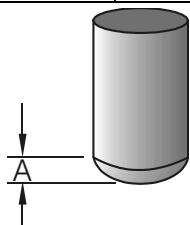
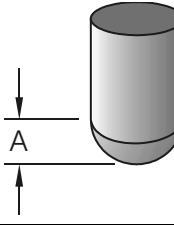
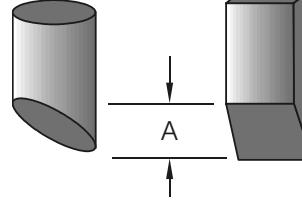
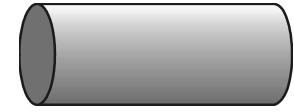
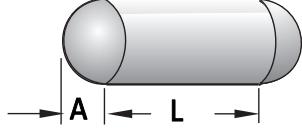
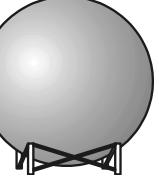
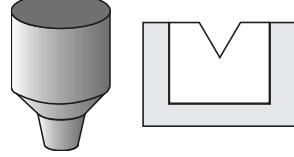
1. Key in the value. (For example, if maximum volume = 3650 m<sup>3</sup>, key in 3650.)
2. Press **ENTER** [].

If the value is too large for the LCD display, enter larger units.

**Example:**

If maximum volume = 267,500 gallons, key in **267.5** (thousands of gallons).).

## Parameters

P050 Value	Vessel Shape	Description	Also required
0	*	----	no volume calculation required N/A
1		flat bottom	P051
2		conical or pyramidal bottom	P051, P052
3		parabolic bottom	P051, P052
4		spherical bottom	P051, P052
5		angled bottom	P051, P052
6		flat end cylinder	P051
7		parabolic end cylinder	P051, P052, P053
8		sphere	P051
9		universal linear level/volume/flow breakpoints	P051, P054, P055

## P052 Vessel Dimension A

*Dimension A as used for P050 Vessel Shapes 2, 3, 4, 5, or 7 in the chart on page 35.*

<b>Values</b>	Range	0.0000 to 99999 in units (P005)
	Default	0.0
	-----	Display when P050 = 0
<b>Related Parameters</b>	P050 Vessel Shape	

Enter one of the following, using the units selected in P005:

- height of the vessel bottom if P050 = 2, 3, 4, or 5
- length of one end-section of the vessel if P050 = 7

## P053 Vessel Dimension L

*Dimension L as used in P050 Vessel Shape 7 in the chart on page 35.*

<b>Values</b>	Range	0.0000 to 99999 in units (P005)
	Default	0.0
	-----	Display when P050 = 0
<b>Related Parameters</b>	P050 Vessel Shape	

Enter the vessel length L (excluding both end sections) if P050 = 7. Use the units selected in P005.

## P054 Level or Head Breakpoints

*P054 and 055 can be used to calculate either level and volume in a vessel, or head level and flow rate in an open channel device. (For more information on Open Channel Monitoring, please see Open Channel Monitoring (OCM) on page 85).*

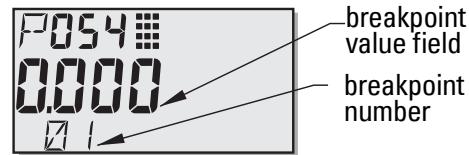
### Level Breakpoints

*When the vessel shape is too complex for any of the preconfigured shapes, you can define the shape as a series of segments. In P054 you assign a level value to each breakpoint. In P055 you assign a corresponding volume value to each breakpoint.*

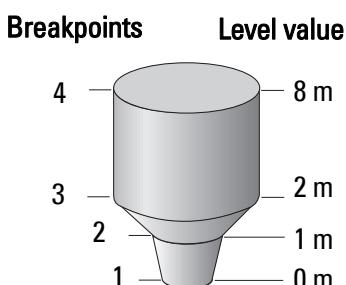
<b>Primary Index</b>	P054	
<b>Secondary Index</b>	Breakpoint number	
<b>Values</b>	Range	0.0000 to 99999 in units (P005)
	Default	0.000
<b>Related Parameters</b>	P055 Volume or Flow Breakpoints	

Enter up to 32 level breakpoints, where the corresponding volume is known. The 100% and 0% levels must be entered. The breakpoints can be ordered from top to bottom, or the reverse.

1. First set P050 to **9**.
2. Select P054.
3. The default breakpoint value appears, with the breakpoint number in the auxiliary reading.
4. Press **DISPLAY**  twice to focus control on the secondary index<sup>1</sup> (the auxiliary reading field goes blank).
5. Key in 1 and press **ENTER** .
6. Key in the level value for breakpoint 1, and press **ENTER** .
7. Repeat steps 7 and 8 until level values have been entered for all the required breakpoints.
8. Press **DISPLAY**  twice and use the **UP ARROW** key  to go to P055.



#### Example:



Breakpoint number	Level breakpoint (P054)	Volume breakpoint (P055)
1	0	0
2	1	200
3	2	1200
4	8	3200

**Note:** Illustrated values for P054 and P055 are for example purposes only.

<sup>1</sup>. For more details on secondary index operation, see page 29.

## **C.2. Hoja de datos de la válvula proporcional**

## Data sheet

# Servo-operated 2-way proportional solenoid valves

## Type EV260B



EV260B is a proportional (modulating) servo-operated 2-way solenoid valve with connections from 1/4" to 3/4".

Through stepless regulation of the coil current, the armature can be placed in any position in the armature tube, thus setting the valve to any position between completely closed and completely open.

The valve is fully open when the coil current has reached its maximum value.

**Features and versions:**

- For water, oil and similar neutral liquids
- Linear characteristic throughout the regulation range
- Closes on power failure (fail-safe function)
- Flow range from 0.5 – 12.7 m<sup>3</sup>/h
- Differential pressure from: 7.25 – 145 psi
- Media temperature from: 14 – 176 °F
- Ambient temperature: Up to 122 °F
- Coil enclosure: Up to IP67
- Viscosity: Up to 50 cSt
- Thread connections: From G/NPT 1/4 – 3/4"
- DN 6 – 20
- Brass version NC
- Standard 4–20 mA or 0–10 V d.c. pilot signal
- Available with G and NPT thread.

**Brass valve body, NC  
G thread**


Connec-tion ISO 228/1	Seal material	Orifice size	k <sub>v</sub> - value [m <sup>3</sup> /h]	Differential pressure min. to max. [bar] / coil type			Media temperature min. to max. [°C]	Code number
				Terminal box	Signal converter 0 – 10V	Signal converter 4 – 20 mA		
				20 W d.c.	20 W d.c.	20 W d.c.		
G 1/4	PTFE	6	0.8	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8052</b>
G 3/8	PTFE	6	0.8	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8053</b>
G 3/8	PTFE	10	1.3	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8054</b>
G 1/2	PTFE	10	1.3	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8055</b>
G 1/2	PTFE	15	2.1	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8056</b>
G 3/4	PTFE	20	5.0	0.5 – 10	0.5 – 10	0.5 – 10	-10 – 80	<b>032U8057</b>

**Brass valve body, NC  
NPT thread**


Connec-tion ISO 228/1	Seal material	Orifice size [inch]	C <sub>v</sub> - value [USgal/min]	Differential pressure min. to max. [psi] / coil type			Media temperature min. to max. [°F]	Code number
				Terminal box	Signal converter 0 – 10V	Signal converter 4 – 20 mA		
				20 W d.c.	20 W d.c.	20 W d.c.		
NPT 1/4	PTFE	1/4	0,9	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8062</b>
NPT 3/8	PTFE	1/4	0,9	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8063</b>
NPT 3/8	PTFE	3/8	1,5	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8064</b>
NPT 1/2	PTFE	3/8	1,5	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8065</b>
NPT 1/2	PTFE	9/16	2,4	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8066</b>
NPT 3/4	PTFE	3/4	5,8	7 – 145	7 – 145	7 – 145	14 – 176	<b>032U8067</b>

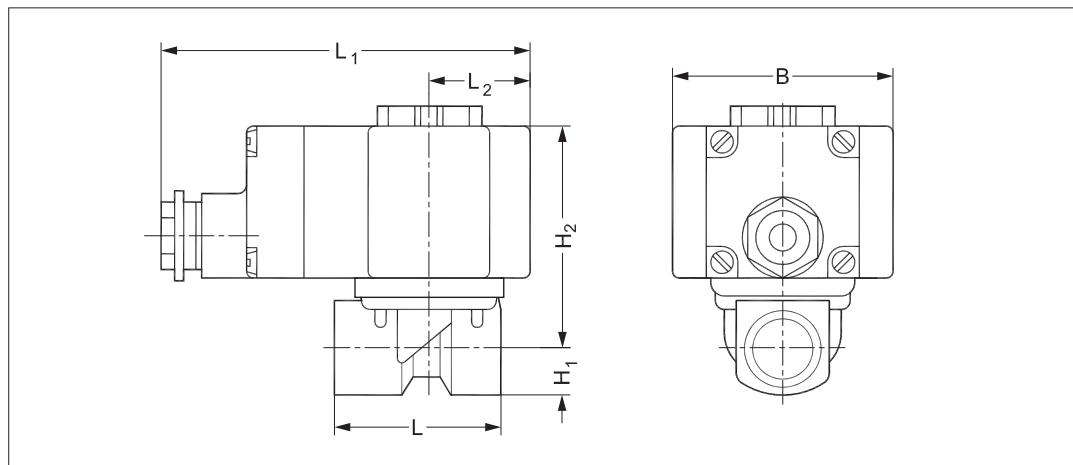
**Technical data, valve**

Installation	Vertical solenoid system is recommended.		
Pressure range	0.5 – 10 bar / 7 – 145 psi		
Max. test pressure	15 bar / 217 psi		
Rangeability	Better than 1:20 (5-100%)		
Ambient temperature	Up to 50 °C / 122 °F		
Viscosity	Max. 50 cSt		
Materials	Valve body	Brass	W.no. 2.0402
	Armature:	Stainless steel	W.no. 1.4105/AISI 430FR
	Armature tube:	Stainless steel	W.no. 1.4306/AISI 304L
	Spindle:	Stainless steel	W.no. 1.4105/AISI 430FR
	Spring:	Stainless steel	W.no. 1.4568
	O-rings:	NBR / CR	–
	Valve plate:	FKM	–
	Diaphragm:	PTFE	–
	Seat and guide ring:	PTFE	–

