



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**“REHABILITACIÓN Y MODERNIZACIÓN DEL  
RUGOSÍMETRO MARCA TAYLOR – HOBSON MODELO  
TALYSURF 5 DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**

**AUTORES: MUÑOZ VALLEJO, DIEGO ALEJANDRO  
ORDÓÑEZ SARMIENTO, JUAN ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. TUMIPAMBA TITUASÁN, CESAR  
EMILIO**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación: **"REHABILITACIÓN Y MODERNIZACIÓN DEL RUGOSÍMETRO MARCA TAYLOR – HOBSON MODELO TALYSURF 5 DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE"**, realizado por los señores **Diego Alejandro Muñoz Vallejo** y **Juan Andrés Ordóñez Sarmiento**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio PlagScan, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Diego Alejandro Muñoz Vallejo** y **Juan Andrés Ordóñez Sarmiento** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 03 de marzo 2016

Anexo: 9 hojas de verificación.

Ing. Cesar Emilio Tumipamba Tituasán Msc.

**DIRECTOR**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Diego Alejandro Muñoz Vallejo** con cédula de identidad N° 1723604524 y **Juan Andrés Ordóñez Sarmiento** con cédula de identidad N° 1104134778, declaramos que este trabajo de titulación **"REHABILITACIÓN Y MODERNIZACIÓN DEL RUGOSÍMETRO MARCA TAYLOR - HOBSON MODELO TALYSURF 5 DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE"** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 02 de marzo 2016

Sr. Diego Alejandro Muñoz Vallejo

C.C. 1723604524

Sr. Juan Andrés Ordóñez Sarmiento

C.C. 1104134778



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Diego Alejandro Muñoz Vallejo y Juan Andrés Ordóñez Sarmiento, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **"REHABILITACIÓN Y MODERNIZACIÓN DEL RUGOSÍMETRO MARCA TAYLOR – HOBSON MODELO TALYSURF 5 DEL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE"** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 02 de marzo 2016

Sr. Diego Alejandro Muñoz Vallejo  
C.C. 1723604524

Sr. Juan Andrés Ordóñez Sarmiento  
C.C. 1104134778

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto a mi familia, soporte y apoyo incondicional.

A mi madre y padre por brindarme su inmenso amor y acompañarme en cada paso dado en mi formación como profesional, a mis hermanas Gabriela y Karen parte fundamental de mi vida quienes supieron estar para mí cuando más lo necesité, a mi hermosa sobrina Valentina por alegrarme los días con su existencia y a mi cuñado Carlos por sus consejos brindados a lo largo de este proceso.

**JUAN ANDRÉS ORDÓÑEZ SARMIENTO**

Este trabajo lo dedico a mi Familia.

Especialmente a mi amada madre quien con mucho amor me ha apoyado en todo y ha sido una gran mujer cuyo ejemplo es digno de seguir, a mi hermana Mónica y mi hermano Javier quienes me apoyaron en las buenas y en las malas, mis tíos que siempre han estado pendientes y prestos para darme su apoyo, y no menos importante pero sí muy especial a mi novia Carolina y mi futura hija Danna quienes son y serán mi gran motor para cumplir todas mis metas.

**DIEGO ALEJANDRO MUÑOZ VALLEJO**

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios guía de mi vida. A mi familia por su compañía y apoyo incondicional en esta etapa culminada.

Al Ing. Emilio Tumipamba por la confianza depositada para la realización de este proyecto, al Lcdo. Edwin Tayupanta, Ing. David Loza y Sr. Nelson Cardenas por su ayuda y tiempo prestado para solventar dudas que surgieron a lo largo del proyecto.

A mis amigos y compañeros por ser participantes indirectos de nuestro proyecto.

A María José por su amor y compañía en este arduo camino.

Finalmente a Diego, mi compañero de trabajo, quien con dedicación y esfuerzo ha sabido aportar con su conocimiento a la realización del proyecto.

**JUAN ANDRÉS ORDÓÑEZ SARMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida de la mejor manera, a mi familia que siempre me ha apoyado y ha estado a mi lado, a mi novia Carolina por todo su amor y su apoyo, a mis amigos y compañeros que hicieron más llevadera esta etapa universitaria, a mi compañero de proyecto Juan por su dedicación y apoyo, al Ing. Emilio Tumipamba, al Ing. David Loza, al Lcdo. Edwin Tayupanta, al Sr. Nelson Cárdenas y todas las personas que de una u otra forma nos ayudaron al desarrollo exitoso del proyecto. Gracias.

**DIEGO ALEJANDRO MUÑOZ VALLEJO**



# Índice de Contenido

<b>Certificación</b> .....	ii
<b>Autoría de Responsabilidad</b> .....	iii
<b>Autorización (publicación biblioteca virtual)</b> .....	iv
<b>Dedicatoria</b> .....	v
<b>Agradecimiento</b> .....	vii
<b>Índice de Contenido</b> .....	ix
<b>Índice de Figuras</b> .....	xvi
<b>Resumen</b> .....	xx
<b>Abstract</b> .....	xxi
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>GENERALIDADES</b> .....	
1.1	Antecedentes .....
1.2	Justificación e importancia.....
1.3	Alcance del proyecto .....
1.4	Metodología.....
1.4.1	Sistema mecánico .....
1.4.2	Sistema eléctrico/electrónico.....
1.4.3	Sistema de control .....
1.5	Objetivos .....
1.5.1	Objetivo general .....
1.5.2	Objetivos específicos.....
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	
2.1	Conceptos Generales de la Medición de la Textura de Superficies .....
2.1.1	Definiciones Esenciales.....

2.2	Parámetros de Textura Superficial .....	27
2.2.1	Longitudes de ensayo .....	27
2.2.2	Parámetros de Amplitud .....	28
2.2.3	Parámetros de Espaciado .....	32
2.2.4	Parámetros Híbridos .....	33
2.3	Instrumentos de medida para textura superficial.....	34
2.3.1	Medidor .....	35
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>DISEÑO MECÁNICO, ELECTRÓNICO Y DE CONTROL</b>		<b>39</b>
3.1	Especificación del producto .....	39
3.2	Alternativas de diseño de materialización preliminar .....	41
3.2.1	Bancada .....	41
3.2.1.1	Control humedad.....	42
3.2.1.2	Control temperatura .....	47
3.2.2	Columna .....	53
3.2.2.1	Control de posición del palpador .....	53
3.2.3	Traverse Unit .....	60
3.2.4	Procesador .....	63
3.2.4.1	Adquisición de datos.....	64
3.2.5	Interfaz con el usuario .....	75
3.2.6	Evaluación y selección de la alternativa de diseño preliminar.....	76
3.2.7	Bancada .....	77
3.2.8	Columna .....	80
3.2.9	Traverse Unit .....	82
3.2.10	Procesador .....	84
3.3	Diseño preliminar .....	86
3.3.1	Bancada .....	87
3.3.1.1	Control humedad.....	90

3.3.1.2	Control de temperatura .....	93
3.3.2	Columna .....	97
3.3.3	Traverse Unit .....	105
3.3.3.1	Soporte y acople para servomotor .....	106
3.3.4	Procesador .....	109

## **CAPÍTULO IV**

### **MONTAJE, PRUEBAS Y RESULTADOS** 128

4.1	Bancada .....	128
4.1.1	Rehabilitación.....	128
4.1.2	Modernización.....	129
4.1.2.1	Cabina de ambiente controlado.....	129
4.1.2.2	Control humedad.....	130
4.1.2.3	Control de temperatura .....	130
4.2	Columna .....	131
4.2.1	Rehabilitación.....	131
4.2.2	Modernización.....	132
4.3	Traverse Unit .....	133
4.3.1	Rehabilitación.....	133
4.3.2	Modernización.....	134
4.4	Procesador .....	135
4.4.1	Rehabilitación.....	135
4.4.2	Modernización.....	136
4.5	Pruebas y resultados .....	140

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 149

5.1	CONCLUSIONES.....	149
5.2	RECOMENDACIONES .....	151

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>152</b>
--------------------------	------------

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Equipos e Instrumentos del laboratorio de Metrología .....	2
<b>Tabla 2</b> Inspección física del carro de recorrido .....	5
<b>Tabla 3</b> Inspección física del soporte palpador .....	6
<b>Tabla 4</b> Inspección física Traverse Unit.....	7
<b>Tabla 5</b> Inspección física de la bancada .....	8
<b>Tabla 6</b> Inspección física de la columna .....	9
<b>Tabla 7</b> Inspección física de tapa del sistema motriz de la columna.....	10
<b>Tabla 8</b> Inspección física del procesador .....	11
<b>Tabla 9</b> Inspección física soporte de pieza 1 .....	12
<b>Tabla 10</b> Inspección física soporte de pieza 2.....	12
<b>Tabla 11</b> Inspección física accesorios .....	13
<b>Tabla 12</b> Inspección física de patrón de calibración .....	13
<b>Tabla 13</b> Inspección física palpador de aguja .....	14
<b>Tabla 14</b> Inspección física palpador de aguja .....	14
<b>Tabla 15</b> Inspección física palpador de aguja .....	15
<b>Tabla 16</b> Componentes internos del procesador en el estudio inicial .....	18
<b>Tabla 17</b> Desviaciones geométricas de las superficies mecanizadas .....	24
<b>Tabla 18</b> Rugosidad superficial de distintos procesos de manufactura, $\mu\text{m}$ ( $\mu\text{-in}$ )... 26	
<b>Tabla 19</b> Especificaciones del producto.....	39
<b>Tabla 20</b> Requerimientos mecánicos, electrónicos y de automatización del equipo 40	
<b>Tabla 21</b> Condiciones ambientales según norma para laboratorios .....	41
<b>Tabla 22</b> Requerimientos limitadores control humedad .....	42
<b>Tabla 23</b> Características humidificador MCR3.....	44
<b>Tabla 24</b> Ventajas y desventajas de los humectadores de atomización .....	44
<b>Tabla 25</b> Características humidificador de evaporación Bottle Caps .....	45
<b>Tabla 26</b> Ventajas y desventajas humidificador por evaporación.....	46
<b>Tabla 27</b> Características Humidificador Condair CP3 Mini .....	47
<b>Tabla 28</b> Ventajas y desventajas de los humectadores de vapor.....	47
<b>Tabla 29</b> Requerimientos limitadores para el control de temperatura .....	47
<b>Tabla 30</b> Ventajas y desventajas refrigeración por compresión de vapor.....	49
<b>Tabla 31</b> Ventajas y desventajas de los sistemas de refrigeración por absorción.....	51

<b>Tabla 32</b> Ventajas y desventajas de las células Peltier.....	52
<b>Tabla 33</b> Características TEC1-12706 .....	52
<b>Tabla 34</b> Requerimientos limitadores control de posición.....	54
<b>Tabla 35</b> Ventajas y desventajas del controlador PID.....	58
<b>Tabla 36</b> Ventajas y desventajas del Controlador Difuso .....	60
<b>Tabla 37</b> Requerimientos limitadores para el Traverse Unit.....	60
<b>Tabla 38</b> Características Servomotor .....	61
<b>Tabla 39</b> Ventajas y desventajas de los servomotores .....	62
<b>Tabla 40</b> Características motor paso a paso .....	63
<b>Tabla 41</b> Ventajas y desventajas de los motores paso a paso.....	63
<b>Tabla 42</b> Especificaciones técnicas del Arduino Mega 2560.....	64
<b>Tabla 43</b> Requerimientos limitadores validación señal.....	65
<b>Tabla 44</b> Características 1N4148 .....	66
<b>Tabla 45</b> Ventajas y desventajas del rectificador de onda completa tipo puente.....	67
<b>Tabla 46</b> Especificaciones técnicas OP27 .....	69
<b>Tabla 47</b> Ventajas y desventajas del amplificador operacional OP27 .....	69
<b>Tabla 48</b> Coeficientes $C_n$ y orden $n$ de Filtro.....	72
<b>Tabla 49</b> Comparación entre filtro 2RC y Gaussiano .....	73
<b>Tabla 50</b> Especificaciones Técnicas LM311.....	75
<b>Tabla 51</b> Ventajas y desventajas de Gambas .....	76
<b>Tabla 52</b> Ventajas y desventajas de Python .....	76
<b>Tabla 53</b> Criterio de evaluación y peso específico para control de humedad.....	77
<b>Tabla 54</b> Costo en el control de humedad.....	78
<b>Tabla 55</b> Precisión en el control de la humedad.....	78
<b>Tabla 56</b> Actuar sin aumentar la capacidad calorífica en el control de la humedad .	78
<b>Tabla 57</b> Conclusión en el control de la humedad .....	78
<b>Tabla 58</b> Criterio de evaluación y peso específico para control de temperatura.....	79
<b>Tabla 59</b> Simplicidad en el control de temperatura.....	79
<b>Tabla 60</b> Coto en el control de la temperatura .....	79
<b>Tabla 61</b> Precisión el control de la temperatura.....	80
<b>Tabla 62</b> Disminución de la Humedad Relativa el control de la temperatura.....	80
<b>Tabla 63</b> Conclusión en el control de la temperatura.....	80
<b>Tabla 64</b> Criterio de evaluación y peso específico para control de posición .....	81

<b>Tabla 65</b>	Precisión en el Control de Posición del Palpador .....	81
<b>Tabla 66</b>	Tiempo de establecimiento en el Control de Posición del Palpador .....	81
<b>Tabla 67</b>	Modelamiento matemático en el Control de Posición del Palpador .....	82
<b>Tabla 68</b>	Conclusión para el Control de Posición del Palpador .....	82
<b>Tabla 69</b>	Criterio de evaluación y peso específico para Cambio de Velocidad .....	82
<b>Tabla 70</b>	Torque en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit .....	83
<b>Tabla 71</b>	Precisión en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit .....	83
<b>Tabla 72</b>	Peso en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit .....	83
<b>Tabla 73</b>	Conclusión para el Cambio de Velocidad del Traverse Unit .....	83
<b>Tabla 74</b>	Criterio de evaluación y peso específico para validación de la señal .....	84
<b>Tabla 75</b>	Precisión en el sistema de validación de señal .....	84
<b>Tabla 76</b>	Tolerancia en el sistema de validación de señal .....	84
<b>Tabla 77</b>	Costo en el sistema de validación de señal .....	85
<b>Tabla 78</b>	Conclusión en el sistema de validación de señal .....	85
<b>Tabla 79</b>	Criterio de evaluación y peso específico para interfaz gráfica .....	85
<b>Tabla 80</b>	Rapidez de procesamiento de datos .....	86
<b>Tabla 81</b>	Programación gráfica de la interfaz .....	86
<b>Tabla 82</b>	Información disponible del software de programación .....	86
<b>Tabla 83</b>	Conclusión para software de interfaz gráfica .....	86
<b>Tabla 84</b>	Alternativas de diseño seleccionadas a implementarse .....	87
<b>Tabla 85</b>	Descripción de pines conector DB25 .....	90
<b>Tabla 86</b>	Características DHT22 .....	92
<b>Tabla 87</b>	Distribución de pines DHT22 .....	92
<b>Tabla 88</b>	Simbología del circuito de activación del Humidificador .....	93
<b>Tabla 89</b>	Simbología del circuito de activación C. Peltier .....	97
<b>Tabla 90</b>	Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones bajas .....	99
<b>Tabla 91</b>	Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones bajas .....	100
<b>Tabla 92</b>	Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones medias ..	102
<b>Tabla 93</b>	Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones medias .....	102
<b>Tabla 94</b>	Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones altas .....	103
<b>Tabla 95</b>	Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones altas .....	103
<b>Tabla 96</b>	Simbología del circuito para posicionamiento del palpador .....	104
<b>Tabla 97</b>	Inspección física y modificaciones a realizarse .....	105