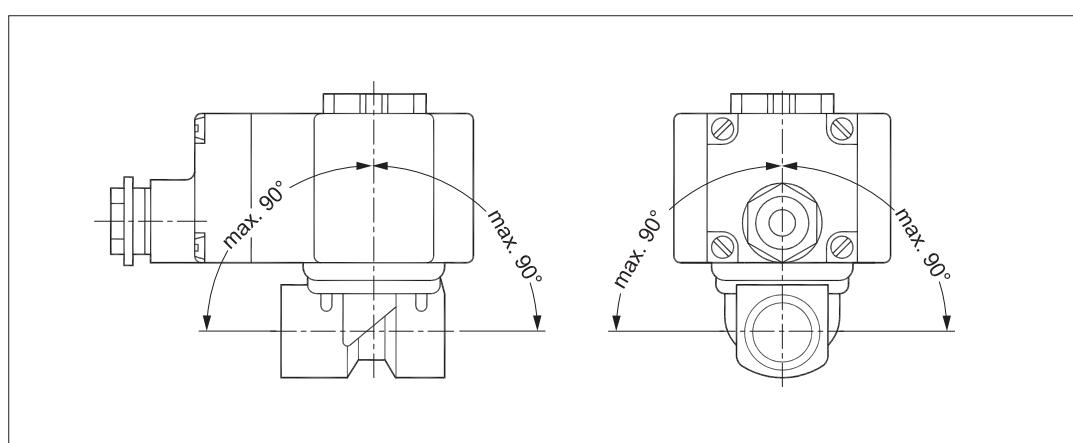
## Dimensions and weight

Type	Weight gross valve body without signal converter [kg]	Weight gross valve body with signal converter [kg]	L [mm]	L <sub>1</sub> with terminal box [mm]	L <sub>1</sub> with signal converter [mm]	L <sub>2</sub> [mm]	H <sub>1</sub> [mm]	H <sub>2</sub> [mm]	B [mm]
EV260B 6	1.02	1.22	62	112	128	30	13	71	68
EV260B 10	1.02	1.22	62	112	128	30	13	71	68
EV260B 15	1.17	1.37	81	112	128	30	15	74	68
EV260B 20	1.71	1.91	98	112	128	30	18	79	68

## Dimensions



## Mounting angle



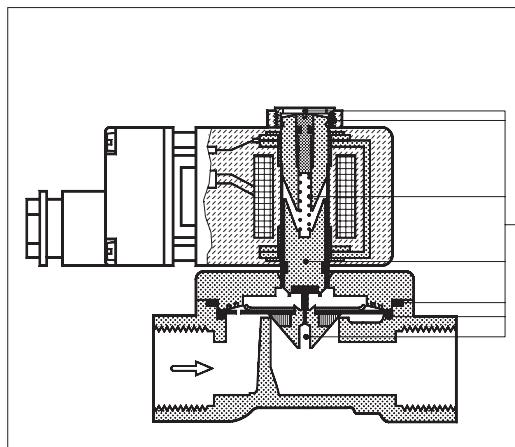
## Below coils can be used with EV260B

Coil	Power consumption	Supply voltage	Enclosure	Features	Code number
	20 W d.c.	24 V full wave rectified	IP67 only including seal kit 018Z0090	Terminal box	<b>018Z6987</b>
	20 W d.c.	21 – 30 V	IP65 only including seal kit 018Z0090	With signal converter Pilot signal: 0 – 10 V 2 meter cable	<b>018Z0290</b>
	20 W d.c.	21 – 30 V	IP65 only including seal kit 018Z0090	With signal converter Pilot signal: 4 – 20 mA 2 meter cable	<b>018Z0291</b>

## Technical data, coil

Insulation of coil windings	400 kΩ for 0 - 10 V pilot signal. 250 Ω for 4 to 20 mA pilot signal
Coil resistance	23.5 Ω at an ambient temperature of 20 °C
Insulation of coil windings	Class H according to IEC 85
Duty rating	Continuous

## Spare parts kit

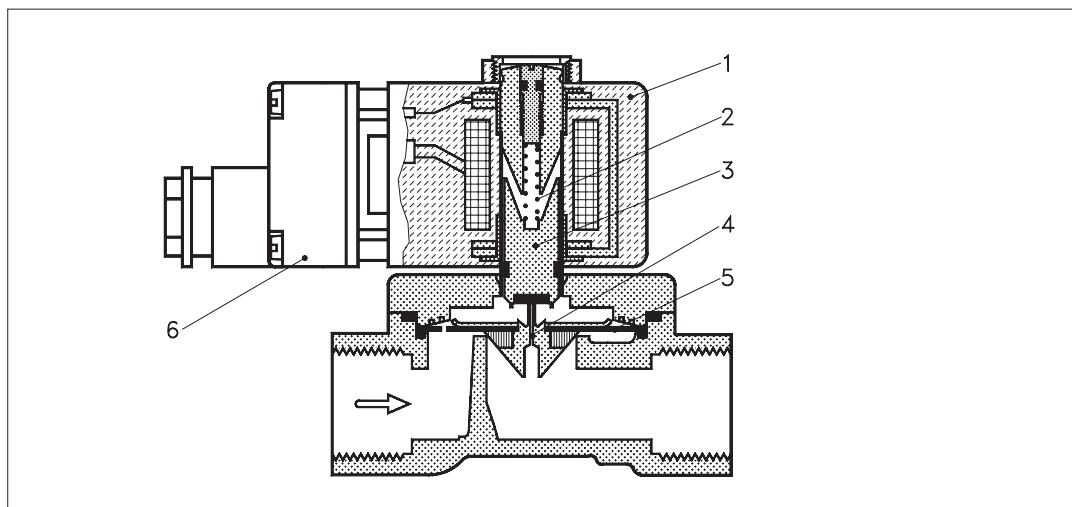


Type	Code number
EV260B 6	032U8039
EV260B 10	032U8040
EV260B 15	032U8041
EV260B 20	032U8042

**EV260B spare parts kit comprises:**

Locking button  
Nut for the coil  
Armature with valve plate and spring  
Diaphragm  
O-ring

## Function



1. Coil
2. Closing spring
3. Armature
4. Pilot orifice
5. Diaphragm
6. Terminal box

Proportional regulation of the opening and closing of the EV260B valves is achieved through stepless regulation of the coil current and thus of the pulling force of the solenoid coil.

When the coil current is increased, the pulling force of the coil (1) will at a certain point exceed the counteracting spring force of the closing spring (2). The armature (3) moves up, opening the pilot orifice (4) in the diaphragm (5), which due to the servo effect follows the armature's movement.

The valve is fully open when the coil current has reached its maximum value.

Through stepless regulation of the coil current the armature can be placed in any position in the armature tube, and the valve thus set to any position between completely closed and completely open.

The effective coil current range for EV260B proportional valves without signal converter is approx. 300-600 mA.

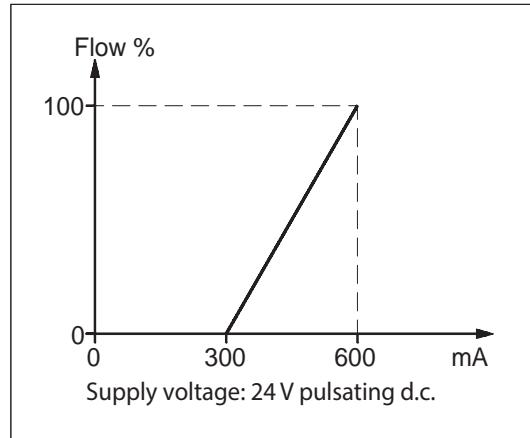
The EV260B valves are also available with a signal converter built in the coil's terminal box (6). The signal converter's output terminals are connected to the solenoid coil.

The signal converter regulates the coil current so that it is proportional to the input signal (pilot signal).

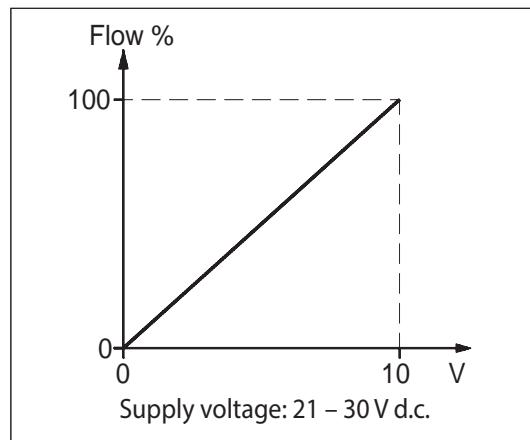
- The pilot signal may be a
- 0 - 10 V d.c. voltage signal
  - or a
  - 4 - 20 mA current signal

**Signal flow characteristics***Coil type BK**Without signal converter*

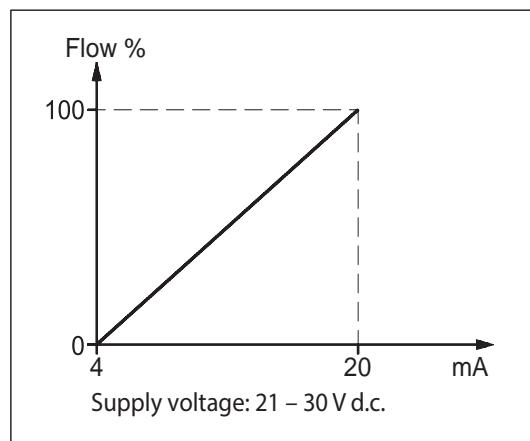
The basic version consists of a valve with a coil for pulsating direct current. The supply voltage of 24 V DC can be established with full-wave rectified alternating current. The valve begins to open at a coil current of approx. 300 mA and is fully open at a coil current of approx. 600 mA. The ratio between coil current and flow between the two outer points is directly proportional.

*Coil type BM**With signal converter and 0-10 V pilot signal*

The ratio between pilot signal and flow is directly proportional throughout the regulation range.

*Coil type BL**With signal converter and 4-20 mA pilot signal*

The ratio between pilot signal and flow is directly proportional throughout the regulation range.



**C.3. Hoja de datos de la bomba de agua PKm60**



## PERFORMANCE RANGE

- Flow rate up to **90 l/min** (5.4 m<sup>3</sup>/h)
- Head up to **100 m**

## APPLICATION LIMITS

- Manometric suction lift up to **8 m**
- Liquid temperature between **-10 °C** and **+60 °C**
- Ambient temperature up to **+40 °C** (**+50 °C** for PK 60)
- Max. working pressure:
  - **6 bar** for PK 60, PK 60-MD, PK 65, PK 70, PK 80
  - **10 bar** for PK 90, PK 100, PK 200, PK 300
- Continuous service **S1**

## CONSTRUCTION AND SAFETY STANDARDS

EN 60335-1  
IEC 60335-1  
CEI 61-150

EN 60034-1  
IEC 60034-1  
CEI 2-3



## CERTIFICATIONS

Company with management system certified DNV  
ISO 9001: QUALITY

## INSTALLATION AND USE

Suitable for use with clean water that does not contain abrasive particles and with liquids that are not chemically aggressive towards the materials from which the pump is made.

Because of their reliability and the fact that they are easy to use and are economical, they are ideal for domestic use and in particular for distributing water in combination with small pressure tanks and for the irrigation of gardens and orchards.

The pump should be installed in an enclosed environment or sheltered from inclement weather.

## PATENTS - TRADE MARKS - MODELS

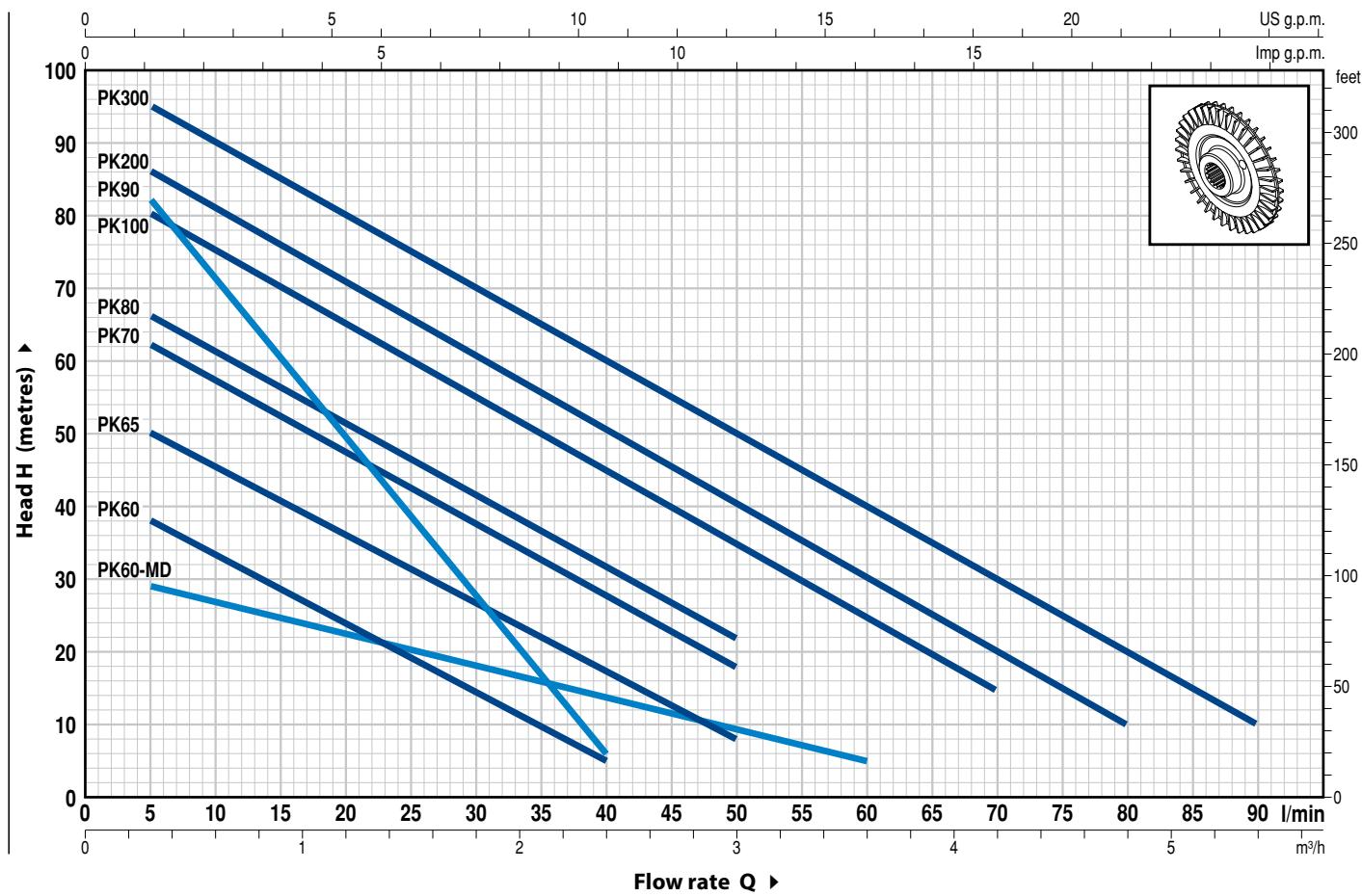
- Motor bracket: patent n. IT1243605
- Shaft: patent n. 0000275945 (PK60, PK65)
- Pump body: patent n. 0000275946 (PK60, PK65)
- Registered EU Design n. 004673192
- **PKm 60**® Registered Trade Mark n. 009875394

## OPTIONS AVAILABLE ON REQUEST

- Pump body with NPT ANSI B 1.20.1 threaded ports
- Special mechanical seal
- Other voltages
- IP X5 class protection for PK 70-80-90-100-200-300

## GUARANTEE

2 years subject to terms and conditions

**CHARACTERISTIC CURVES AND PERFORMANCE DATA**
**60 Hz n= 3450 min<sup>-1</sup> HS= 0 m**


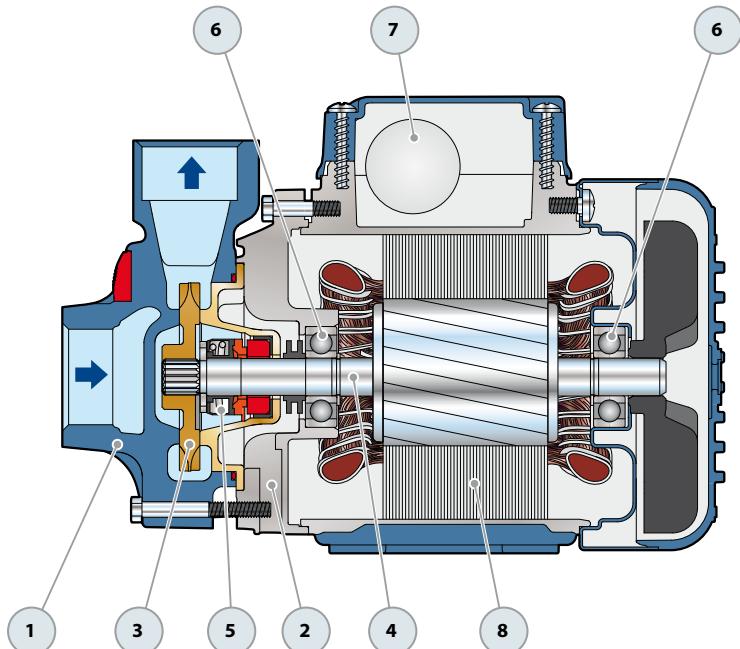
MODEL		POWER (P <sub>2</sub> )		Q m <sup>3</sup> /h l/min	H metres													
Single-phase	Three-phase	kW	HP			0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8
PKm 60°	PK 60°	0.37	0.50	IE2	IE3	40	38	33.5	29	24	19.5	15	10	5				
PKm 60°-MD	PK 60°-MD	0.37	0.50			30	29	26.5	24.5	22.5	20.5	18	16	13.5	9.5	5		
PKm 65	PK 65	0.50	0.70			55	50	45.5	40.5	36	31	27	22	17	8			
PKm 70	PK 70	0.60	0.85			65	62	57	52	47	42	37	32	27	18			
PKm 80	PK 80	0.75	1			70	66	61	56	51	46	41	36.5	31	22			
PKm 90	PK 90	0.75	1			90	82	71	60	49	38	27	17	5				
PKm 100	PK 100	1.1	1.5			85	80	75	70	65	60	55	50	45	35	25	15	
PKm 200	PK 200	1.5	2			90	86	81	76	71	65.5	60	55	50	40	30	20	10
-	PK 300	2.2	3			100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	20

Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height

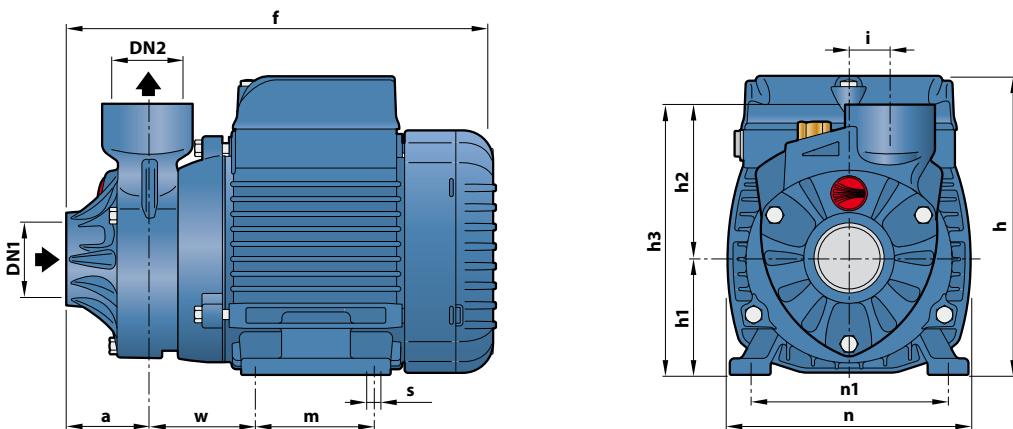
Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 Grade 3B.