<b>Tabla 98</b> Características Servomotor .....	106
<b>Tabla 99</b> Simbología del circuito lógico para el movimiento del carro .....	109
<b>Tabla 100</b> Tabla de verdad para movimiento del carro.....	109
<b>Tabla 101</b> Simbología circuito regulador de voltaje LM338K .....	110
<b>Tabla 102</b> Simbología circuito rectificador de precisión .....	112
<b>Tabla 103</b> Simbología circuito comparador de voltaje .....	114
<b>Tabla 104</b> Simbología divisor de voltaje .....	115
<b>Tabla 105</b> Parámetros teóricos del filtro Gaussiano.....	117
<b>Tabla 106</b> Tiempos de accionamiento.....	117
<b>Tabla 107</b> Parámetros prácticos del filtro Gaussiano.....	118
<b>Tabla 108</b> Validación del filtro .....	118
<b>Tabla 109</b> Simbología circuito selector de magnificaciones.....	119
<b>Tabla 110</b> Tabla de verdad para selección de magnificaciones .....	120
<b>Tabla 111</b> Valor Ra del patrón de calibración.....	140
<b>Tabla 112</b> Distribución normal .....	141
<b>Tabla 113</b> Nivel de confiabilidad del equipo .....	142
<b>Tabla 114</b> Resultados distribución t student Prueba 1 .....	144
<b>Tabla 115</b> Resultados distribución t student Prueba 2 .....	144
<b>Tabla 116</b> Resultados distribución t student Prueba 3 .....	145
<b>Tabla 117</b> Resultados del Análisis de Varianzas .....	147
<b>Tabla 118</b> Grados de libertad .....	148

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Rugosímetro marca TAYLOR – HOBSON modelo TALYSURF 5 .....	3
<b>Figura 2</b> Estado inicial del rugosímetro .....	4
<b>Figura 3</b> Estructura metálica de referencia para repotenciar el equipo.....	17
<b>Figura 4</b> Circuitería del procesador del rugosímetro .....	18
<b>Figura 5</b> Traverse Unit .....	20
<b>Figura 6</b> Textura superficial, rugosidad y ondulación .....	22
<b>Figura 7</b> Orientaciones posibles de una superficie.....	23
<b>Figura 8</b> Longitudes de muestreo, evaluación y recorrido.....	28
<b>Figura 9</b> Ra y Rq .....	29
<b>Figura 10</b> Rmax, Rt, Rtm.....	30
<b>Figura 11</b> Rz.....	30
<b>Figura 12</b> Rp, Rpm.....	31
<b>Figura 13</b> Rsk .....	32
<b>Figura 14</b> HSC .....	32
<b>Figura 15</b> Sm.....	33
<b>Figura 16</b> tp.....	34
<b>Figura 17</b> Esquema General del Rugosímetro .....	34
<b>Figura 18</b> Configuración de un rugosímetro con palpador tipo aguja .....	35
<b>Figura 19</b> Sensor de inductancia variable .....	37
<b>Figura 20</b> Diagrama esquemático del sistema modulado de medición.....	38
<b>Figura 21</b> Cabina de ambiente controlado .....	42
<b>Figura 22</b> Humidificador de atomización .....	43
<b>Figura 23</b> Humidificador por atomización MCR3.....	43
<b>Figura 24</b> Humidificador de evaporación .....	45
<b>Figura 25</b> Humidificador de evaporación comercial Bottle Caps.....	45
<b>Figura 26</b> Humidificador de vapor.....	46
<b>Figura 27</b> Humidificador por vapor Condair CP3 Mini.....	46
<b>Figura 28</b> Elementos del ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor....	48
<b>Figura 29</b> Elementos de una máquina de refrigeración por absorción.....	50
<b>Figura 30</b> Esquema de la instalación de un sistema de refrigeración por absorción	51
<b>Figura 31</b> Esquema de una célula Peltier .....	51



<b>Figura 32</b> Célula Peltier comercial TEC1-12706.....	52
<b>Figura 33</b> Fin de carrera comercial .....	53
<b>Figura 34</b> Indicador led que muestra la correcta ubicación del palpador .....	54
<b>Figura 35</b> Sistema de Control .....	54
<b>Figura 36</b> Diagrama control PI .....	56
<b>Figura 37</b> Diagrama control PD.....	57
<b>Figura 38</b> Diagrama control PID.....	58
<b>Figura 39</b> Estructura de un controlador difuso.....	59
<b>Figura 40</b> Ejemplo de posición del servomotor .....	61
<b>Figura 41</b> Motor Paso a Paso Bipolar .....	62
<b>Figura 42</b> Motor Paso a Paso Unipolar .....	63
<b>Figura 43</b> Arduino Mega 2560.....	64
<b>Figura 44</b> Rectificador de onda completa tipo puente .....	66
<b>Figura 45</b> Entrada y salida del rectificador de onda completa.....	66
<b>Figura 46</b> Diodo de alta velocidad 1N4148 .....	66
<b>Figura 47</b> Rectificador de precisión con entradas sumadoras.....	68
<b>Figura 48</b> Amplificador operacional de precisión OP27 .....	68
<b>Figura 49</b> Divisor de Tensión .....	70
<b>Figura 50</b> Divisor de voltaje generalizado con n resistores .....	70
<b>Figura 51</b> Respuesta de los diferentes filtros Gaussianos.....	73
<b>Figura 52</b> Comparador de voltaje LM311P .....	74
<b>Figura 53</b> Logotipo Gambas .....	75
<b>Figura 54</b> Logotipo Python .....	76
<b>Figura 55</b> Estructura metálica cabina.....	88
<b>Figura 56</b> Cabina de acrílico .....	88
<b>Figura 57</b> Barras laterales .....	89
<b>Figura 58</b> Ubicación conectores DB25 .....	89
<b>Figura 59</b> Configuración de pines conector DB25 .....	90
<b>Figura 60</b> Diagrama de bloques del control de humedad y temperatura .....	91
<b>Figura 61</b> Diagrama de flujo del control de humedad y temperatura .....	91
<b>Figura 62</b> Sensor DHT22 .....	92
<b>Figura 63</b> Circuito de activación del Humidificador .....	93
<b>Figura 64</b> Cabina.....	93

<b>Figura 65</b>	Propiedades físicas y mecánicas de la cabina.....	94
<b>Figura 66</b>	Recolector de gotas de condensado .....	96
<b>Figura 67</b>	Circuito de activación C. Peltier.....	96
<b>Figura 68</b>	Ventana principal del Toolbox Fuzzy. ....	98
<b>Figura 69</b>	Nombre y rango de la entrada para magnificaciones bajas. ....	98
<b>Figura 70</b>	Funciones de pertenencia de la entrada para magnificaciones bajas.....	99
<b>Figura 71</b>	Funciones de pertenencia de la salida para magnificaciones bajas .....	100
<b>Figura 72</b>	Reglas de inferencia para magnificaciones bajas .....	101
<b>Figura 73</b>	Comportamiento del Controlador Difuso en magnificaciones bajas.....	102
<b>Figura 74</b>	Circuito electrónico para posicionamiento del palpador .....	104
<b>Figura 75</b>	Servomotor GS-3639BB.....	105
<b>Figura 76</b>	Aditamentos Servomotor.....	106
<b>Figura 77</b>	Pieza Traverse Unit .....	107
<b>Figura 78</b>	Soporte Servomotor.....	107
<b>Figura 79</b>	Acople Servomotor.....	108
<b>Figura 80</b>	Circuito lógico para el movimiento del carro .....	108
<b>Figura 81</b>	Regulador de voltaje LM338K.....	110
<b>Figura 82</b>	Distribución de los componentes del regulador de 5Vdc.....	111
<b>Figura 83</b>	Rectificador de precisión a implementarse.....	112
<b>Figura 84</b>	Respuesta del rectificador de precisión .....	113
<b>Figura 85</b>	Circuito comparador de voltaje .....	113
<b>Figura 86</b>	Divisor de voltaje a implementarse .....	115
<b>Figura 87</b>	Circuito selector de magnificaciones.....	119
<b>Figura 88</b>	Placa de comunicación Arduino – Placa de control .....	120
<b>Figura 89</b>	Distribución de componentes de la Placa de Control.....	121
<b>Figura 90</b>	Pantalla inicial .....	121
<b>Figura 91</b>	Selección de puerto de comunicación .....	122
<b>Figura 92</b>	Panel principal de control.....	122
<b>Figura 93</b>	Aviso de palpador en posición.....	122
<b>Figura 94</b>	Progreso de toma de datos .....	123
<b>Figura 95</b>	Pantalla de gráficas .....	123
<b>Figura 96</b>	Ingreso de datos para reporte.....	124
<b>Figura 97</b>	Configuración para impresión o almacenamiento del reporte.....	124

<b>Figura 98</b> Dirección y nombre de almacenamiento de reporte .....	125
<b>Figura 99</b> Pantalla de calibración del equipo .....	125
<b>Figura 100</b> Salida del sistema .....	125
<b>Figura 101</b> Pantalla de ayuda al usuario .....	126
<b>Figura 102</b> Diseño de la nueva tapa frontal del procesador .....	127
<b>Figura 103</b> Conector antiguo del motor de la columna.....	128
<b>Figura 104</b> (a) Conector nuevo de 5 pines AERO MI-745M (b) Conector antiguo	128
<b>Figura 105</b> Ángulos estructurales en L, donde $a=20\text{mm}$ , $e=2\text{mm}$ .....	129
<b>Figura 106</b> Cabina de acrílico de 3mm de espesor .....	129
<b>Figura 107</b> Conectores DB25.....	130
<b>Figura 108</b> Soporte Humidificador .....	130
<b>Figura 109</b> Montaje módulos Peltier.....	131
<b>Figura 110</b> Rodamientos en mal estado retirados de la columna.....	131
<b>Figura 111</b> Vista superior del carro de la columna, rodamientos reemplazados ...	132
<b>Figura 112</b> Fines de carrera – Columna .....	133
<b>Figura 113</b> Relé de estado sólido del Traverse Unit .....	134
<b>Figura 114</b> Fresado del soporte para el servomotor.....	134
<b>Figura 115</b> Torneado del acople para el servomotor.....	134
<b>Figura 116</b> Servomotor acoplado al eje selector de velocidades .....	135
<b>Figura 117</b> Placa electrónica regulador variable.....	135
<b>Figura 118</b> Placa electrónica para Arduino.....	136
<b>Figura 119</b> Placa electrónica de control del procesador .....	137
<b>Figura 120</b> Configuración conector 1 .....	137
<b>Figura 121</b> Configuración conector 2 .....	138
<b>Figura 122</b> Diseño de la nueva tapa frontal del procesador .....	138
<b>Figura 123</b> Antigua tapa frontal del procesador.....	139
<b>Figura 124</b> Resultado final del proyecto .....	139
<b>Figura 125</b> Patrón de calibración .....	140
<b>Figura 126</b> Distribución normal.....	142
<b>Figura 127</b> Distribución t student .....	145
<b>Figura 128</b> Distribución F.....	148

## Resumen

El objetivo fue rehabilitar, modernizar y repotenciar la máquina puesto que ésta se encontraba en línea muerta, disponía de algunas piezas que ya no se producen, tampoco se disponía de planos que permitan la total comprensión de su estructura electrónica interna, lo que dificultaba la reparación. Se realizó un estudio total de los módulos del rugosímetro TALYSURF 5: Columna, Bancada, Traverse Unit y Procesador, donde éste último fue calificado en su estado de operación como malo, se descartaron algunas de las tarjetas electrónicas con las que contaba el equipo debido a que se manejaban con tecnología electrónica obsoleta y menos precisa que la actual reemplazando casi todo su funcionamiento y control por una tarjeta Arduino Mega 2560. Se diseñó un controlador capaz de cumplir con los requerimientos de accionamiento de partes mecánicas móviles, muestreo de datos y procesamiento más eficiente y preciso. Se implementó una interfaz hombre – máquina (HMI), que hace mucho más amigable la interacción del usuario con el equipo y todas sus funciones, además brinda la alternativa de visualizar las gráficas del perfil real de la pieza medida, perfil de rugosidad y perfil de ondulación. El perfil real se obtuvo a partir de la señal de voltaje entregada por el procesador, sensor de inductancia variable, ajustando dichos valores de voltaje al rango de 0V a 5V; posteriormente se realizó el filtrado digital con el método de aproximación de alto orden al filtro Gaussiano dependiendo del Cut-Off a usarse, obteniéndose así los perfiles de ondulación y rugosidad para posteriores cálculos.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **RUGOSIDAD SUPERFICIAL**
- **AUTOMATIZACIÓN**
- **INSTRUMENTO DE MEDIDA**
- **REPOTENCIACIÓN**

## **Abstract**

The aim was to rehabilitate, modernize and enhance the machine because it was in dead line, it had some pieces that are no longer produced, nor was plans that allow full understanding of its internal electronic structure, making it difficult to repair. A total study of the profilometer Talysurf 5 modules was made: Column, Bench, Traverse Unit and Processor where the latter was qualified in its state of operation as bad, some of the electronic cards that had the machine were discarded because they had obsolete electronic technology and less precise than the current, replacing most of its operation and control by an Arduino Mega 2560 card. A controller capable of satisfy the requirements of moving mechanical parts, more efficient and accurate data sampling and processing was designed. A Human Machine Interface (HMI), which makes it much more friendly user interaction with the computer and all its functions, also provides the option to view graphs of the real profile, the roughness profile and the waviness profile was implemented. The real profile is obtained from the voltage signal delivered by the processor, variable inductance sensor, adjusting those values of voltage to a 0V to 5V range; subsequently digital filtering is performed using the high order approximation method to the Gaussian filter depending on the cut-off to be used, obtaining profiles of waviness and roughness for subsequent calculations.

### **KEY WORDS:**

- **SURFACE ROUGHNESS**
- **AUTOMATION**
- **MEASURING INSTRUMENT**
- **REHABILITATION**

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 Antecedentes**

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en la actualidad posee nueve departamentos, entre los cuales se encuentra el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM), el mismo que brinda soporte a las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica. La universidad cuenta con un laboratorio de Metrología, en el que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica realizan prácticas; este laboratorio se encuentra dotado de instrumentos de taller como regla, flexómetro, galga, escuadra, compás, nivel, pie de rey, micrómetro, entre otros y máquinas para medición de superficies como Autocolimador, Rugosímetro y Durómetro.