▲ Three phase motor efficiency class (IEC 60034-30-1)

POS. COMPONENT	CONSTRUCTION CHARACTERISTICS					
<b>1 PUMP BODY</b>	Cast iron, with threaded ports in compliance with ISO 228/1 (PK 60, PK 60-MD with an Epoxy Electro Coating treatment)					
<b>2 MOTOR BRACKET</b>	Aluminium with brass insert (patented), reduces the risk of impeller seizure					
<b>3 IMPELLER</b>	Brass with peripheral radial vanes					
<b>4 MOTOR SHAFT</b>	Stainless steel EN 10088-3 - 1.4104					
<b>5 MECHANICAL SEAL</b>	<i>Pump</i> <i>Model</i>	<i>Seal</i> <i>Model</i>	<i>Shaft</i> <i>Diameter</i>	Stationary ring	Rotational ring	Elastomer
	<b>PK 60-65-70-80</b>	<b>AR-12</b>	<b>Ø 12 mm</b>	Ceramic	Graphite	NBR
	<b>PK60-MD</b>					
	<b>PK 90</b>	<b>ST1-12</b>	<b>Ø 12 mm</b>	Silicon carbide	Graphite	NBR
	<b>PK 100-200-300</b>	<b>FN-14</b>	<b>Ø 14 mm</b>	Graphite	Ceramic	NBR
<b>6 BEARINGS</b>	<i>Pump</i>	<i>Model</i>				
	<b>PK 60-65</b>	<b>6201 ZZ / 6201 ZZ</b>				
	<b>PK60-MD</b>					
	<b>PK 70-80-90</b>	<b>6203 ZZ / 6203 ZZ</b>				
	<b>PK 100-200-300</b>	<b>6204 ZZ / 6204 ZZ</b>				
<b>7 CAPACITOR</b>	<i>Pump</i>	<i>Capacitance</i>				
	<i>Single-phase</i> <b>PKm 60</b>	<b>(220 V)</b>	<b>(110 V or 127 V)</b>			
	<b>PKm60-MD</b>	<b>10 µF - 450 VL</b>	<b>25 µF - 250 VL</b>			
	<b>PKm 65</b>	<b>14 µF - 450 VL</b>	<b>25 µF - 250 VL</b>			
	<b>PKm 70</b>	<b>16 µF - 450 VL</b>	<b>60 µF - 300 VL</b>			
	<b>PKm 80</b>	<b>20 µF - 450 VL</b>	<b>60 µF - 300 VL</b>			
	<b>PKm 90</b>	<b>20 µF - 450 VL</b>	<b>60 µF - 300 VL</b>			
	<b>PKm 100</b>	<b>31.5 µF - 450 VL</b>	<b>60 µF - 250 VL</b>			
	<b>PKm 200</b>	<b>45 µF - 450 VL</b>	<b>80 µF - 250 VL</b>			
<b>8 ELECTRIC MOTOR</b>	<b>PKm:</b> single-phase 220 V - 60 Hz with thermal overload protector incorporated into the winding. <b>PK:</b> three-phase 220/380 V - 60 Hz or 220/440 V - 60 Hz. ► The three-phase pumps are fitted with high performance motors up to $P_2=0.50 \text{ kW}$ in class IE2 and from $P_2=0.60 \text{ kW}$ in class IE3 (IEC 60034-30-1) – Insulation: class F – Protection: IP X4					



## DIMENSIONS AND WEIGHT



MODEL		PORTS		DIMENSIONS mm												kg		
Single-phase	Three-phase	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	h3	i	m	n	n1	w	s	1~	3~	
PKm 60°	PK 60°	1"	1"	39	207	145	56	75	131	20	55	118	93-100	53	7	5.2	5.2	
PKm 60°-MD	PK 60°-MD				236	152	63		138		80	120	100			5.6	5.6	
PKm 65	PK 65				55	285	180 *	71	85		90	140	112	62		7.0	6.2	
PKm 70	PK 70				55	285			156							10.0	9.9	
PKm 80	PK 80				46	278			84							10.0	9.9	
PKm 90	PK 90				350	55	212	80	94	174	20	100	164	125	85	9	10.0	10.0
PKm 100	PK 100				370											14.4	14.3	
PKm 200	PK 200				370											15.5	15.5	
-	PK 300				-											18.1		

(\*) h=199 mm for single phase versions at 110V or 127 V

## ABSORPTION

MODEL	VOLTAGE		
Single-phase	220 V	110 V	127 V
PKm 60°	2.6 A	5.5 A	5.3 A
PKm 60°-MD	3.2 A	6.5 A	6.0 A
PKm 65	5.8 A	11.6 A	10.0 A
PKm 70	5.2 A	10.8 A	10.0 A
PKm 80	6.5 A	13.0 A	12.0 A
PKm 90	6.0 A	12.0 A	11.0 A
PKm 100	9.0 A	18.0 A	16.5 A
PKm 200	12.0 A	24.0 A	22.3 A

MODEL	VOLTAGE			
Three-phase	220 V	380 V	220 V	440 V
PK 60°	2.0 A	1.15 A	2.1 A	1.2 A
PK 60°-MD	2.1 A	1.2 A	2.2 A	1.3 A
PK 65	3.2 A	1.85 A	3.5 A	2.0 A
PK 70	3.8 A	2.2 A	3.8 A	2.2 A
PK 80	3.8 A	2.2 A	4.3 A	2.4 A
PK 90	4.2 A	2.4 A	4.2 A	2.4 A
PK 100	6.2 A	3.6 A	6.2 A	3.15 A
PK 200	9.5 A	5.6 A	7.0 A	4.2 A
PK 300	10.0 A	5.8 A	8.2 A	4.8 A

## PALLETIZATION

MODEL	GROUPAGE		CONTAINER
Single-phase	Three-phase	n. pumps	n. pumps
PKm 60°	PK 60°	240	330
PKm 60°-MD	PK 60°-MD	189	243
PKm 65	PK 65	189	243
PKm 70	PK 70	102	170
PKm 80	PK 80	102	170
PKm 90	PK 90	102	170
PKm 100	PK 100	72	96
PKm 200	PK 200	72	96
-	PK 300	72	96

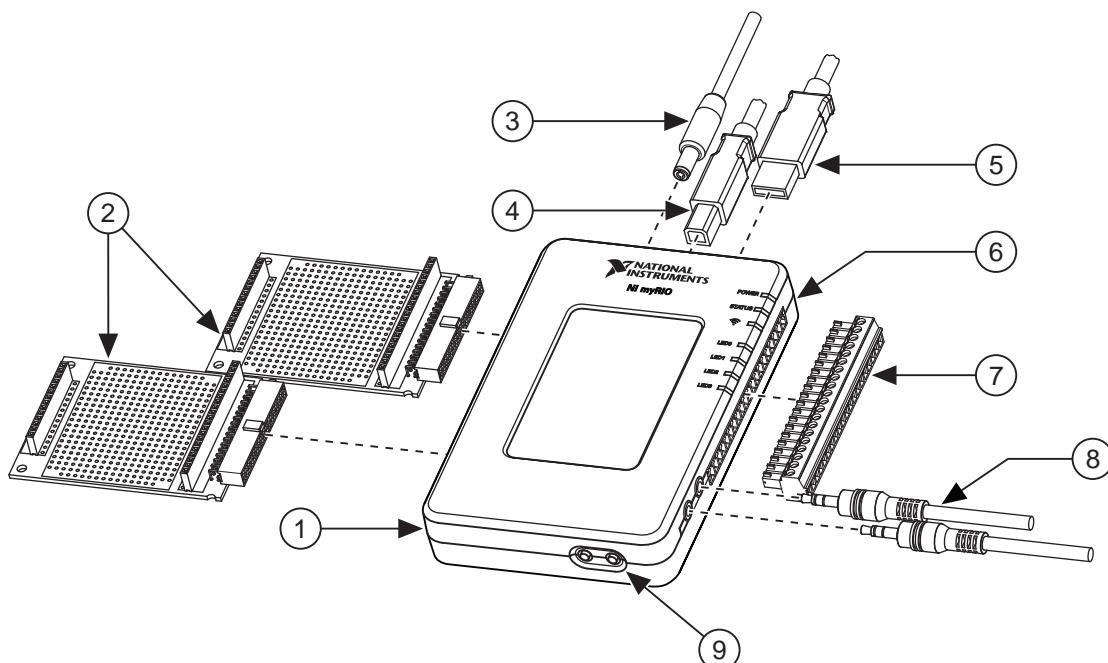
#### **C.4. Hoja de datos del Myrio**

# USER GUIDE AND SPECIFICATIONS

# NI myRIO-1900

The National Instruments myRIO-1900 is a portable reconfigurable I/O (RIO) device that students can use to design control, robotics, and mechatronics systems. This document contains pinouts, connectivity information, dimensions, mounting instructions, and specifications for the NI myRIO-1900.