Tabla 1

## Equipos e Instrumentos del laboratorio de Metrología

LONGITUDES		ÁNGULOS		SUPERFICIES	
VERIFICACIÓN	APRECIACIÓN	VERIFICACIÓN	APRECIACIÓN	VERIFICACIÓN	APRECIACIÓN
Comparador Electrónico	0,0002 mm	Patrón Perpendicularidad	Grado 1	Placas Ópticas Planas	0,0001 mm
Bloques Patrón	Grado 1	Nivel Electrónico	2 s	Alineador Láser	5 mm
Patrón de Aturas	0,00001 "	Barra de Senos	125 mm		
Metroscopio Universal de Longitudes	0,0002 mm	Patrones Angulares	Grado 1		
Verificador de comparadores de reloj	0,0002 mm	Proyector de Perfiles MP	10 X - 50 X		
		Microscopio de Herramientas	3 min		
MEDICIÓN		MEDICIÓN		MEDICIÓN	
Alexómetro	0,001 mm	Cabezal Divisor Vertical	1 s	Autocolimador	0,2 s
Comparador de Reloj	0,001 mm	Goniómetro	1'	Rugosímetro	0,00002 mm
Proyector de Perfiles ST	10 X	Clinómetro	1°	Durómetro	Décimas HRc
Micrómetros de Exteriores	0,001 mm	Escuadra Universal	1°		
Pie de Rey	0,02 mm				
Gramil Graduado	0,02 mm				
Reglas de Ingeniero	150-300 mm				
Flexómetro	1 mm				
Microscopio de Herramientas	0,001'				

Fuente: Laboratorio de Metrología

Actualmente el laboratorio de Metrología dispone de dos rugosímetros, uno portátil de marca Mitutoyo y uno modular de marca Taylor – Hobson modelo Talysurf 5, el mismo que se ha mantenido en desuso por aproximadamente 22 años.

En el presente proyecto se trabajará con el rugosímetro Talysurf 5, el cual es un sistema modular de medición de textura de la superficie, usa un procesador para proporcionar una selección de parámetros de rugosidad, junto con sus gráficos de perfil primario, de rugosidad y de ondulación. Es considerado un rugosímetro de investigación de alta precisión debido al número de parámetros que con este se puede medir (18 diferentes parámetros). Consume un máximo de 150VA y funciona con 90-130V y 180-260V, 50 y 60Hz, una humedad relativa de 10 a 90% y una temperatura de operación de +5°C a 45°C.



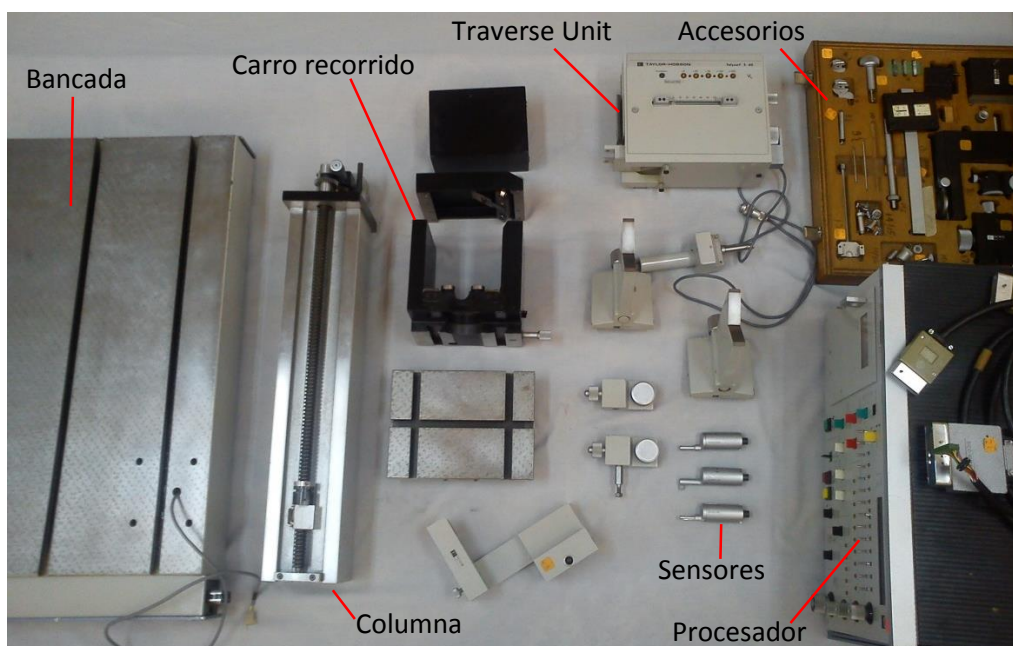
**Figura 1 Rugosímetro marca TAYLOR – HOBSON modelo TALYSURF 5**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

En primera instancia, se consideró la idea de utilizar la bancada como superficie de referencia y posteriormente darlo de baja de inventario, pero al existir nuevos profesionales en Mecatrónica de la universidad se propone un proyecto de rehabilitación y modernización del equipo.

A continuación se presenta el estado inicial del equipo:





**Figura 2 Estado inicial del rugosímetro**

El equipo se encuentra desarmado y ocupando una de las mesas de trabajo del laboratorio de Metrología. El procesador es obsoleto y se encuentra averiado. Los accesorios del rugosímetro se encuentran en perfecto estado y almacenados; pero no pueden ser usados.

Además realizando un análisis superficial de las piezas que conforman el rugosímetro se obtuvo las siguientes tablas de inspección:

Tabla 2

## Inspección física del carro de recorrido

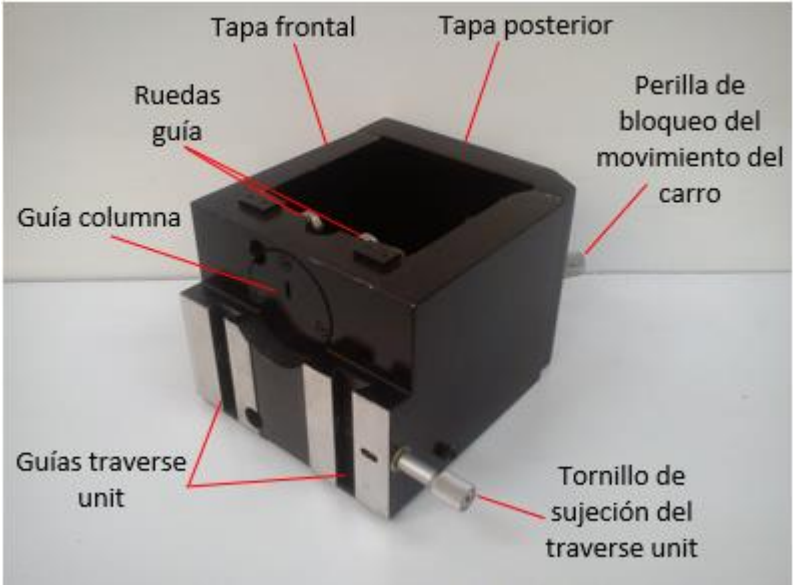
Tabla de Inspección Física			
Carro recorrido que soporta la unidad transversal			
			
Nota. Inspección visual			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Ajuste de tapas - frontal y posterior	5	
2	Estado guías - traverse unit, columna	5	
3	Sujeción traverse unit	5	
4	Estado ruedas guía	1	Deben ser cambiadas
5	Bloqueo del movimiento del carro	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 3

## Inspección física del soporte palpador

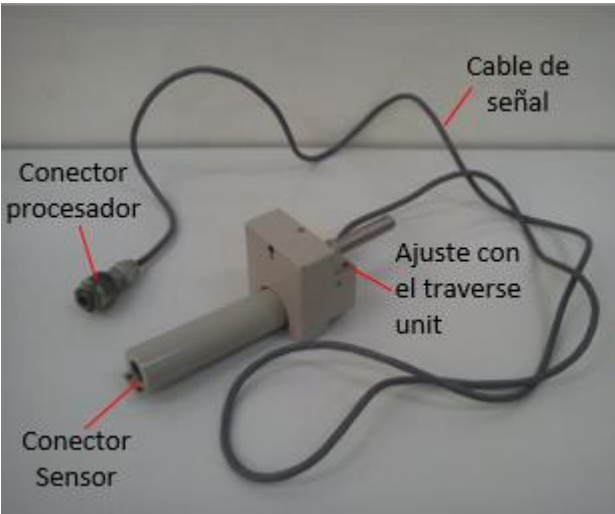
Tabla de Inspección Física			
Soporte de sensor			
			
Nota. Inspección visual y multímetro con medidor de continuidad.			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado conector con procesador	5	
2	Estado conector con sensor	5	
3	Ajuste con el traverse unit	3	No posee uno de los tornillos de ajuste
4	Generación de señal	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 4

## Inspección física Traverse Unit.

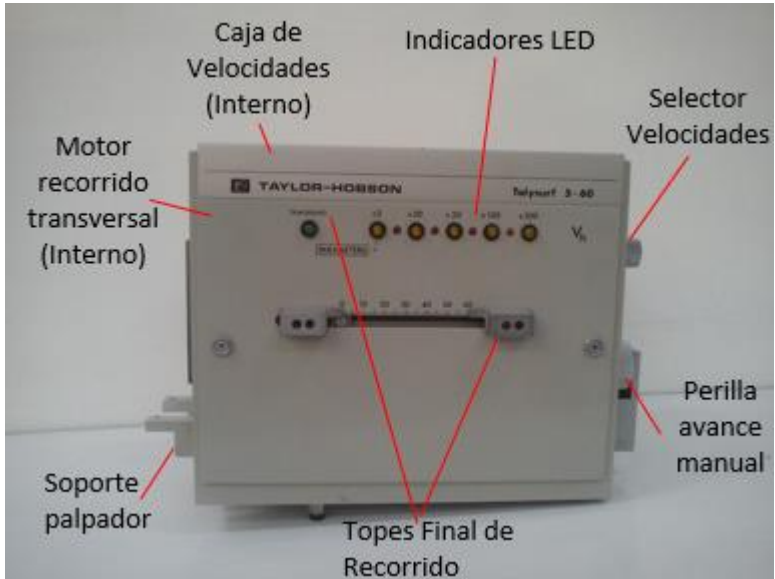
Tabla de Inspección Física			
Traverse Unit			
			
<p>Nota. Uso de multímetro, conexión al procesador, juego de herramientas allen, destornilladores.</p>			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado del motor de recorrido transversal	1	No presenta respuesta ante mando electrónico del procesador.
2	Caja de Velocidades - oxido, desgaste de engranes, lubricación	2	No brinda un movimiento constante
3	Movimiento de los engranes de la caja de velocidades	2	Grasa seca y vieja
4	Soporte del sensor - Fijación del sensor con el traverse unit	5	
5	Estado del selector de velocidades	5	Previa a apertura de caja
6	Configuración de engranes en caja de velocidades	5	
7	Funcionamiento de topes de Final de Recorrido	5	
8	Funcionamiento de Indicadores Led	5	
9	Desplazamiento manual del soporte de sensor	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 5

## Inspección física de la bancada

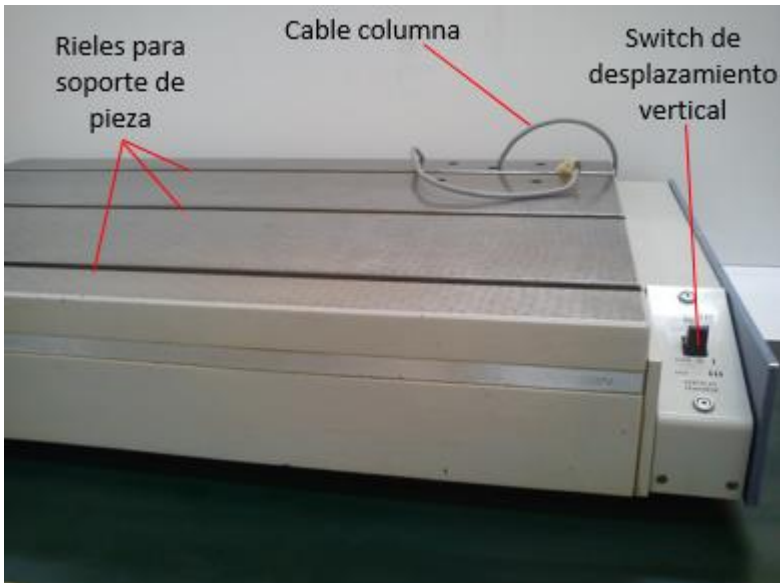
Tabla de Inspección Física			
Bancada			
			
Nota. Inspección visual y uso de procesador			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado físico de la bancada - parte mecánica	5	
2	Funcionamiento del switch de desplazamiento vertical del carro de la columna	1	No presenta respuesta ante mando electrónico
3	Estado de cable conector con la columna - Conectores, continuidad	3	Conectores viejos, frágiles, alto riesgo de corte de señal
4	Estado de rieles alojadoras de soportes de pieza	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 6

## Inspección física de la columna

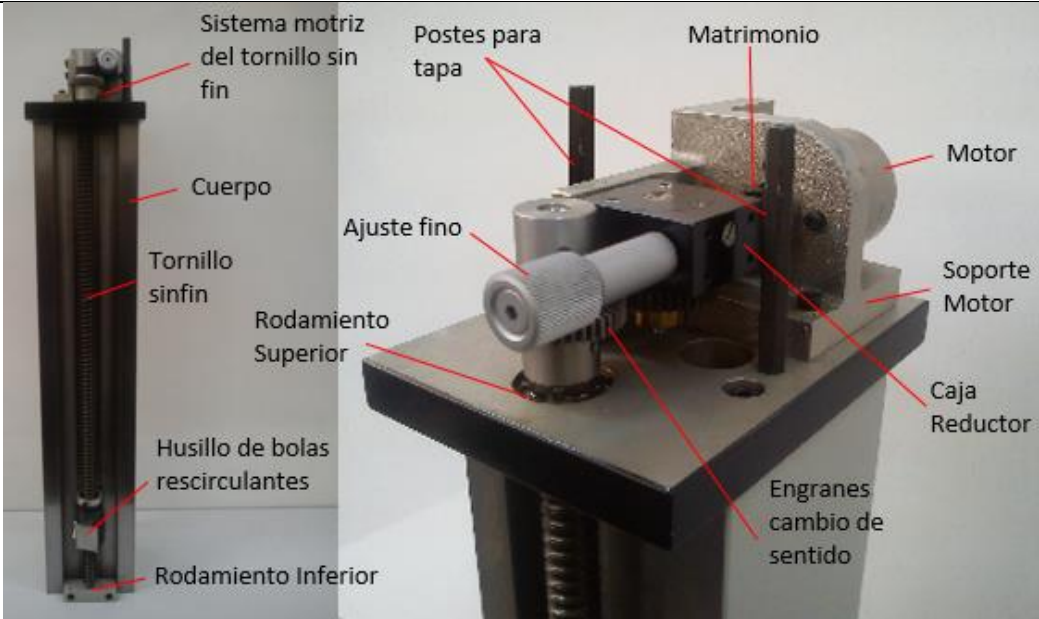
Tabla de Inspección Física			
Columna de desplazamiento del soporte del sensor			
 <p>El diagrama muestra dos vistas de la columna de desplazamiento del soporte del sensor. La vista de la izquierda muestra el cuerpo principal con un tornillo sin fin que impulsa un husillo de bolas rescirculantes. La vista de la derecha muestra el mecanismo de transmisión que incluye un motor conectado a una caja reductora con engranes de cambio de sentido, un soporte de motor y un ajuste fino. Otros componentes como los rodamientos superior e inferior, los postes para la tapa y el matrimonio de engranes también están etiquetados.</p>			
Nota. Conexión con fuente de tensión continua, 12V			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Funcionamiento del motor	4	En funcionamiento continuo el motor tiende a disminuir el movimiento
2	Estado de la caja reductora	4	Despostillado en engrane de cambio de sentido, movimiento brusco
3	Estado del soporte del motor	5	
4	Estado de postes aseguradores de la tapa - fisuras, desgaste	2	Uno de ellos presenta una fisura por lo que podría llegar a fraccionarse
5	Estado del cuerpo	5	
6	Tornillo sinfín - fisuras, lubricación, grietas	5	
7	Funcionamiento del husillo de bolas - bolas completas, lubricación interna	5	Presenta dificultad al subir y bajar (falta de lubricación)
8	Rodamiento Inferior - alineación	3	Presenta desalineamiento (mal montaje)
9	Ajuste fino manual	2	Existe un roce con la tapa
10	Estado del matrimonio (motor - caja reductora)	5	
11	Engranes cambio de dirección del movimiento - estado de dientes	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 7