**Figure 1.** NI myRIO-1900



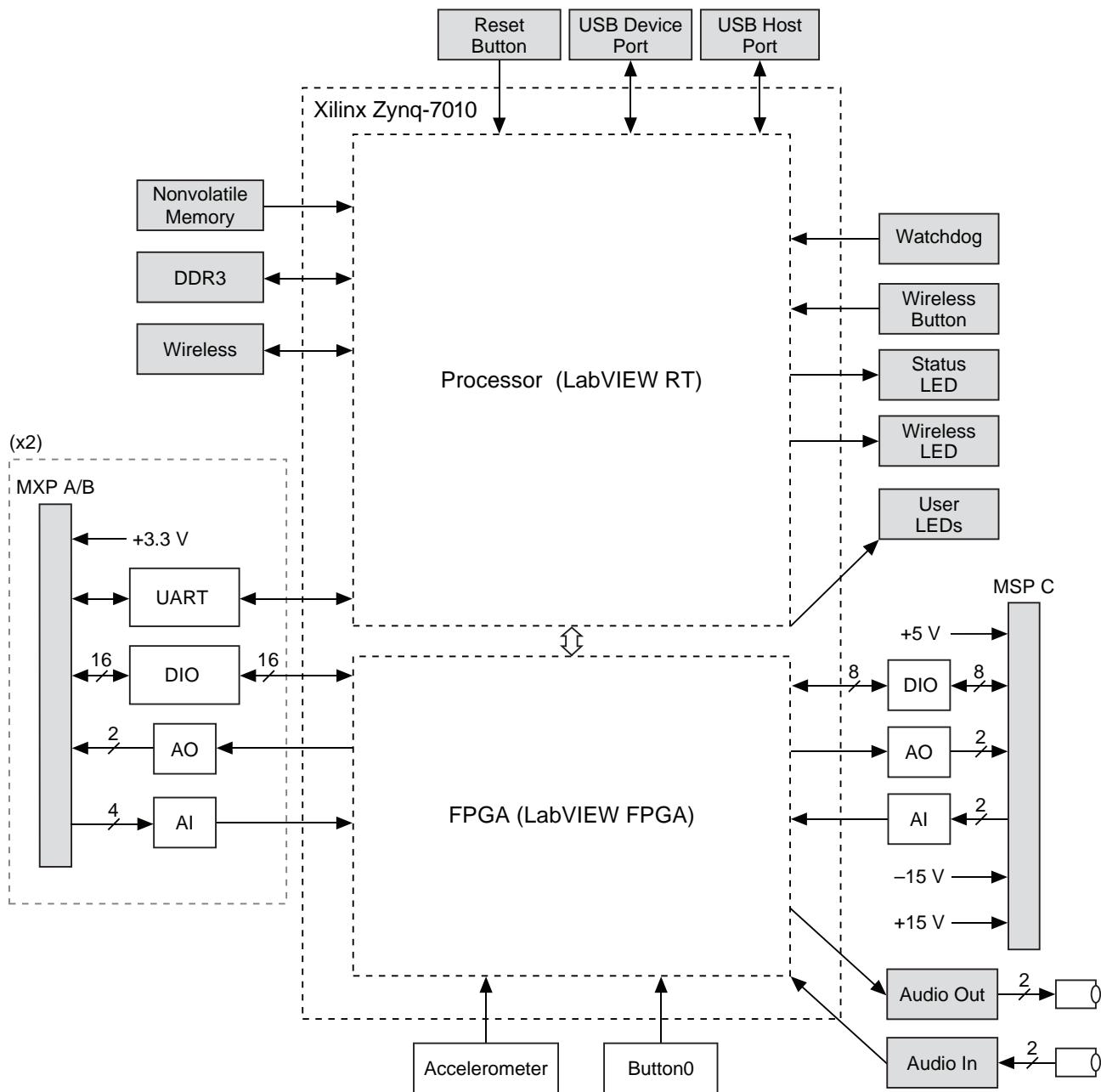
- |   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| 1 | NI myRIO-1900  | 6 | LEDs  |
| 2 | myRIO Expansion Port (MXP) Breakouts (One Included in Kit) | 7 | Mini System Port (MSP) Screw-Terminal Connector |
| 3 | Power Input Cable  | 8 | Audio In/Out Cables (One Included in Kit)       |
| 4 | USB Device Cable   | 9 | Button0   |
| 5 | USB Host Cable (Not Included in Kit)                       |   |   |

# Hardware Overview

The NI myRIO-1900 provides analog input (AI), analog output (AO), digital input and output (DIO), audio, and power output in a compact embedded device. The NI myRIO-1900 connects to a host computer over USB and wireless 802.11b,g,n.

The following figure shows the arrangement and functions of NI myRIO-1900 components.

**Figure 2.** NI myRIO-1900 Hardware Block Diagram



**Table 1.** Descriptions of Signals on MXP Connectors A and B

Signal Name	Reference	Direction	Description
+5V	DGND	Output	+5 V power output.
AI <0..3>	AGND	Input	0-5 V, referenced, single-ended analog input channels. Refer to the <i>Analog Input Channels</i> section for more information.
AO <0..1>	AGND	Output	0-5 V referenced, single-ended analog output. Refer to the <i>Analog Output Channels</i> section for more information.
AGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output.
+3.3V	DGND	Output	+3.3 V power output.
DIO <0..15>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input. Refer to the <i>DIO Lines</i> section for more information.
UART.RX	DGND	Input	UART receive input. UART lines are electrically identical to DIO lines.
UART.TX	DGND	Output	UART transmit output. UART lines are electrically identical to DIO lines.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital signals, +5 V, and +3.3 V.

# Cables and Accessories

---

**Table 5.** Accessories Available from NI

Accessory	Description	NI Part Number
Power supply	Power supply for NI myRIO-1900	723403-01
MXP breakouts	Set of five MXP breakout boards for NI myRIO-1900	782696-01
MSP connector	MSP replacement connector plug for NI myRIO-1900	765788-01
Panel mounting kit	Panel mounting kit for NI myRIO-1900	783091-01

## Specifications

---

The following specifications are typical for the 0 to 40 °C operating temperature range unless otherwise noted.

### Processor

Processor type ..... Xilinx Z-7010

Processor speed ..... 667 MHz

Processor cores ..... 2

### Memory

Nonvolatile memory ..... 512 MB

DDR3 memory ..... 256 MB

DDR3 clock frequency ..... 533 MHz

DDR3 data bus width ..... 16 bits

For information about the lifespan of the nonvolatile memory and about best practices for using nonvolatile memory, go to [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter the Info Code SSDBP.

### FPGA

FPGA type ..... Xilinx Z-7010

### Wireless Characteristics

Radio mode ..... IEEE 802.11 b,g,n

Frequency band ..... ISM 2.4 GHz

Channel width ..... 20 MHz

Channels .....	USA 1 to 11, International 1 to 13
TX power.....	+10 dBm max (10 mW)
Outdoor range .....	Up to 150 m (line of sight)
Antenna directivity .....	Omnidirectional

Security ..... WPA, WPA2, WPA2-Enterprise

## USB Ports

USB host port .....	USB 2.0 Hi-Speed
USB device port.....	USB 2.0 Hi-Speed

## Analog Input

Aggregate sample rate ..... 500 kS/s

Resolution..... 12 bits

Ovvervoltage protection .....  $\pm 16$  V

### MXP connectors

Configuration..... Four single-ended channels per connector

Input impedance .....  $>500$  k $\Omega$  acquiring at 500 kS/s

1 M $\Omega$  powered on and idle

4.7 k $\Omega$  powered off

Recommended source impedance ..... 3 k $\Omega$  or less

Nominal range ..... 0 V to +5 V

Absolute accuracy.....  $\pm 50$  mV

Bandwidth.....  $>300$  kHz

### MSP connector

Configuration..... Two differential channels

Input impedance ..... Up to 100 nA leakage powered on;  
4.7 k $\Omega$  powered off

Nominal range .....  $\pm 10$  V

Working voltage

(signal + common mode).....  $\pm 10$  V of AGND

Absolute accuracy.....  $\pm 200$  mV

Bandwidth..... 20 kHz minimum,  $>50$  kHz typical

### Audio input

Configuration..... One stereo input consisting of two AC-coupled,  
single-ended channels

Input impedance ..... 10 k $\Omega$  at DC

Nominal range .....  $\pm 2.5$  V

Bandwidth..... 2 Hz to  $>20$  kHz

## Analog Output

Aggregate maximum update rates

All AO channels on MXP connectors.....345 kS/s

All AO channels on MSP connector  
and audio output channels.....345 kS/s

Resolution ..... 12 bits

Overload protection ..... ±16 V

Startup voltage ..... 0 V after FPGA initialization

### MXP connectors

Configuration ..... Two single-ended channels per connector

Range ..... 0 V to +5 V

Absolute accuracy ..... 50 mV

Current drive ..... 3 mA

Slew rate ..... 0.3 V/µs

### MSP connector

Configuration ..... Two single-ended channels

Range ..... ±10 V

Absolute accuracy ..... ±200 mV

Current drive ..... 2 mA

Slew rate ..... 2 V/µs

### Audio output

Configuration ..... One stereo output consisting of  
two AC-coupled, single-ended channels

Output impedance ..... 100 Ω in series with 22 µF

Bandwidth ..... 70 Hz to >50 kHz into 32 Ω load;  
2 Hz to >50 kHz into high-impedance load

## Digital I/O

Number of lines

MXP connectors ..... 2 ports of 16 DIO lines (one port per connector);  
one UART.RX and one UART.TX line per  
connector

MSP connector ..... 1 port of 8 DIO lines

Direction control ..... Each DIO line individually programmable as  
input or output

Logic level ..... 5 V compatible LVTTL input; 3.3 V LVTTL  
output

### Input logic levels

Input low voltage,  $V_{IL}$  ..... 0 V min; 0.8 V max

Input high voltage,  $V_{IH}$  ..... 2.0 V min; 5.25 V max

### Output logic levels

Output high voltage,  $V_{OH}$

sourcing 4 mA ..... 2.4 V min; 3.465 V max

Output low voltage,  $V_{OL}$

sinking 4 mA ..... 0 V min; 0.4 V max

Minimum pulse width ..... 20 ns

### Maximum frequencies for secondary digital functions

SPI ..... 4 MHz

PWM ..... 100 kHz

Quadrature encoder input ..... 100 kHz

I<sup>2</sup>C ..... 400 kHz

### UART lines

Maximum baud rate ..... 230,400 bps

Data bits ..... 5, 6, 7, 8

Stop bits ..... 1, 2

Parity ..... Odd, Even, Mark, Space

Flow control ..... XON/XOFF

## Accelerometer

Number of axes ..... 3

Range .....  $\pm 8\text{ g}$

Resolution ..... 12 bits

Sample rate ..... 800 S/s

Noise ..... 3.9 mg<sub>rms</sub> typical at 25 °C

## Power Output

### +5 V power output

Output voltage ..... 4.75 V to 5.25 V

Maximum current on each connector ..... 100 mA

### +3.3 V power output

Output voltage ..... 3.0 V to 3.6 V

Maximum current on each connector ..... 150 mA

+15 power output	
Output voltage.....	+15 V to +16 V
Maximum current .....	32 mA (16 mA during startup)
-15 V power output	
Output voltage.....	-15 V to -16 V
Maximum current .....	32 mA (16 mA during startup)
Maximum combined power from +15 V and -15 V power output .....	500 mW

## Power Requirements

NI myRIO-1900 requires a power supply connected to the power connector.

Power supply voltage range ..... 6 to 16 VDC

Maximum power consumption ..... 14 W

Typical idle power consumption ..... 2.6 W

## Environmental

To meet these specifications, you must operate the NI myRIO-1900 with the window facing away from the mounting surface and ensure that there is at least 1 in. of clearance in front of the window during use.

Ambient temperature near device

(IEC 60068-2-1, IEC 600682-2) ..... 0 to 40 °C

Storage temperature

(IEC 60068-2-1, IEC 600682-2) ..... -20 to 70 °C

Operating humidity (IEC 60068-2-56) ..... 10 to 90% RH, noncondensing

Storage humidity (IEC 60068-2-56) ..... 10 to 90% RH, noncondensing

Maximum altitude ..... 2,000 m

Pollution Degree (IEC 60664) ..... 2

Indoor use only.

## Physical Characteristics

Weight ..... 193 g (6.8 oz)

## Safety

### Safety Standards

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1

## **C.5. Hoja de tuberías**



**TUBERIA DE ACERO AL CARBONO**  
**API 5L / ASTM A53 / A106**

Diámetro Nominal NPS DN		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		ASTM A53 PRESION DE PRUEBA			
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	Grado A		Grado B	
										psi	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	Kg/cm <sup>2</sup>
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	700	49	700	49
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	850	60	850	60
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	700	49	700	49
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	850	60	850	60
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	700	49	700	49
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	850	60	850	60
1-1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	STD	40	2.27	3.39	1200	84	1300	91
				0.191	4.85	XS	80	3.00	4.47	1800	127	1900	134
1-1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	STD	40	2.72	4.05	1200	84	1300	91
				0.200	5.08	XS	80	3.63	5.41	1800	127	1900	134
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	STD	40	3.65	5.44	2300	162	2500	176
				0.218	5.54	XS	80	5.02	7.48	2500	176	2500	176
2-1/2	65	2.875	73	0.203	5.16	STD	40	5.79	8.63	2500	176	2500	176
				0.276	7.01	XS	80	7.66	11.41	2500	176	2500	176
				0.375	9.52	...	160			2500	176	2500	176
				0.552	14.02	XXS	-			2500	176	2500	176
3	80	3.500	88.9	0.125	3.18	...	-	4.51	6.72	1290	91	1500	105
				0.156	3.96	...	-	5.57	8.29	1600	112	1870	131
				0.188	4.78	...	-	6.65	9.92	1930	136	2260	159
				0.216	5.49	STD	40	7.58	11.29	2220	156	2500	176
				0.250	6.35	...	-	8.68	12.93	2500	176	2500	176
				0.281	7.14	...	-	9.66	14.40	2500	176	2500	176
				0.300	7.62	XS	80	10.25	15.27	2500	176	2500	176
4	100	4.500	114,3	0.125	3.18	-	-	5.84	8.71	1000	70	1170	82
				0.156	3.96	-	-	7.24	10.78	1250	88	1460	103
				0.188	4.78	-	-	8.66	12.91	1500	105	1750	123
				0.219	5.56	-	-	10.01	14.91	1750	123	2040	143
				0.237	6.02	STD	40	10.79	16.07	1900	134	2210	155
				0.250	6.35	-	-	11.35	16.90	2000	141	2330	164
				0.281	7.14	-	-	12.66	18.87	2250	158	2620	184
				0.312	7.92	-	-	13.98	20.78	2500	176	2800	197
				0.337	8.56	XS	80	14.98	22.32	2700	190	2800	197
				0.438	11.13	-	120	19.00	28.32	2800	197	2800	197
				0.531	13.49	-	160	22.51	33.54	2800	197	2800	197
				0.674	17.12	XXS	-	27.54	41.03	2800	197	2800	197
5	125	5.563	141,3	0.188	4.78	-	-	10.79	16.09	1220	86	1420	100
				0.219	5.56	-	-	12.50	18.61	1420	100	1650	116
				0.258	6.55	STD	40	14.62	21.77	1670	117	1950	137
				0.281	7.14	-	-	15.85	23.62	1820	128	2120	149
				0.312	7.92	-	-	17.50	26.05	2020	142	2360	166
				0.344	8.74	-	-	19.17	28.57	2230	157	2600	183
				0.375	9.52	XS	80	20.78	30.94	2430	171	2800	197
6	150	6.625	168,3	0.188	4.78	-	-	12.92	19.27	1020	72	1190	84
				0.219	5.56	-	-	14.98	22.31	1190	84	1390	98
				0.250	6.35	-	-	17.02	25.36	1360	96	1580	111
				0.280	7.11	STD	40	18.97	28.26	1520	107	1780	125
				0.312	7.92	-	-	21.04	31.32	1700	120	1980	139
				0.344	8.74	-	-	23.08	34.39	1870	131	2180	153
				0.375	9.52	-	-	25.02	37.28	2040	143	2380	167
				0.432	10.97	XS	80	28.57	42.56	2350	165	2740	193
				0.562	14.27	-	120	36.39	54.20	2800	197	2800	197
				0.719	18.26	-	160	45.35	67.56	2800	197	2800	197

**ANEXO D**

**PLANOS Y DIAGRAMAS**

### **D.1. Plano Mecánico**

8 7 6 5 4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

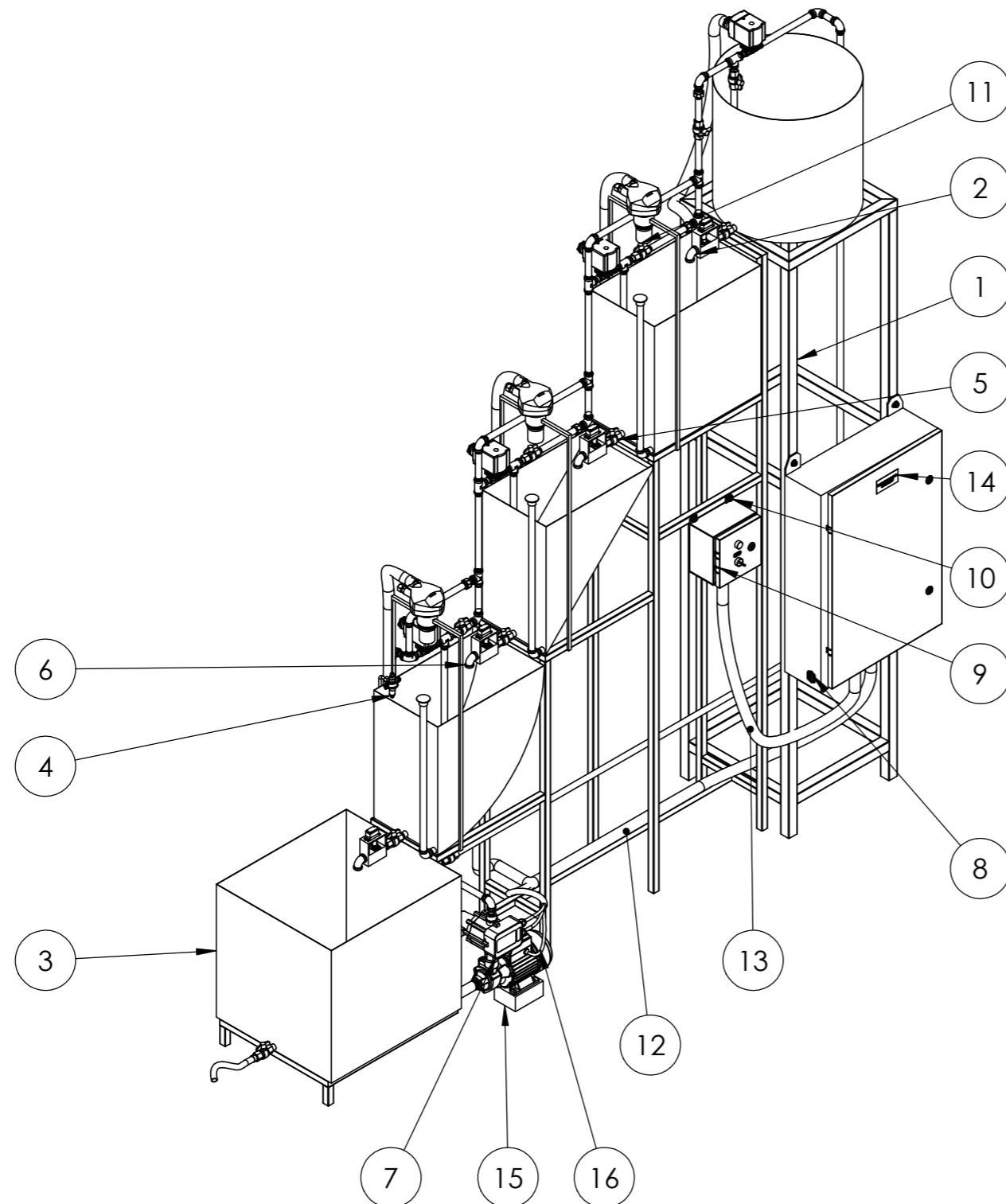
C

B

B

A

A



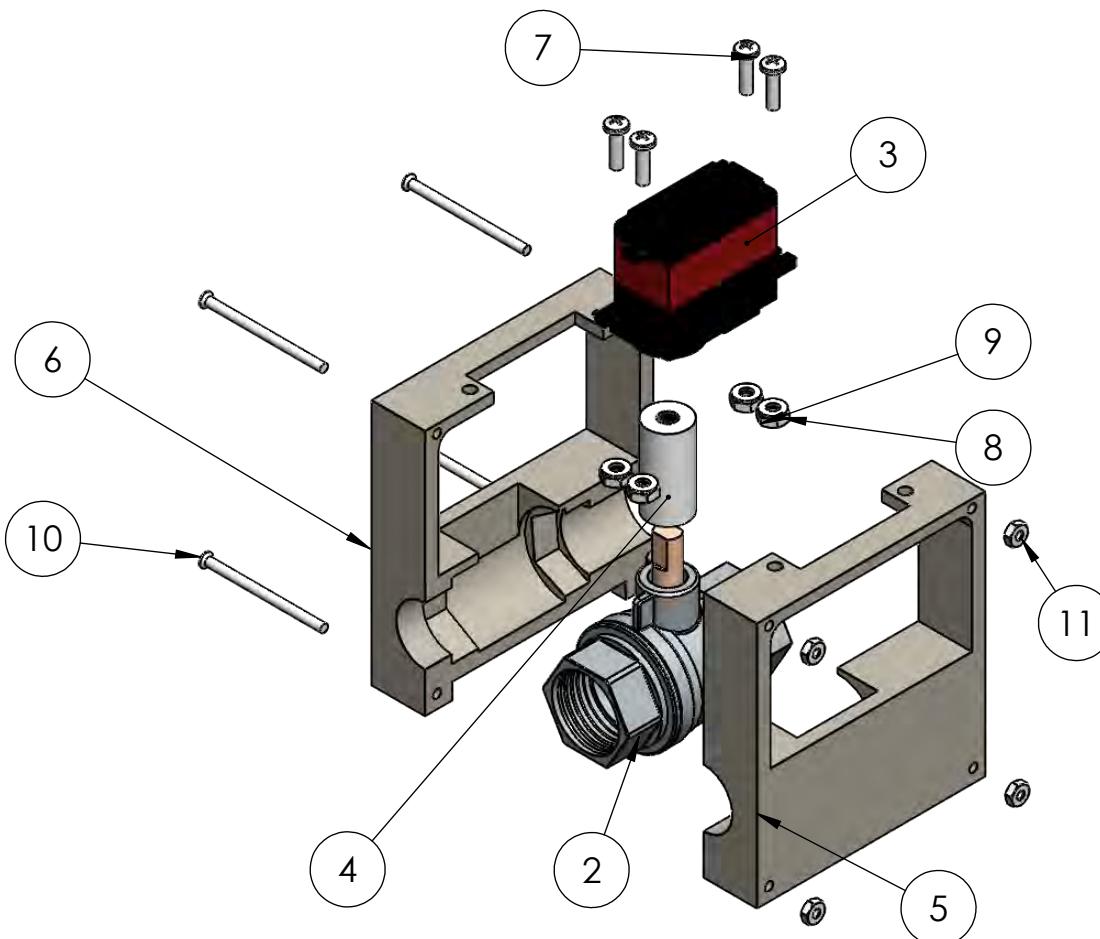
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Estructura	1
2	Reservorio cilíndrico	1
3	Reservorio rectangular	1
4	Tanque elíptico	1
5	Tanque rectangular	1
6	Tanque triangular	1
7	Sistema de tuberías	1
8	Panel de control	1
9	Caja bomba	1
10	M10-1.5 x 30	4
11	Sensor y soporte	3
12	Cableado externo	1
13	Cableado de la caja de la bomba de agua	1
14	Etiqueta	1
15	Pump base	1
16	Cableado de la bomba de agua	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				Terminado			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DIBUJO ESCALADO		REVISIÓN
Dib:	JOSE TOLENTINO									
CHK'D										
APP'D										
MFG										
QA								MATERIAL:		DWG NO.
										DRW-ASS-1
										A3
								Peso:		ESCALA:1:50
										Hoja