## Inspección física de tapa del sistema motriz de la columna

Tabla de Inspección Física			
Tapa del sistema motriz de la columna			
			
Nota. Inspección visual, uso de juego de herramientas allen.			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado de la tapa en general	5	
2	Ajuste a los postes de la columna	5	
3	Agujero para tornillo de ajuste fino	3	Presenta rozamiento con el tornillo de ajuste fino
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

**Tabla 8**  
**Inspección física del procesador**

Tabla de Inspección Física			
Procesador			
Nota. Conexión a toma 110VAC			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Funcionamiento del procesador	1	No enciende, no operativo para brindar parámetros de rugosidad ni es posible tomar los perfiles de rugosidad y ondulación
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			



Tabla 9

## Inspección física soporte de pieza 1


Tabla de Inspección Física			
Soporte de Pieza 1			
			
Nota. Inspección visual.			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado físico del soporte	4	Rayones en la pintura
2	Ajuste con la bancada	5	
3	Estado tornillo de ajuste	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 10

## Inspección física soporte de pieza 2

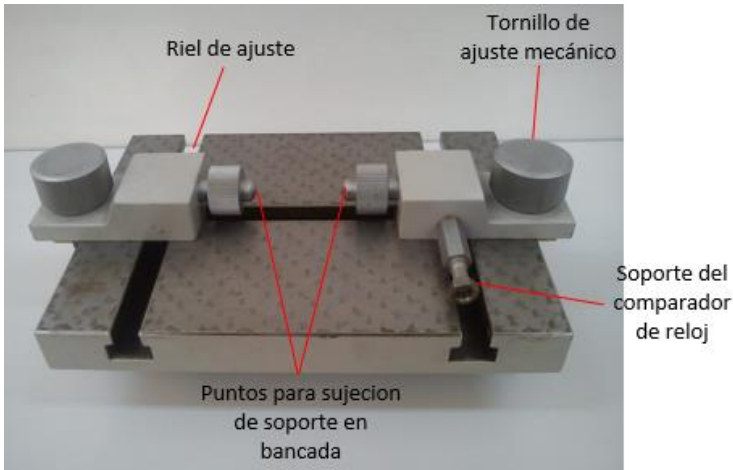
Tabla de Inspección Física			
Soporte de Pieza 2			
			
Nota. Inspección visual, uso de manual de equipo.			
Nº	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Ajuste mecánico de soporte de rieles	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 11

## Inspección física accesorios


Tabla de Inspección Física			
Accesorios			
			
Nota. Uso de manual del equipo.			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Verificación de lista de accesorios	3	Accesorios faltantes
2	Estado accesorio disponibles	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 12

## Inspección física de patrón de calibración


Tabla de Inspección Física			
Patrón de Calibración de Rugosidad			
			
Nota. Uso de documentación del laboratorio.			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado superficie - Rayaduras o fracturas visibles (no a nivel microscópico)	3	No se dispone de un certificado de patrón vigente
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 13

## Inspección física palpador de aguja




<b>Tabla de Inspección Física</b>			
Palpador de Aguja 112/1622-275			
 <p>Nota. Inspección visual, conexión con el procesador del equipo.</p>			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado de la punta de diamante	5	
2	Estado del patín	5	
3	Generación de señal	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

Tabla 14

## Inspección física palpador de aguja

<b>Tabla de Inspección Física</b>			
Palpador de Aguja 112/1620-685			
 <p>Nota. Inspección visual, conexión con el procesador del equipo.</p>			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado de la punta de diamante	5	
2	Estado del patín	5	
3	Generación de señal	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

**Tabla 15**  
**Inspección física palpador de aguja**

<b>Tabla de Inspección Física</b>			
Palpador de Aguja 112/1621-387			
			
Nota. Inspección visual, conexión con el procesador del equipo.			
N°	Parte a inspeccionar	Calif.	Observaciones
1	Estado de la punta de diamante	5	
2	Estado del patín	5	
3	Generación de señal	5	
Calificación: 1 lo peor.....5 sin novedad, bien			

## 1.2 Justificación e importancia

La metrología forma parte de un grupo de asignaturas que tiene relación con la ingeniería de producción.

El proyecto se desarrollará con el propósito de que el laboratorio de Metrología brinde asistencia técnica a las empresas y así estas puedan tener un mejor control de calidad del acabado superficial de las piezas de su interés. Además se busca que los estudiantes de Ingeniería Mecánica puedan realizar prácticas en el equipo.

La medición de la rugosidad superficial es importante debido a que los nuevos procesos de manufactura exigen alta precisión, alta exactitud y una calidad de acabados superficiales N4 y N5 como se podrá observar en el capítulo 2.

El objetivo es rehabilitar y modernizar la máquina puesto que esta se encuentra en línea muerta, ya que posee algunas piezas caducas que están fuera de producción, además no existen planos que permitan la total comprensión de su estructura interna, lo que complica su reparación. Preliminarmente, luego de los estudios y análisis

realizados se reemplazará todo el procesador que actualmente tiene la máquina, el mismo que posee tarjetas electrónicas averiadas y obsoletas, impresora en papel térmico que muestra la gráfica de rugosidad, así como transistores que se encuentran fuera de producción, emanan abundante cantidad de calor y que necesitan disipadores de calor de gran tamaño, por un controlador que use la tecnología de Arduino, moderno, mucho más compacto, que emane menos calor, que muestre la gráfica de rugosidad en la pantalla del computador y que posea elementos electrónicos actualmente accesibles en el mercado, además permitirá controlar la posición del palpador con el que se mide la rugosidad, y adicionar una interfaz hombre/máquina en la cual se podrán realizar configuraciones de los parámetros de lectura y monitorear datos en tiempo real.

Al final obtendremos prácticamente un equipo que beneficiará a la Universidad, el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica - DECEM, el laboratorio de Metrología y los usuarios, ya que el equipo se adquirió en el año de 1987 por un costo de 23.850,00 USD “Fuente: Inventario del laboratorio de Metrología con fecha 21/12/1990” y actualmente un equipo con la tecnología mencionada que se incluirá en el Ecuador bordea los \$24.000,00 USD “Fuente: Asesor Técnico de INSIZE”.

### **1.3 Alcance del proyecto**

Se entregará el rugosímetro Talysurf 5 totalmente operativo, funcional y modernizado capaz de medir variables relacionadas con la rugosidad y observar la ondulación superficial. El laboratorio beneficiario dispondrá de la siguiente documentación técnica: manual de operación y mantenimiento, diagramas de conexión eléctrica, planos mecánicos de piezas manufacturadas y una guía de práctica para el estudiante.

### **1.4 Metodología**

Para lograr el alcance planteado se efectuará un estudio pormenorizado de los sistemas mecánico, electrónico y de control que componen el equipo.

### 1.4.1 Sistema mecánico

Para la rehabilitación del rugosímetro Talysurf 5 se requiere realizar un análisis del estado actual de las piezas mecánicas que lo componen, para conocer cuáles se encuentran en buen estado y cuáles no; las piezas en buen estado conformarán la parte mecánica del proyecto y las piezas que no están en buen estado serán reparadas o reemplazadas.

Para la modernización del equipo se le adicionará una estructura mecánica que servirá para evitar posibles corrientes de aire portadoras de impurezas que afecten la precisión de la medición.

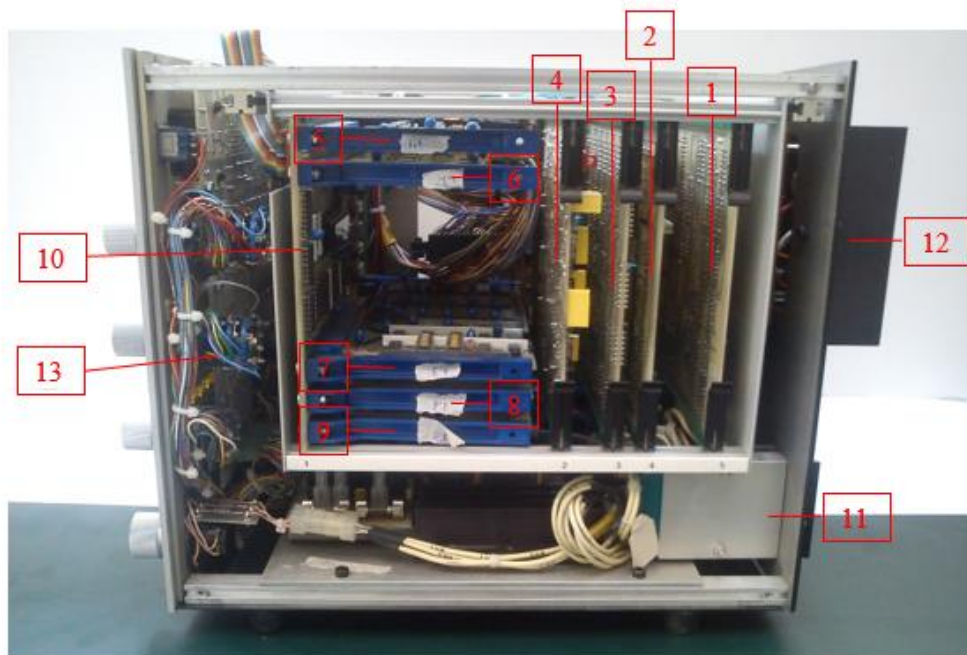


**Figura 3 Estructura metálica de referencia para repotenciar el equipo**

Fuente: (HOBSON, 2015)

### 1.4.2 Sistema eléctrico/electrónico

En primer lugar se estudiarán las partes modulares que componen el rugosímetro y su funcionamiento eléctrico y electrónico para conocer el estado de estos y saber cuál podrá ser usado a futuro.



**Figura 4 Circuitería del procesador del rugosímetro**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

**Tabla 16**

**Componentes internos del procesador en el estudio inicial**

Item	Parte
1	Tarjeta para Impresión
2	Tarjeta de circuitos integrados
3	Tarjeta de circuitos integrados
4	Tarjeta de circuitos integrados
5	Tarjeta de circuitos integrados
6	Tarjeta de circuitos integrados
7	Tarjeta de circuitos integrados
8	Tarjeta de circuitos integrados
9	Tarjeta de circuitos integrados
10	Tarjeta de circuitos integrados
11	Tarjeta para calibración del sensor
12	Regulador de Voltaje y disipador de calor (5V)
13	Circuitería del panel frontal

Nota. Se desconoce el funcionamiento de cada una de las tarjetas

En cuanto a los componentes electrónicos a usarse, inicialmente se puede citar integrados tales como amplificadores operacionales, microcontroladores y demás que conforme avance el proyecto se irá definiendo.

Se utilizará una placa de Arduino que cumplirá las siguientes funciones:

- Tarjeta de adquisición de datos
- Convertidor análogo digital
- Controlador en los sistemas de control a implementarse en el posicionamiento del palpador en el eje Z.
- Comunicación con la interfaz presente en el computador conectado al rugosímetro.
- El algoritmo que maneje la información proveniente del sensor inductivo, se lo realizará en el software propio de Arduino.

La interfaz hombre máquina se realizará mediante la guía ergonómica de diseño de interfaz de supervisión (GEDIS), la misma que será implementada en cualquier computador que se conecte a los instrumentos de medición. Esta se realizará en software libre.

El uso de componentes básicos como resistencias, diodos y demás también estarán presentes en el proyecto, los mismos que por ser una etapa inicial aún no están totalmente definidos, pero que al desarrollarse el proyecto se definirá con mayor exactitud.

### **1.4.3 Sistema de control**

Los datos tomados por el sensor inductivo permitirán generar un sistema de control para el posicionamiento en el eje Y. Se utilizará un control PID o Fuzzy, este controlador permitirá posicionar el sensor a una distancia en la que entre en contacto con la superficie a medirse y esté perfectamente perpendicular a esta.

En cuanto al recorrido del sensor en el eje longitudinal, se realizará un control ON/OFF al motor que dependerá de la distancia a recorrer y velocidad seleccionada.





**Figura 5 Traverse Unit**

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Rehabilitar y modernizar el rugosímetro marca TAYLOR – HOBSON modelo TALYSURF 5 del laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Conocer las partes y determinar el estado de operación de ellas.
- Diseñar y fabricar el controlador requerido por el equipo para su adecuado funcionamiento.
- Realizar una interfaz hombre máquina en la cual se visualice los parámetros de interés como: desplazamiento longitudinal, perfil primario, perfil de rugosidad y de ondulación, parámetros de rugosidad, entre otros.
- Realizar pruebas de funcionamiento, puesta a punto y calibración del equipo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Conceptos Generales de la Medición de la Textura de Superficies

##### 2.1.1 Definiciones Esenciales

Una superficie tecnológica o de ingeniería significa cualquier superficie generada por los métodos de fabricación, tales como corte y desbaste (en su mayoría), conformado y los procesos no convencionales para remoción de material (mecanizado por electroerosión, chorro de agua, mecanizado láser, etc.). La superficie de ingeniería logra, después del proceso correspondiente, nuevas propiedades y características en comparación con la inicial, que constituyen lo que llamamos integridad de la superficie. Este término se refiere a:

1. Las características geométricas (textura, topografía); y
2. Físico-química, características cristalográficas y las propiedades mecánicas de la superficie, como micro dureza, tensiones residuales, capas deformadas plásticamente o fracturadas, resistencia a la corrosión, la absorción, la energía de superficie y otros.

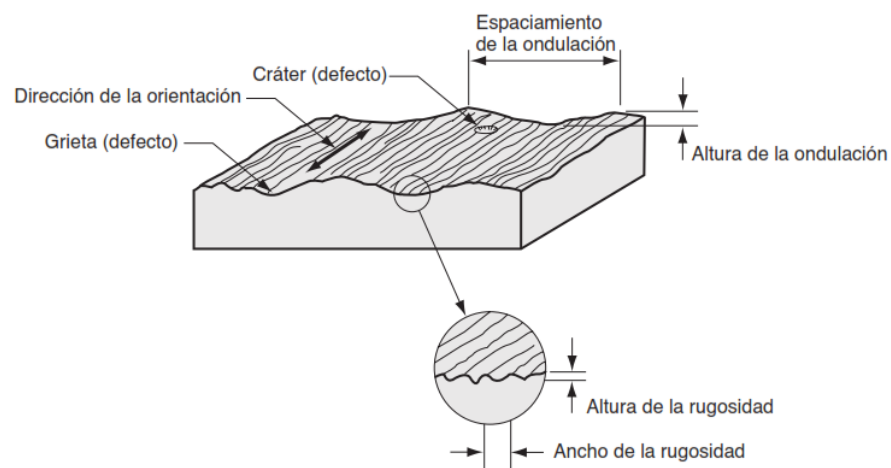
Integridad de la superficie, como se define, se asocia con el proceso de fabricación, así como el entorno para superficie libre, y la interfaz y las condiciones de trabajo en los sistemas de tribológicos.