8 7 6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1

D



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	caja rediseño no modificar corregido	1
2	valvulaball	1
3	PDI 6621MG	1
4	acople pequeño	1
5	caja derecha	1
6	caja izquierda	1
7	PHMS 0.138-32x0.5x0.5-C	4
8	FLAT 0.156-0.312	4
9	NUT 35649 0.138-32-N	4
10	FHM1 0.112-48x1.75x1.75-C	4
11	NUT 35650 0.112-48-N	4

C

B

A

D

C

B

A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

Dib.: JOSE TOLENTINO

CHK'D

APP'D

MFG

Q.A

Terminado

DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DIBUJO ESCALADO

REVISADO

TÍTULO

SERVOVÁLVULA

DWG NO.

SM-1

A4

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1

6 5 4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

C

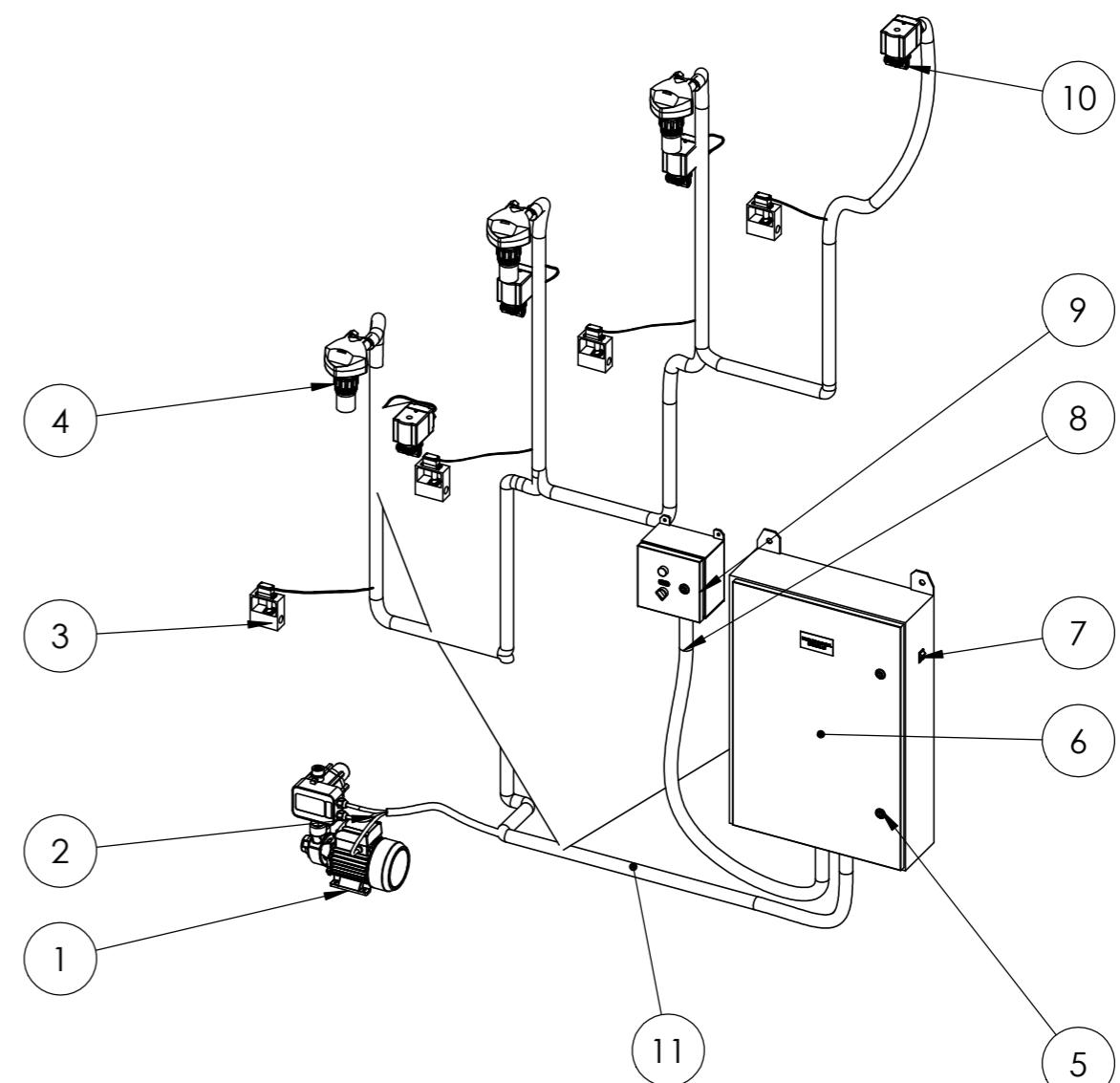
B

B

A

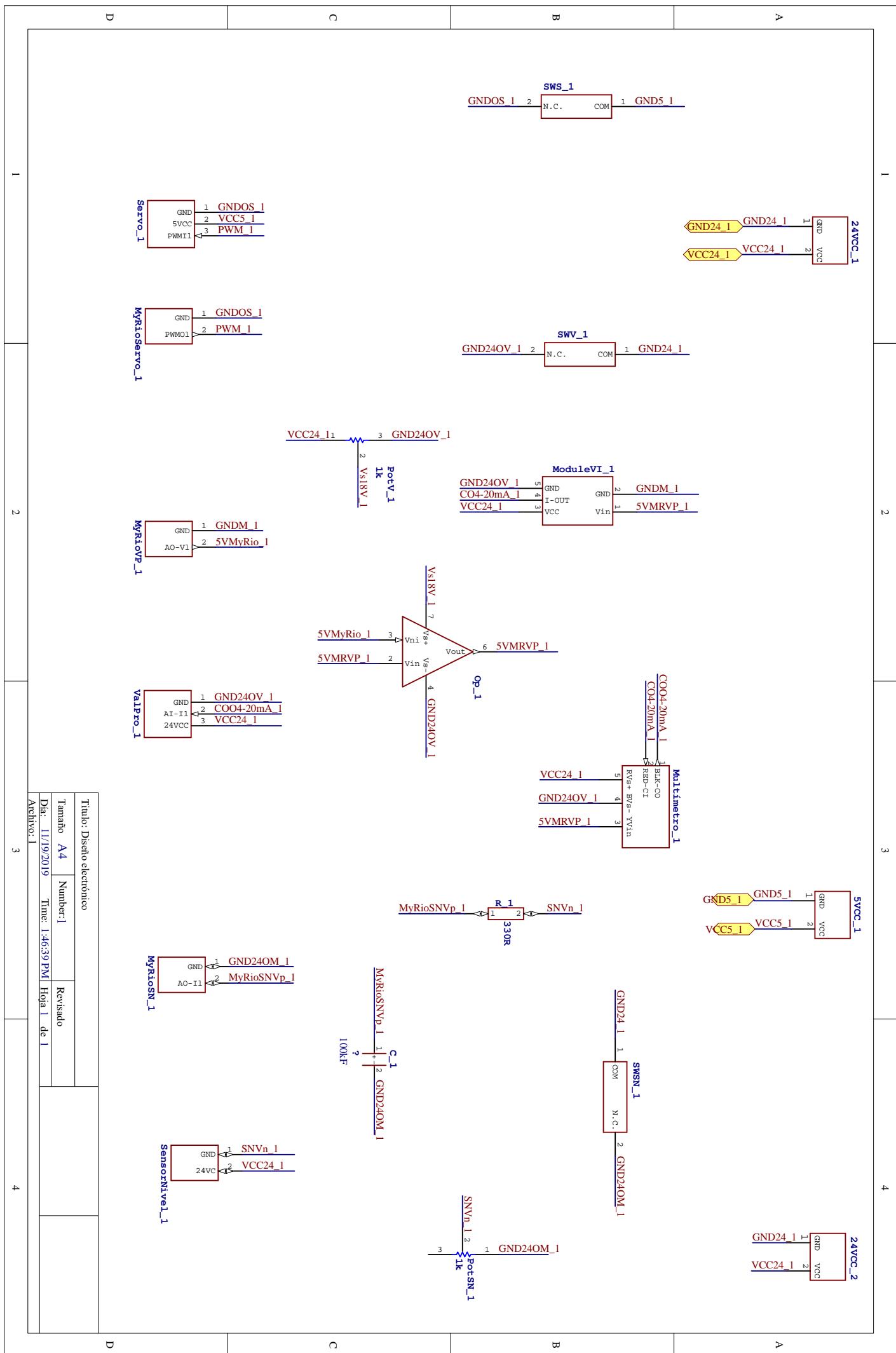
A

ITEM NO.	Parte	Cantidad
1	Bomba de agua	1
2	Presurizador	1
3	Servoválvula	4
4	Sensor de nivel	3
5	Cerrojo	2
6	Panel de control	1
7	Botón de encendido	1
8	Tubo corrugado de protección del cableado externo de la caja de la bomba	1
9	Caja eléctrica de la bomba de agua	1
10	Válvula proporcional	4
11	Tubo corrugado de protección del cableado externo de los sensores y actuadores	1