A continuación, nos centraremos en la caracterización y análisis de la textura de la superficie y sobre todo de la rugosidad superficial. Vale la pena dar aquí algunas definiciones útiles:

- Superficie nominal: La superficie de la pieza con la forma y dimensiones prescritas en el dibujo; se considera que no hay irregularidades de la superficie.
- Perfil real: La representación del perfil superficial representado por instrumentos de medición mecánicos u ópticos. Cabe señalar que las mediciones de perfil son llevadas a cabo en la dirección de la orientación

característica de asperezas superficiales, que por lo general coincide con una dirección normal al eje del proceso (normal a la velocidad de corte en las operaciones de corte). Una superficie de corte exhibe un mínimo desnivel paralelo al eje (ondulación), mientras que las alturas máximas de las asperezas son encontrados en la dirección normal.

- Rugosidad (textura primaria): Las irregularidades en la textura superficial que resultan de la acción inherente del proceso de fabricación. Estas incluyen marcas de alimentación transversal y las irregularidades dentro de ellas (Figura 6).
- Ondulaciones (textura secundaria): Ese componente de textura superficial sobre el que se superpone la rugosidad. La ondulación puede resultar de factores tales como maquinado o deflexión por trabajo, vibraciones, tratamientos térmico o esfuerzos de deformación (Figura 6).



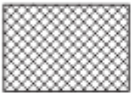






**Figura 6 Textura superficial, rugosidad y ondulación**

Fuente: (Groover, 2007)

Estas distinciones son por lo tanto cualitativas no cuantitativas, sin embargo, es de considerable importancia definir las de manera que queden bien establecidas.

La **orientación** es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie. Está determinada por el método de manufactura utilizado para crear a la superficie, por lo general a partir de la acción de una herramienta de corte. En la Figura 7 se ilustran la mayoría de las orientaciones posibles que puede haber en una superficie, junto con el símbolo que utiliza el diseñador para especificarlas. (Groover, 2007)

Símbolo de la orientación	Patrón de la superficie	Descripción
=		La orientación es paralela a las líneas que representan a la superficie a que se aplica el símbolo.
⊥		La orientación es perpendicular a la línea que representa la superficie a que el símbolo se aplica.
X		La orientación es angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.
M		La orientación es multidireccional.
C		La orientación es circular en relación con el centro de la superficie para la que se utiliza el símbolo.
R		La orientación es aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie para la que se emplea el símbolo.
P		La orientación es particular, no direccional o protuberante.

**Figura 7 Orientaciones posibles de una superficie**

Fuente: (Groover, 2007)

A este respecto, las desviaciones geométricas de la superficie nominal caen dentro de las siguientes categorías:

- 1 Desviaciones Macrogeométricas (errores): Son las desviaciones de primer y segundo orden llamadas errores de forma y ondulaciones, respectivamente.
- 2 Desviaciones Microgeométricas: desviaciones de tercer orden y superior, que corresponden a la microforma superficial (rugosidad de la superficie).

Las diferentes desviaciones se enumeran en la Tabla 17, junto con sus principales fuentes.

**Tabla 17****Desviaciones geométricas de las superficies mecanizadas**

<b>Orden</b>	<b>Desviaciones</b>	<b>Causas</b>
1 <sup>ro</sup>	Errores de forma (planitud, redondez, rectitud, cilindridad, etc.)	Errores por deslizamientos de herramienta, deformaciones elásticas, fijación errónea de herramienta o pieza de trabajo, severo desgaste de la herramienta Giro excéntrico de la pieza o de la herramienta, vibraciones en el sistema de fabricación
2 <sup>do</sup>	Ondulaciones	(entorno de proceso, herramienta, pieza, máquina-herramienta), desgaste de la herramienta, la falta de Forma del borde de la herramienta, la cinemática del proceso, La morfología de la
3 <sup>ro</sup>	Ranuras	Desgaste de la punta de la herramienta, modo de formación de la viruta, procedimientos del galvanizado.
4 <sup>to</sup>	Grietas	Modo de cristalización, irregularidades debido a las reacciones químicas, daño
5 <sup>to</sup>	Estructura Cristalina	Alteraciones físicas y químicas de la estructura fina de materiales
6 <sup>to</sup>	Formación Cristalina	

Fuente: (Surface Integrity, ANSI 211.1, 1986)

Es evidente que los errores de forma y ondulación se pueden restringir en muchos casos. Por otra parte, la rugosidad de la superficie es inevitable, ya que es causada por la influencia de la herramienta de corte durante el proceso de eliminación de la viruta. De esta manera, la rugosidad es la magnitud dominante relacionada con la maquinabilidad del material procesado, la forma de la herramienta, las condiciones de mecanizado, los requisitos de tolerancia (forma y dimensiones), fenómenos tribológicos (fricción, desgaste), etc. Por otra parte, el conocimiento y análisis especial de la rugosidad apoya a proponer hipótesis en simulaciones, optimización, control adaptativo, etc., principalmente en aplicaciones de sistemas de fabricación modernos (CNC, FMS, CAD / CAM, CIM).

Por lo tanto se presenta la necesidad de describir la capacidad que tienen los distintos procesos de manufactura para lograr un determinado acabado superficial; de manera que para obtener mejores superficies, por lo general, se requiere de operaciones extra y más tiempo, lo que repercute en un incremento del costo de

fabricación. En la Tabla 18 se presentan valores de rugosidad superficial obtenidos por distintos procesos de manufactura.

Tabla 18

Rugosidad superficial de distintos procesos de manufactura,  $\mu\text{m}$  ( $\mu\text{-in}$ )

Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad <sup>b</sup>	Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad <sup>b</sup>
Fundición:			Abrasivos:		
Fundición con molde	Bueno	1-2 (30-65)	Esmerilado	Muy bueno	0.1-2 (5-75)
Fundición con revestimiento	Bueno	1.5-3 (50-100)	Rectificado	Muy bueno	0.1-1 (4-30)
Fundición con arena	Malo	12-25 (500-1000)	Bruñido	Excelente	0.05-0.5 (2-15)
Formado de metales:			No tradicionales:		
Laminado en frío	Bueno	1-3 (25-125)	Pulido	Excelente	0.1-0.5 (5-15)
Corte de lámina metálica	Bueno	1-3 (25-125)	Superacabado	Excelente	0.02-0.3 (1-10)
Extrusión en frío	Bueno	1-4 (30-150)	Fresado químico	Medio	1.5-5 (50-200)
Laminado en caliente	Malo	12-25 (500-1000)	Electroquímico	Bueno	0.2-2 (10-100)
Maquinado:			Térmico:		
Perforado	Bueno	0.5-6 (15-250)	Descarga eléctrica	Medio	1.5-15 (50-500)
Barrenar	Medio	1.5-6 (60-250)	Haz de electrones	Medio	1.5-15 (50-500)
Fresar	Bueno	1-6 (30-250)	Haz de láser	Medio	1.5-15 (50-500)
Planeado	Medio	1.5-12 (60-500)	Soldadura por arco	Malo	5-25 (250-1000)
Escariar	Bueno	1-3 (30-125)	Corte con llama	Malo	12-25 (500-1000)
Perfilar	Medio	1.5-12 (60-500)	Corte con arco de plasma	Malo	12-25 (500-1000)
Aserrar	Malo	3-25 (100-1000)			
Tornear	Bueno	0.5-6 (15-250)			

Fuente: (Surface Texture, ANSI B46.1, 1987), (Surface Integrity, ANSI 211.1, 1986)

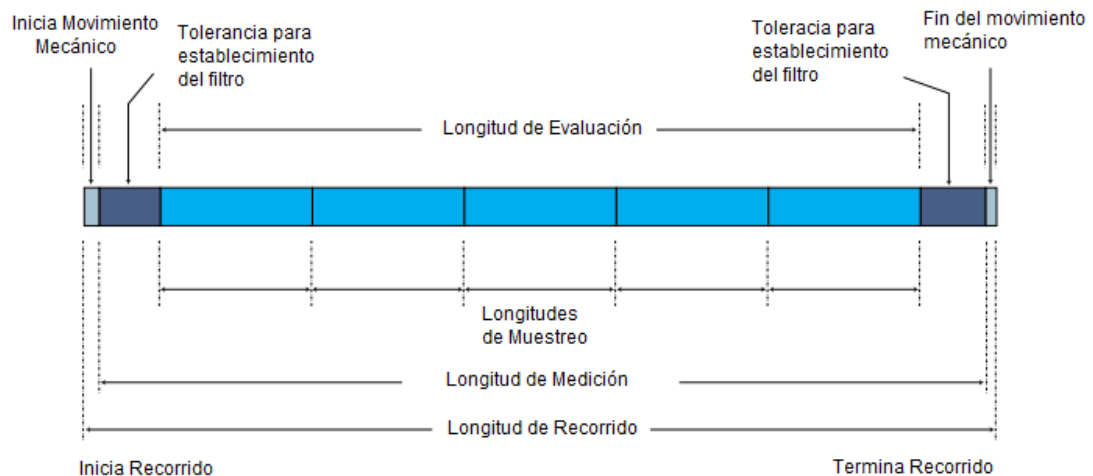
## 2.2 Parámetros de Textura Superficial

Para determinar los parámetros de rugosidad de una cierta muestra resultante de un proceso de manufactura, se debe conocer la forma en la que se selecciona las longitudes de medición que nos proporcionarán los datos suficientes para calcularlos, de manera que se eliminen datos que no aportan información útil y por el contrario distorsionan la calidad de la medición y consecuentemente los resultados.

### 2.2.1 Longitudes de ensayo

- Longitud de muestreo ( $l_m$ ): Esta es la longitud de la superficie sobre la que se realiza una sola evaluación de un parámetro (tal como  $R_a$ ). Para mayor comodidad normalmente es la misma que el “cut – off” ( $l_c$ ), aunque no siempre se cumple.
- Longitud de evaluación ( $l_n$ ): Esta longitud puede incluir varias longitudes de muestreo: la recomendación ISO es que cinco longitudes de muestra se incluyen en la longitud de evaluación. La mayoría de los parámetros se calculan como el valor medio a través de todas las muestras dentro de la longitud de evaluación, aunque en algunos casos es el valor máximo o mínimo en cualquiera de las longitudes de la muestra.
- Longitud de medición. Esta es la longitud sobre la que se procesan los datos: después de la filtración, se remueve una cierta cantidad de datos de la longitud de medición para dejar solo la longitud de evaluación.
- Longitud de recorrido. Esta es la distancia sobre la cual la aguja atraviesa la superficie. El recorrido es mayor que la longitud de medición, ya que es necesario para permitir un pequeño movimiento para permitir la aceleración y deceleración mecánica.





**Figura 8 Longitudes de muestreo, evaluación y recorrido**

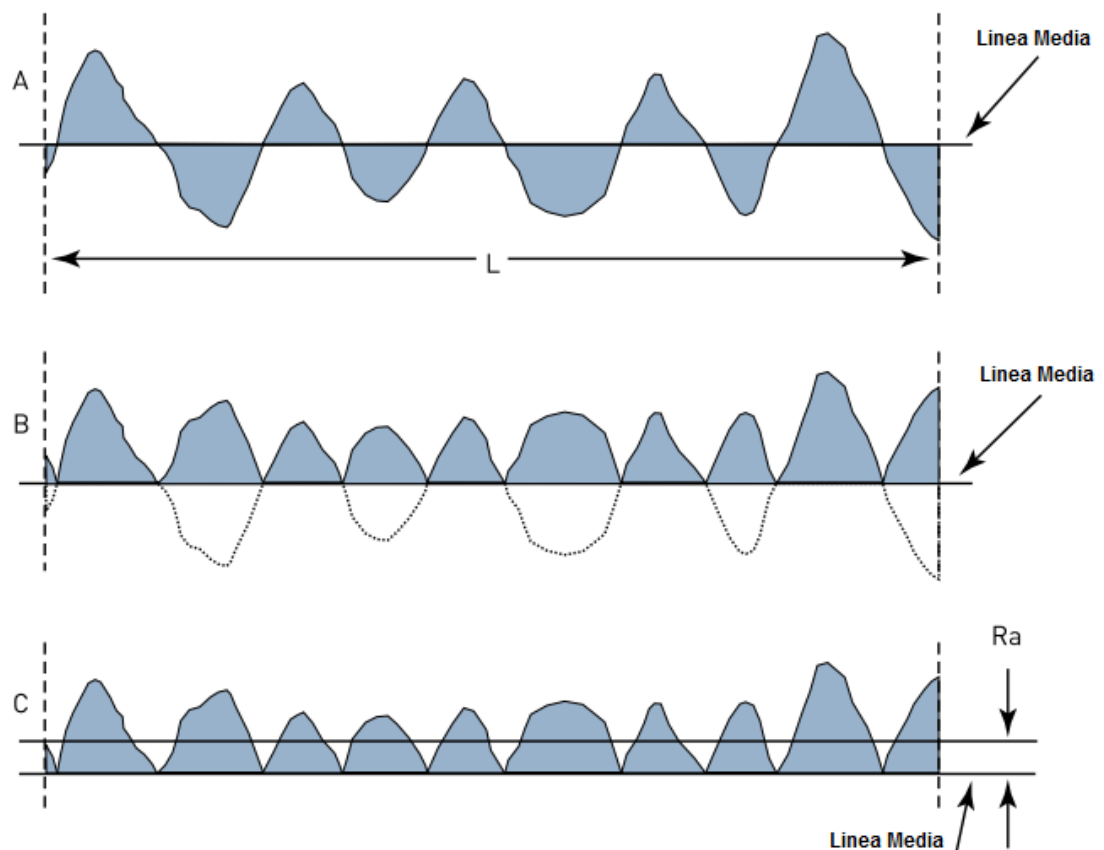
Fuente: (HOBSON, 2011)

Una vez definidas las distancias y el recorrido que hará la aguja sobre el perfil, podemos pasar a definir los diferentes tipos de parámetros que contemplan la rugosidad y la ondulación, teniendo parámetros de amplitud, que son las medidas del desplazamiento vertical del perfil; parámetros de espaciado, que son medidas de los espacios entre las irregularidades a lo largo de la superficie, independientemente de la amplitud de dichas irregularidades; y parámetros híbridos, que son la relación entre la amplitud y el espacio entre irregularidades

### 2.2.2 Parámetros de Amplitud

- $R_a$  (CLA) rugosidad aritmética media: el valor aritmético promedio del perfil de rugosidad filtrada determinado a partir de las desviaciones sobre la línea central dentro de la longitud de evaluación; el parámetro más popular para el control de calidad de un proceso de mecanizado y del producto. Este parámetro es fácil definir, fácil de medir incluso en los perfilómetros menos sofisticados y da una descripción general de la amplitud de la superficie. A pesar de que carece de significado físico, se establece en casi todos los estándares nacionales para la medición de rugosidad. Por otro lado, es insensible a pequeñas variaciones en el perfil y no da ninguna información sobre las características de longitud, tampoco hace ninguna distinción entre picos y valles.

Un cálculo indicativo de  $R_a$  se muestra en la Figura 9.

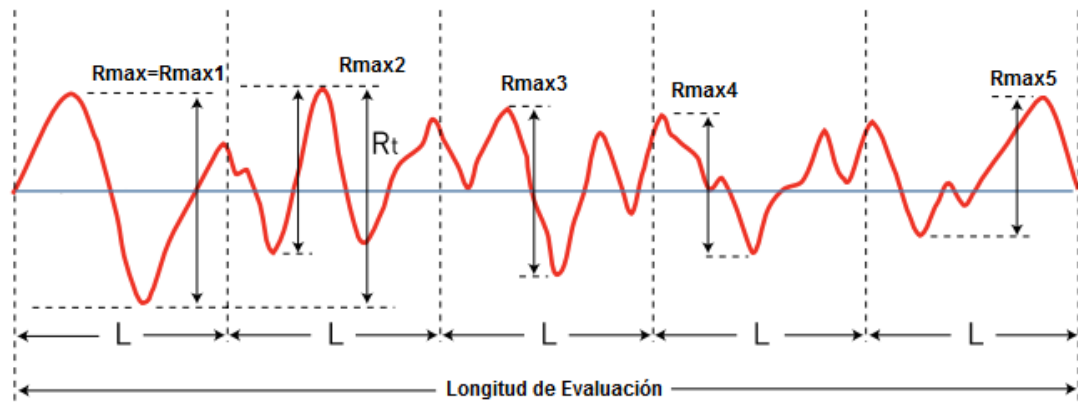


$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx; Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$$

**Figura 9 Ra y Rq**

Fuente: (HOBSON, 2011)

- Rq es el parámetro rms correspondiente a Ra. Ver Figura 9.
- Rmax es la altura máxima de pico a valle del perfil dentro de la longitud de muestreo L. Ver Figura 10
- Rt, es la altura máxima de pico a valle del perfil dentro de la longitud de evaluación. Ver Figura 10
- Rtm, es el promedio de Rmax en cinco longitudes de muestreo consecutivas. Es el equivalente de Rz DIN. Ver Figura 10.



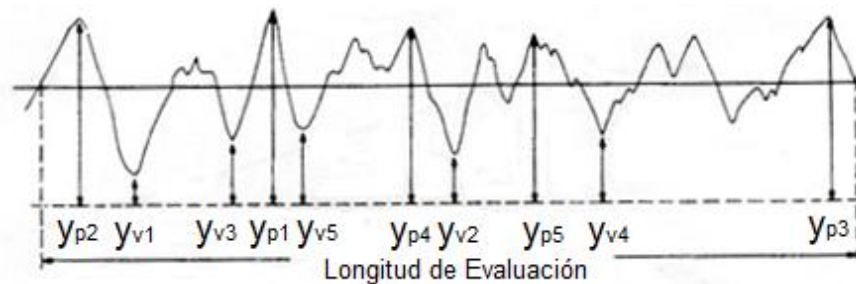
$$R_{tm} = \frac{R_{max_1} + R_{max_2} + R_{max_3} + R_{max_4} + R_{max_5}}{5}$$

$$= \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=5} R_{max_i}$$

**Figura 10 Rmax, Rt, Rtm**

Fuente: (HOBSON, 2011)

- R<sub>Z</sub>, se mide solamente en el perfil sin filtrar y numéricamente es la diferencia media de altura entre los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos dentro de la longitud de evaluación. El parámetro es determinado solamente sobre una longitud de muestreo. La definición dada anteriormente (usada en Talysurf 5) concuerda con la dada para R<sub>Z</sub> especificada en la norma ISO. Ver Figura 11.



$$R_Z = \frac{(y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + y_{p4} + y_{p5}) - (y_{v1} + y_{v2} + y_{v3} + y_{v4} + y_{v5})}{5}$$

$$= \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^{i=5} y_{pi} - \sum_{i=1}^{i=5} y_{vi} \right)$$

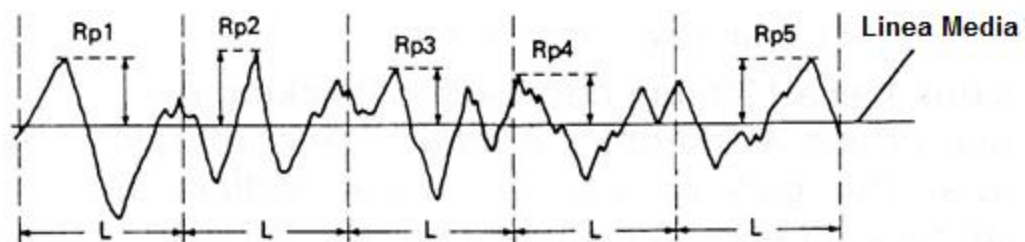
**Figura 11 R<sub>Z</sub>**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

- $R_{3t}$ , es la diferencia de altura entre el tercer pico más alto y el tercer valle más bajo dentro de la longitud de evaluación.  $R_{3tm}$  es entonces la media de  $R_{3t}$ , determinado sobre varias longitudes de evaluación consecutivas.  $R_{3tm}$  es equivalente a  $R_z$  JIS, siempre que se mida en el perfil sin filtrar.
- $R_p$  es la altura máxima del perfil sobre la línea media dentro de la longitud de evaluación.

El procesador tiene un switch para invertir el perfil, así que si es requerido, la profundidad máxima de la superficie del perfil debajo de la línea media se puede obtener. Ver Figura 12

- $R_{pm}$ , es el valor medio de  $R_p$  determinado sobre varias longitudes de muestreo. Como  $R_p$ , el  $R_{pm}$  de un perfil invertido puede ser medido. Ver Figura 12.



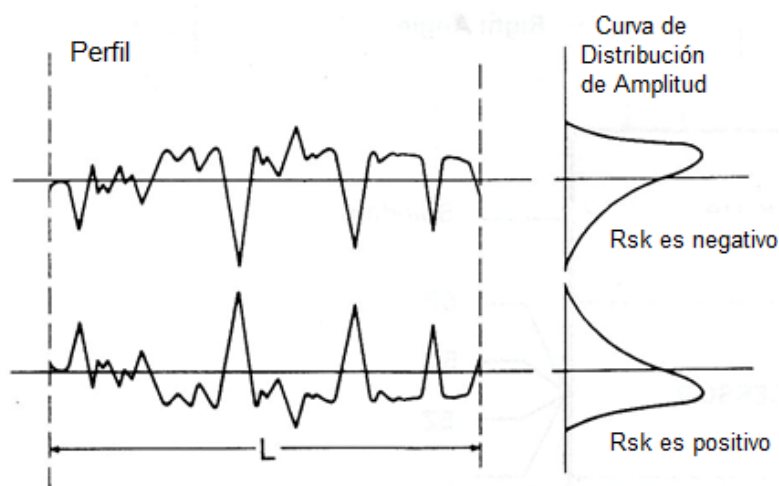
$R_p = R_{p2}$  En este perfil.

$$R_{pm} = \frac{R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_{p4} + R_{p5}}{5} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{i=5} R_{p_i}$$

**Figura 12  $R_p$ ,  $R_{pm}$**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

- $R_{sk}$ , es una medida de la asimetría de la curva de distribución de amplitud respecto a la línea media. Ver Figura 13.



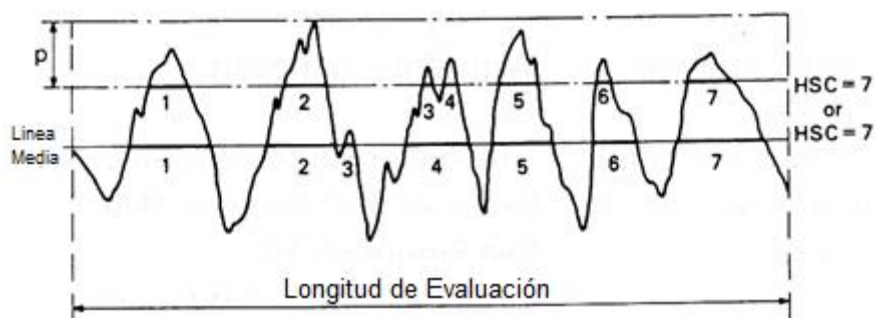
**Figura 13 Rsk**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

### 2.2.3 Parámetros de Espaciado

- High Spot Count (HSC) conteo de puntos altos, es el número de picos del perfil completo que sobresalen por encima de la línea media, o una línea paralela a la línea media y a una distancia preestablecida  $p$  por encima o debajo de una referencia preestablecida (que es normalmente o bien el pico más alto o la línea media).

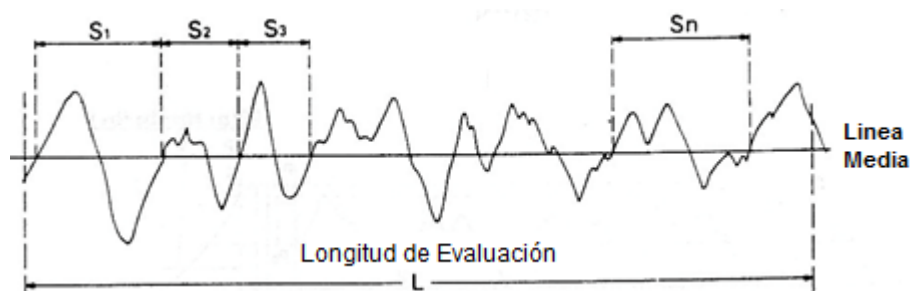
El conteo se efectúa sobre la longitud de evaluación y el valor que se indica es el número dentro de esta longitud. Ver Figura 14.



**Figura 14 HSC**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

- $S_m$ , es la distancia media entre los picos del perfil en la línea media, medida sobre la longitud de evaluación. Ver Figura 15.



$$S_m = \frac{S_1 + S_2 + S_3 \dots S_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} S_i$$

**Figura 15 S<sub>m</sub>**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

#### 2.2.4 Parámetros Híbridos

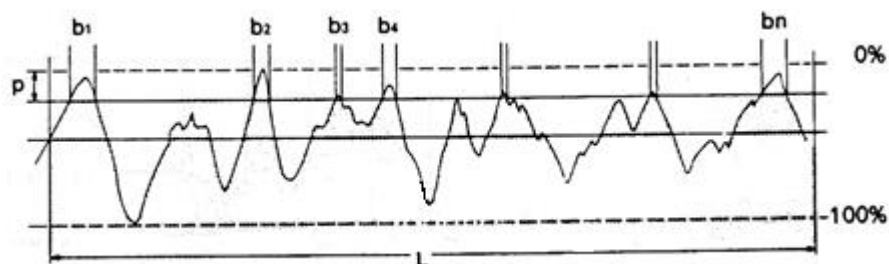
- $\Delta a$ , esta es la pendiente media del perfil a lo largo de la longitud de evaluación; es una relación adimensional, pero también se puede mostrar en grados.
- $\Delta q$ , similarmente, esta es el valor rms de la pendiente del perfil a lo largo de la longitud de evaluación, nuevamente aparece como una relación.
- $\lambda a$ , longitud de onda promedio es una medida de los espaciamientos entre picos y valles locales, teniendo en cuenta las amplitudes relativas y frecuencias espaciales individuales.

$$\text{Numéricamente } \lambda a = 2\pi \frac{Ra}{\Delta a}$$

- $\lambda q$ , este es el valor rms correspondiente al parámetro de longitud de onda.

$$\text{Numéricamente } \lambda q = 2\pi \frac{Rq}{\Delta q}$$

- $t_p$ , es la longitud de la línea de apoyo (expresado como un porcentaje de la longitud de evaluación) donde los picos han sido cortados a un nivel  $p$  por debajo del pico más alto o por encima de la línea media. Se mide sobre la longitud de evaluación. Ver Figura 16.



$tp$  (%) es la relación a una profundidad  $p$  seleccionada.

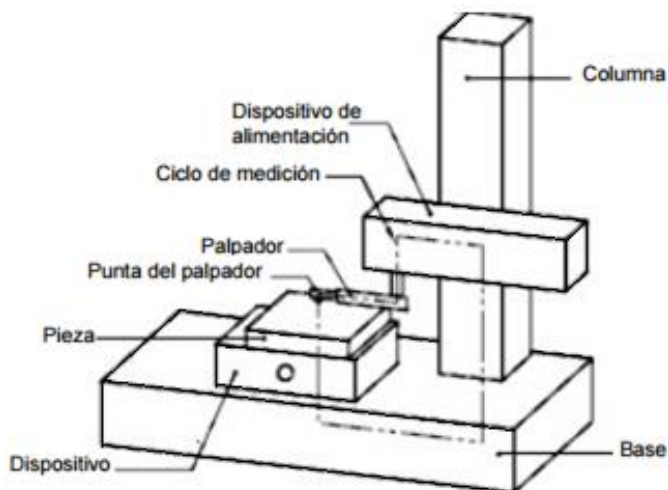
$$tp = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 \dots b_n}{L} \times 100 = \frac{100}{L} \sum_{i=1}^{i=n} b_i$$

**Figura 16  $tp$**

Fuente: (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK)

### 2.3 Instrumentos de medida para textura superficial

El rugosímetro es el instrumento que se usa para determinar el grado de aspereza en la superficie de un material. Por lo general los instrumentos que utilizan una aguja para realizar la medición están formados por una base, una columna, un dispositivo de movimiento transversal, un sensor (palpador) y partes para sostener la pieza a medir. Un esquema general se puede observar en la Figura 17.

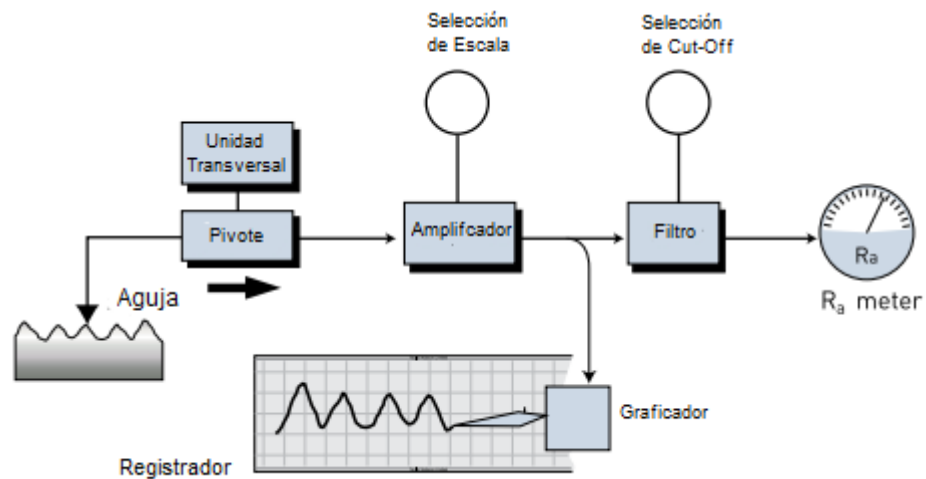


**Figura 17 Esquema General del Rugosímetro**

Fuente: (Mitutoyo, 2015)

El proceso básico que siguen todos los instrumentos de medida de este tipo es colocar una aguja sobre la superficie a medir y hacer que esta recorra a lo largo de la misma, de manera que se genera una señal eléctrica debido al movimiento vertical de

la aguja, se amplifica la señal y se usan los datos obtenidos para calcular los parámetros de rugosidad tales como  $R_a$ ,  $R_z$ , etc. (Figura 18) Anteriormente los resultados se obtenían de manera analógica, hoy en día el análisis es a través de ordenador y la presentación de resultados se realiza digitalmente.



**Figura 18 Configuración de un rugosímetro con palpador tipo aguja**

Fuente: (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)

Actualmente existen instrumentos para medir texturas superficiales que usan rejillas o láser para realizar un registro de datos más preciso, puesto que en instrumentos como el actual que se está rehabilitando y data de aproximadamente 33 años, el tiempo era la base para el registro de dichos datos y esto generaba errores de forma y dificultaba su aplicación en geometrías curvas.

### 2.3.1 Medidor

La función del medidor es convertir los movimientos verticales de la aguja en variaciones proporcionales de una señal eléctrica. La sensibilidad requerida del medidor es tal que debe responder a un movimiento menos que  $0.01\mu m$  de la aguja. Aunque la salida es muy pequeña, los sistemas de alta resolución pueden evaluar con precisión las desviaciones. Sin embargo, para que el operador pueda visualizar el perfil, los desplazamientos son amplificados por un factor de hasta  $\times 2000000$ . (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)



### **a) Transductores Análogos**

Para medidores superficiales, estos transductores pueden ser divididos en dos grupos, según su principio de operación:

#### **i. Sensibles a la posición:**

Estos entregan una señal proporcional al desplazamiento, incluso cuando la aguja está parada. La salida es dependiente de la distancia que la aguja sea desplazada y se relaciona solo con la posición de la aguja dentro de su rango de movimiento vertical. La ventaja con este tipo de sensor es que permite un verdadero registro de forma y ondulación. (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)

#### **ii. Sensibles al movimiento:**

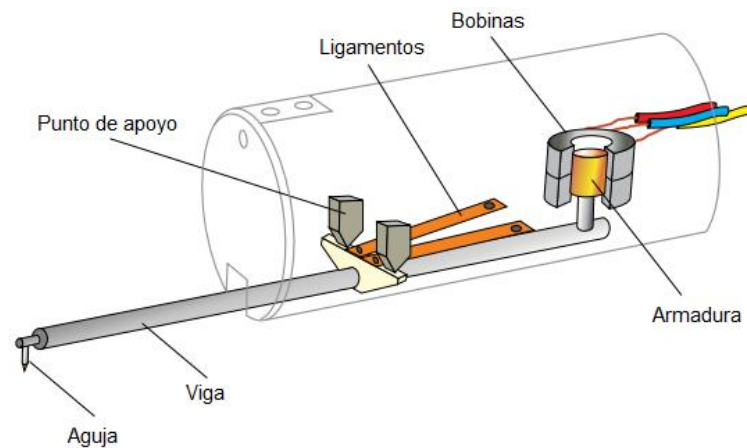
Este tipo de medidores, producen una salida únicamente cuando la aguja se mueve, la salida está relacionada con la velocidad a la cual la aguja se desplaza y siendo cero cuando el sensor está parado. Cuando el desplazamiento es muy lento, por ejemplo, debido a la ondulación muy espaciada o cambios de forma, la salida es extremadamente pequeña y para fines prácticos es cero. Por lo tanto, este tipo de sensor es más comúnmente usado en instrumentos con patín. (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)

### **b) Transductores Digitales**

Cuando la aguja se mueva, los pulsos correspondientes a múltiplos de la resolución del transductor son enviados a un contador electrónico que muestra el desplazamiento del medidor.

El rango típico de los coeficientes de resolución es del orden de 700000:1, de manera que la máxima resolución se da con el máximo rango.

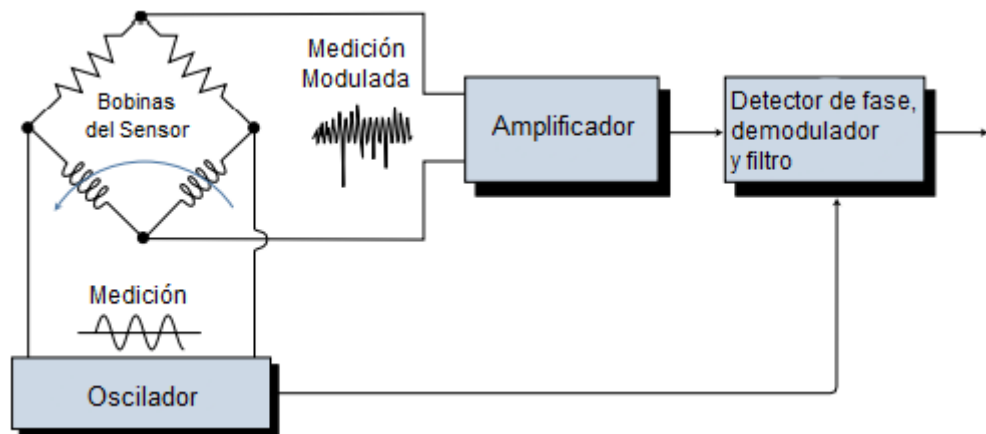
Para el caso de nuestro equipo el Talysurf 5, el medidor o sensor es un transductor de inductancia variable, cuyo esquema general se muestra en la figura (Figura 19).



**Figura 19 Sensor de inductancia variable**

Fuente: (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)

Este sensor cuya aguja se encuentra en el extremo de una viga pivotada, de manera que la armadura, cuyas bobinas están conectadas a un circuito de puente AC, se mueve proporcionalmente a la aguja, de tal modo que cuando la armadura está en el centro el puente se equilibra y la salida es cero. El movimiento de la armadura desequilibra el puente y produce una salida proporcional al desplazamiento de la aguja. La fase relativa a la señal depende de la dirección del movimiento. La señal es amplificada y comparada con la del oscilador para determinar en qué dirección se ha movido la aguja respecto a la posición central o cero. El uso de un oscilador para generar una salida AC constante es necesario porque el sensor, a diferencia del transductor sensible al movimiento, no genera ninguna salida. La aguja se mantiene en contacto con la superficie y con los puntos de apoyo por medio de un resorte débil que actúa sobre la viga. Los ligamentos evitan el movimiento de la viga en el plano horizontal, de manera que la aguja es libre solo de moverse verticalmente. (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)



**Figura 20 Diagrama esquemático del sistema modulado de medición**

Fuente: (HOBSON, Exploring Surface Texture, 2011)

## CAPÍTULO III

### DISEÑO MECÁNICO, ELECTRÓNICO Y DE CONTROL

#### 3.1 Especificación del producto

El diseño toma forma a partir de los objetivos y las necesidades que se han definido para el equipo, así como también de las diferentes tablas de inspección de las partes componentes de la máquina presentes en el Capítulo I, mismas que nos brindan un diagnóstico de las partes que necesitan ser reemplazadas y las que se pueden reutilizar; de tal manera que procederemos a establecer dichas necesidades y sus respectivas especificaciones en la Tabla 19, es decir aquellos detalles que nos permitirán escoger de manera satisfactoria la mejor solución a problemas de funcionamiento:

**Tabla 19**

#### **Especificaciones del producto**

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>
	Medición de 18 parámetros de rugosidad y ondulación. Precisión a nivel micras.
<b>Funcionamiento</b>	Medición de rugosidad con los 3 diferentes sensores existentes en el rugosímetro. Gráfica de perfiles de rugosidad y ondulación.
<b>Rehabilitación</b>	Inspección minuciosa de las partes componentes, reutilización y cambio de las mismas de ser necesario. Funcionamiento óptimo de los componentes originales del rugosímetro.
	Controlar las condiciones ambientales de temperatura y humedad en un ambiente cerrado para una medición acorde a la norma.
<b>Modernización</b>	Interfaz gráfica de los parámetros de rugosidad y ondulación así como los diferentes perfiles. Cálculo de los diferentes parámetros mediante componentes modernos.
<b>Vida Útil</b>	Bajo costo.

Una vez definidas las especificaciones del producto se procede a detallar las acciones que se realizarán en cada uno de los componentes del rugosímetro:

**Tabla 20**

**Requerimientos mecánicos, electrónicos y de automatización del equipo**

<b>Componente</b>	<b>Requerimientos Mecánicos</b>
<b>Columna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rehabilitar el movimiento vertical (eje Y) del carro para recorrido.</li> <li>Rehabilitar husillo de bolas recirculantes.</li> <li>Manufacturar un nuevo poste para tapa.</li> </ul>
<b>Tapa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solucionar el rozamiento del tornillo de ajuste fino.</li> </ul>
<b>Bancada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar una cabina de ambiente cerrado para el control de las condiciones ambientales.</li> </ul>
<b>Traverse Unit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturar un soporte para servomotor selector de velocidades del recorrido longitudinal.</li> </ul>
<b>Requerimientos Electrónicos</b>	
<b>Columna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Accionar el movimiento vertical desde el HMI.</li> <li>Sensar el final de recorrido del movimiento vertical.</li> <li>Realizar un control de posicionamiento automático del carro recorrido portador del sensor inductivo gobernando sobre el motor de la columna.</li> </ul>
<b>Traverse Unit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rehabilitar el movimiento longitudinal.</li> <li>Accionar el movimiento longitudinal desde el HMI.</li> <li>Accionar el cambio de velocidades del recorrido longitudinal desde el HMI.</li> <li>Automatizar el cambio de velocidades dependiendo de la longitud de medición deseada.</li> </ul>
<b>Procesador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Comprobar las diferentes fuentes de poder existentes (14.8V, 5V, -14.8V).</li> <li>Acondicionar la señal proveniente del sensor inductivo.</li> <li>Realizar la adquisición de datos para posteriores cálculos de parámetros.</li> <li>Realizar los cálculos de 18 parámetros de rugosidad a partir del perfil de rugosidad.</li> <li>Realizar un controlador capaz de gobernar sobre el proceso de medición.</li> <li>Realizar una interfaz hombre-máquina (HMI) capaz de permitir el control del proceso de medición.</li> <li>Generar un informe de resultados del proceso de medición.</li> </ul>

## 3.2 Alternativas de diseño de materialización preliminar

Tomando en cuenta la Tabla 19 y Tabla 20, se procederá a dar varias alternativas de solución para los requerimientos del equipo.

### 3.2.1 Bancada

De acuerdo a la norma ISA-TR52.00.01-2006 “Recommended Enviornments for Standards Laboratories”, el laboratorio de metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE pertenece al nivel 2 de clasificación de laboratorios (de referencia y secundarios, laboratorios públicos, de universidades, militares, privados) y a su vez de tipo 1 (laboratorios que realizan calibraciones y comparaciones); por tanto las especificaciones técnicas de las condiciones ambientales que debe cumplir y que se controlarán en el presente proyecto son las siguientes:

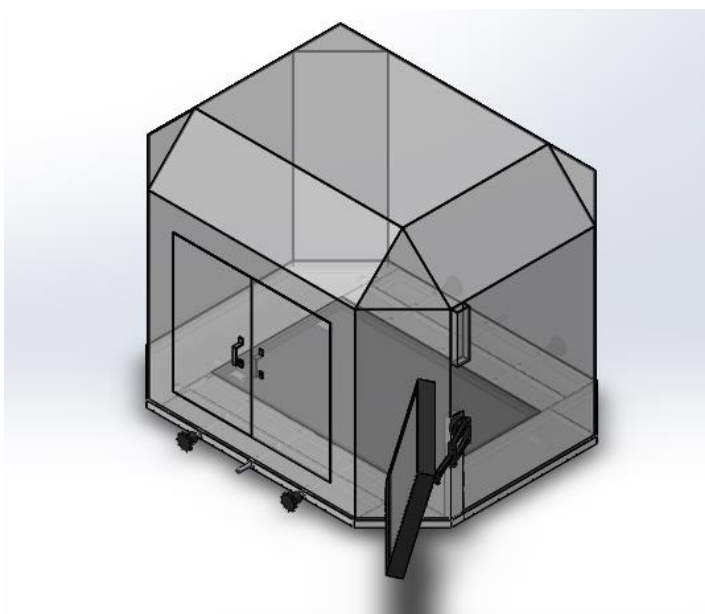
**Tabla 21**

#### Condiciones ambientales según norma para laboratorios

Condiciones Ambientales	Valor
<b>Humedad Relativa</b>	Laboratorio aplicable: Medición de longitudes Requerimientos: Tipo I y II: 45%HR máx. (a 20°C)
<b>Temperatura</b>	Laboratorio aplicable: Medición de longitudes y por medios ópticos Requerimientos: Tipo II: 20°C ± 1°C 20°C ± 0.3°C en punto de medición.

Fuente: (The International Society of Automation, 2015)

Se implementará como parte de la modernización del rugosímetro una cabina de ambiente controlado ( Figura 21), en la que se controlará las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa, dicha cabina no se verá sometida a esfuerzo alguno por lo que para su diseño se busca un material ligero y completamente transparente para evitar disminuir la visibilidad del operador.



**Figura 21 Cabina de ambiente controlado**

Para el control de las condiciones ambientales dentro de la cabina se presenta los siguientes diseños preliminares.

### 3.2.1.1 Control humedad

Es necesario realizar una identificación de los requerimientos limitadores, ya sean estos por limitaciones físicas, funcionales o económicas, entre los cuales se detallan:

**Tabla 22**

#### **Requerimientos limitadores control humedad**

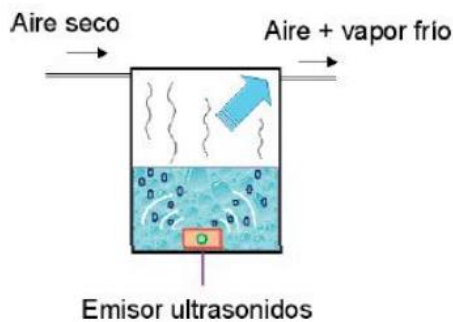
<b>Requerimientos Limitadores</b>	
<b>1</b>	Incremento de humedad relativa sin aumento de la capacidad calorífica de la cabina
<b>2</b>	Costo económico
<b>3</b>	Menor cantidad de modificaciones físicas en el rugosímetro
<b>4</b>	Mantener la HR en un valor $\leq 45\%$

Dichos requerimientos limitadores deben ser tomados en cuenta al momento de buscar la solución más óptima al proyecto.

Los humectadores son los sistemas utilizados para incrementar la humedad del aire en un entorno cerrado. Su clasificación se da de la siguiente manera: (Tocagón, 2015).

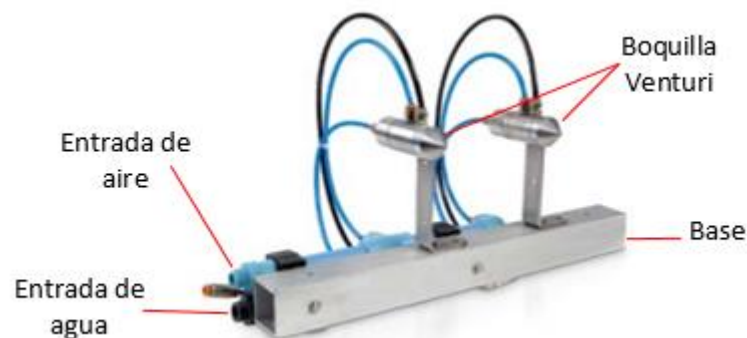
## Humectadores de atomización

En éstos, se pulveriza el agua en partículas tan pequeñas como sea posible, es decir se generan aerosoles, mediante boquillas alimentadas con agua a presión (lavador de aire), discos giratorios a gran velocidad con una corona dentada perimetral contra la que chocan las gotas de agua desplazadas por la fuerza centrífuga (atomizador centrífugo), o las partículas de agua se desprenden por la vibración a muy alta frecuencia de un cristal piezoeléctrico (humectadores de ultrasonidos). Es decir, el principio de operación de los humectadores de atomización es la generación de aerosoles y su emisión a la atmósfera a acondicionar.



**Figura 22 Humidificador de atomización**

Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)



**Figura 23 Humidificador por atomización MCR3**

Fuente: (FOG-SYSTEM, 2015)



**Tabla 23**  
**Características humidificador MCR3**

<b>Características</b>	
<b>Presión de Aire</b>	4 bar
<b>Marca</b>	Fog System
<b>Presión de Agua</b>	3 bar
<b>Tamaño de gota</b>	1-1.5 micras
<b>Voltaje</b>	0-10V
<b>Capacidad</b>	24 l/h

Fuente: (FOG-SYSTEM, 2015)

Las ventajas y desventajas del humidificador de atomización se resumen en la Tabla 24.

**Tabla 24**  
**Ventajas y desventajas de los humectadores de atomización**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son sencillos y económicos.</li> <li>• Su coste de operación es bajo: requieren poca energía.</li> <li>• Podemos realizar un control preciso de la humedad relativa del aire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generan aerosoles que son incorporados a la corriente de aire o emitidos a las zonas ocupadas.</li> <li>• La bandeja de agua si no es convenientemente tratada, puede crear entornos muy adecuados para el desarrollo de bacterias en general.</li> <li>• Sistema de aire comprimido necesario.</li> </ul>

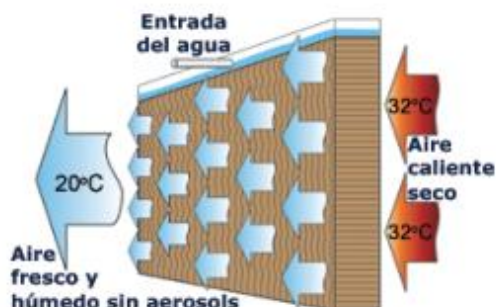
Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)

### **Humectadores de evaporación**

Funcionan por el principio de extender la humedad sobre una superficie denominada soporte y exponiendo este al aire seco, lo que se suele llevarse a cabo obligando al aire a que pase a través o alrededor del soporte y a que absorba la humedad del soporte en forma de vapor de agua.

En los humidificadores de evaporación (Figura 24), el agua en fase líquida toma la energía necesaria para evaporizarse del propio aire que se humidifica (y enfría) por lo que se denomina humidificación adiabática o a energía constante (aunque no es un proceso realmente adiabático).

En los humidificadores de evaporación modernos se hace pasar el agua y aire en flujos cruzados por un panel de gran superficie interior donde el contacto aire-agua es de larga duración y el proceso de evaporación es máximo.



**Figura 24 Humidificador de evaporación**

Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)



**Figura 25 Humidificador de evaporación comercial Bottle Caps**

Fuente: (OEM, 2015)

Sus principales características se detallan en la Tabla 25.

**Tabla 25**

**Características humidificador de evaporación Bottle Caps**

Características	
<b>Ruido</b>	<36dB
<b>Marca</b>	OEM
<b>Potencia</b>	28W
<b>Voltaje</b>	5V
<b>Aplicación</b>	11-20 m <sup>2</sup>
<b>Capacidad</b>	350 ml/h

Fuente: (OEM, 2015)

Algunas de las ventajas y desventajas aplicadas a nuestro proyecto se resumen en la Tabla 26:

**Tabla 26**

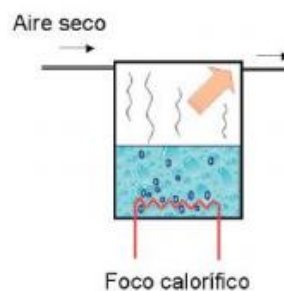
**Ventajas y desventajas humidificador por evaporación**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sencillos y económicos</li> <li>• Requieren muy poca energía</li> <li>• No generan aerosoles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No permiten un control preciso de la humedad</li> </ul>

Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)

**Humidificadores de vapor**

En este método, la energía necesaria para vaporizar el agua líquida se cede directamente a ella, de forma que se produce vapor que será posteriormente emitido al aire. El humidificador dispone de un depósito de agua y mediante resistencias calefactoras o electrodos, calienta el agua generando vapor.



**Figura 26 Humidificador de vapor**

Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)



**Figura 27 Humidificador por vapor Condair CP3 Mini**

Fuente: (CONDAIR, 2015)

**Tabla 27****Características Humidificador Condair CP3 Mini**

<b>Características</b>	
<b>Ruido</b>	37dB
<b>Marca</b>	Condair
<b>Señales de control</b>	On/off (24VDC), 0...5VDC, 1...5VDC, 0...10VDC, 0...20mA, 4...20mA
<b>Max Humedad</b>	75% HR
<b>Aplicación</b>	200 m <sup>3</sup>
<b>Capacidad</b>	22 m <sup>3</sup> /h

Fuente: (CONDAIR, 2015)

Las ventajas y desventajas del humidificador de vapor se resumen en la Tabla 28.

**Tabla 28****Ventajas y desventajas de los humectadores de vapor**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Al calentar el agua hasta convertirla en vapor destruyen la carga bacteriana.</li> <li>Permiten un control preciso de la humedad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Su coste de operación es alto: requieren mayor energía que el resto de humectadores.</li> <li>Aumenta la capacidad calorífica dentro del ambiente cerrado.</li> </ul>

Fuente: (Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, 2003)

**3.2.1.2 Control temperatura**

De igual manera se realiza una identificación de los requerimientos limitadores presentes al momento de tomar una decisión del método de control de la temperatura dentro de la cabina (Tabla 29).

**Tabla 29****Requerimientos limitadores para el control de temperatura**

<b>Requerimientos Limitadores</b>	
<b>1</b>	Mantener la temperatura a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y a $20^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en punto de medición
<b>2</b>	Costo económico
<b>3</b>	Menor cantidad de modificaciones físicas en el rugosímetro
<b>4</b>	Disminuir Humedad Relativa del aire
<b>5</b>	Simplicidad de montaje

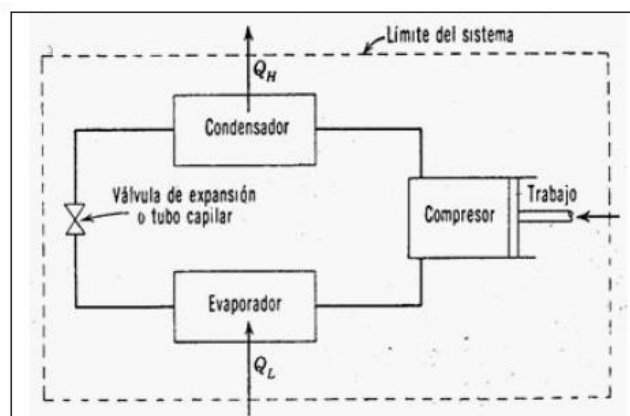
Dichos requerimientos limitadores deben ser tomados en cuenta al momento de buscar la solución más óptima al proyecto.

La refrigeración mecánica implica la transferencia de calor desde una temperatura inferior a otra superior. (Bellés, 2009)

Entre las tecnologías de refrigeración tenemos:

### **Refrigeración por máquinas de compresión de vapor**

La idea fundamental es evaporar un líquido a baja presión para que absorba calor y condensarlo a alta presión para que ceda el calor extraído. Los elementos principales del ciclo de compresión de vapor son: el evaporador, el compresor, el condensador y un sistema de expansión que puede ser una válvula o un simple tubo capilar. La Figura 28 muestra un esquema donde se recogen todos ellos:



**Figura 28 Elementos del ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor**

Fuente: (Bellés, 2009)

El ciclo se fundamenta en la compresión de un vapor que al hallarse a mayor temperatura que el medio caliente le cede calor. Con ello el vapor se enfría y, si la presión es la adecuada, llega a condensarse. El condensado se expande en una válvula de expansión o en un tubo capilar donde pierde la presión proporcionada por el compresor, esto hace que el líquido tienda a vaporizarse, y para que esto sea posible extrae calor (enfría) al medio que queremos enfriar. Este gas será de nuevo comprimido y se iniciará seguidamente un nuevo ciclo idéntico al anterior. La condensación del vapor se efectúa en el condensador y la vaporización del líquido en el evaporador.

**Tabla 30****Ventajas y desventajas refrigeración por compresión de vapor**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede aprovechar tanto el efecto frigorífico (evaporador) como el efecto calorífico (condensador).</li> <li>• Obtienen valores de COP (Coeficiente de eficiencia) muy elevados, entre 2 y 4.</li> <li>• Muy competitivas y económicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pueden emitir CO<sub>2</sub> a la atmósfera si son energizadas mediante centrales térmicas convencionales (de carbón, fuel-oil o gas natural) provocando el efecto invernadero.</li> <li>• Producen óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, lo cual contribuye al fenómeno de la lluvia ácida.</li> </ul>

Fuente: (Bellés, 2009)

**Refrigeración por absorción**

Las tecnologías de refrigeración que se pueden acoplar a un sistema solar térmico son las máquinas de refrigeración térmicas que no utilizan de un compresor mecánico sino térmico, el cual casi no necesita energía eléctrica.

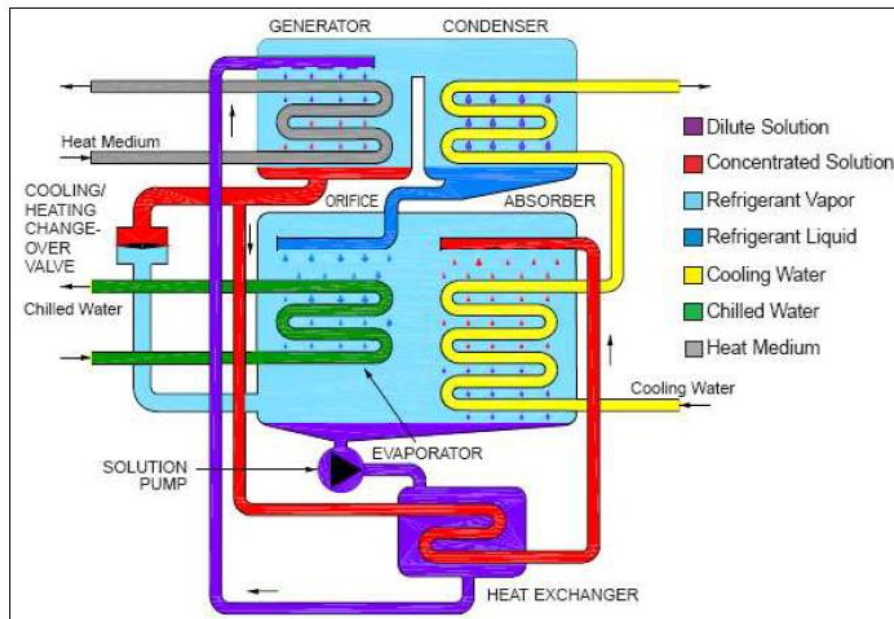
Existen dos diferencias fundamentales entre los ciclos de absorción y los de compresión de vapor. La primera es que el compresor es reemplazado por un absorbedor, una bomba y un generador. La segunda es que además del refrigerante, el ciclo de absorción usa otro fluido llamado absorbente.

El funcionamiento de las máquinas de absorción actuales se basa en los principios de absorción que Faraday descubrió en su laboratorio, sólo que el proceso se ha instalado en una máquina compacta que junto con otros componentes consigue un ciclo continuo de refrigerante en el evaporador.

Al generador se le aporta la mezcla líquida de la disolución, de absorbente y refrigerante, comprimida. Con el calor del generador se evapora el refrigerante, y el líquido absorbente retorna por diferencia de presión al absorbedor. El vapor refrigerante pasa al condensador donde se condensa, gracias a la extracción de calor con aire o agua (mediante una torre de refrigeración por ejemplo). El condensado, pasa a través de una válvula de expansión donde pierde presión y temperatura. Éste entra en el evaporador, donde, a baja presión, produce frío al evaporarse, extrayendo el calor del medio a enfriar. Acto seguido el vapor pasa al absorbedor, donde es absorbido por el líquido absorbente que retorna del generador. La reacción que se produce es

exotérmica, por lo que se debe ser refrigerado (conjuntamente con el condensador), de no ser así aumentaría la presión, dificultando la absorción.

Existe después un intercambiador de calor en el que se precalienta la disolución que va al generador y se enfría el líquido absorbente que va al absorbedor. El paso de la disolución desde el absorbedor al generador requiere aumentar la presión, esto requiere una bomba, que es la única parte móvil del sistema.

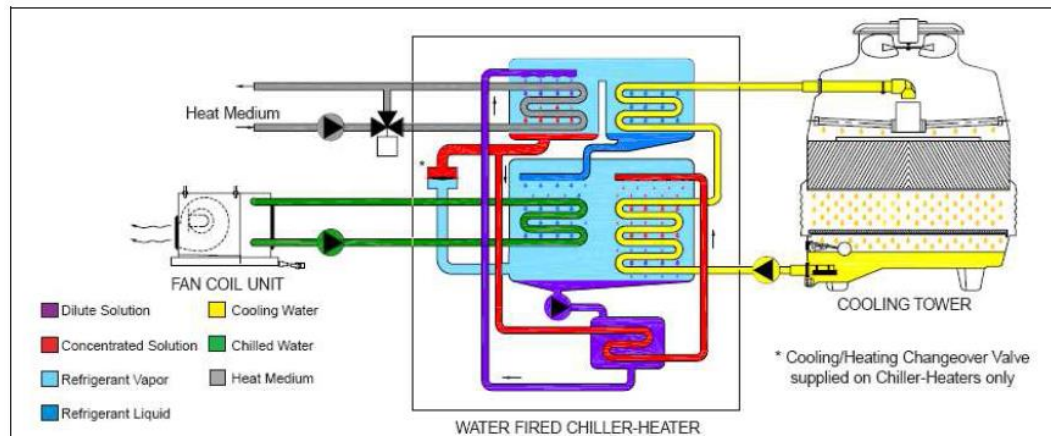


**Figura 29 Elementos de una máquina de refrigeración por absorción**

Fuente: (Bellés, 2009)

El calor extraído del vapor de agua del absorbedor y del condensador, se tiene que eliminar mediante un circuito de disipación por agua. El calor del circuito de disipación se puede eliminar de una de las siguientes maneras:

- Aero-refrigeradores (o intercambiador de calor refrigerador por aire).
- Torre de enfriamiento evaporativo de circuito abierto.
- Torre de enfriamiento evaporativo de circuito cerrado.
- Agua de pozo, de río, de lago o de origen freático con intercambiador de calor.
- Agua de mar con intercambiador de calor de características apropiadas.



**Figura 30 Esquema de la instalación de un sistema de refrigeración por absorción**

Fuente: (Bellés, 2009)

**Tabla 31**

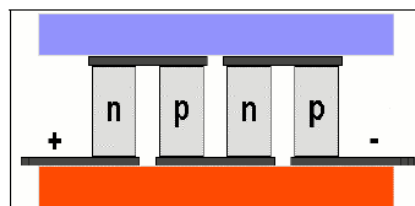
**Ventajas y desventajas de los sistemas de refrigeración por absorción**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplios rangos de potencia (mínimo sobre los 200kW de frío).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voluminosos y Caros</li> <li>• Sólo son rentables cuando el calor es