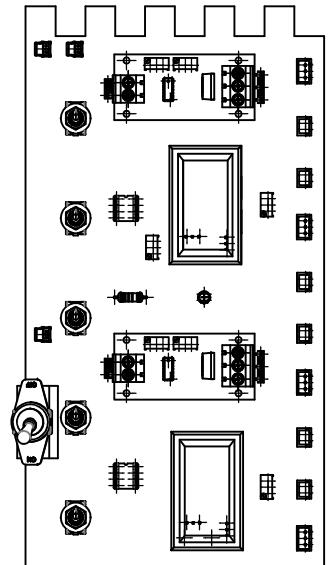
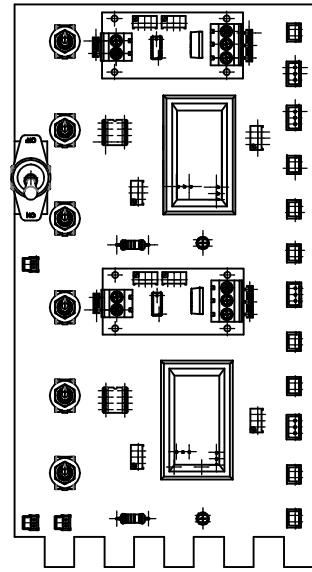
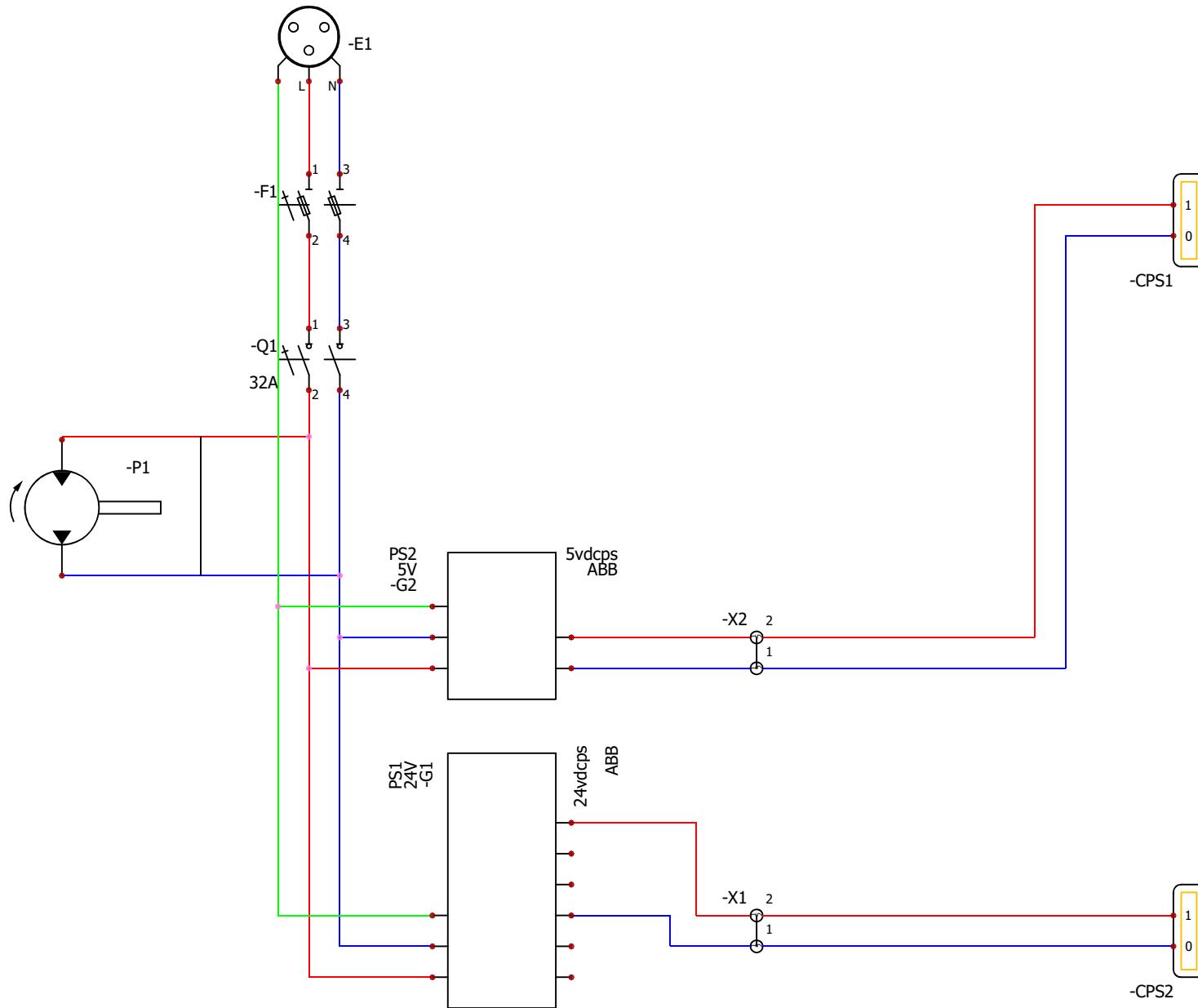
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				TERMINADO			DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DIBUJO ESCALADO	REVISADO
Dib.	Nombre	Firma	Día					TÍTULO  Panel de control	
CHK'D									
APP'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:			DWG NO.		
							DRW-ASS-2	A3	
				PESO:			SCALE:1:50		
								SHEET 1 OF 1	

## **D.2. Plano Electrónico**



### **D.3. Plano Eléctrico**

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10



Jose Tolentino

Colección

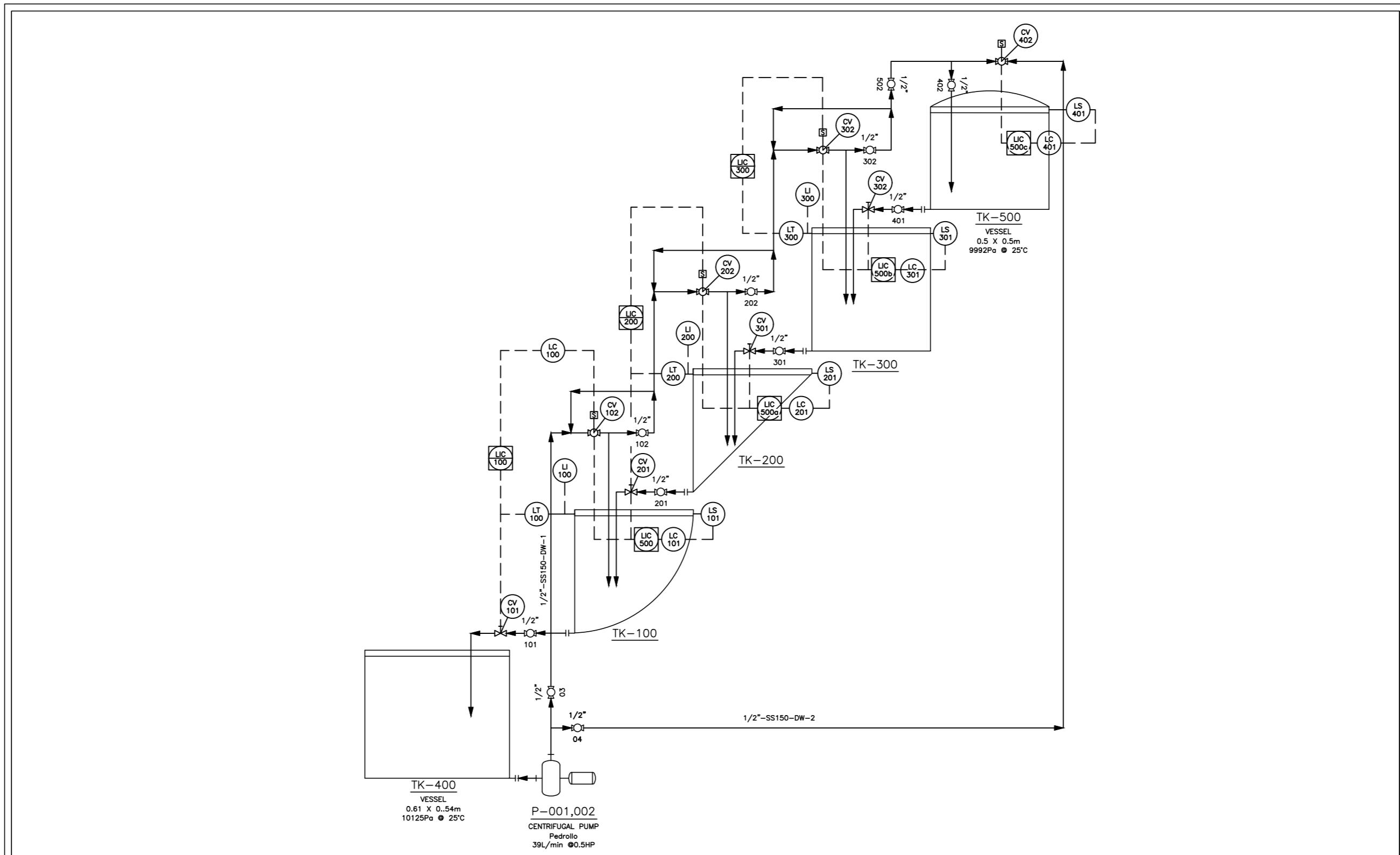
Contrato n° :

Situación: +L1

Armario principal

Índice  
0  
Hoja  
04

#### **D.4. Diagrama P&ID**



Revision notes:		
Rev:	Date:	Notes:

Drawn by:  
JOSE ANTONIO TOLENTINO VELIZ

Project:  
MODULO DE CONTROL DE NIVEL

Date:  
11/17/18

---

Scale @ A3:1:1

---

Revision:



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA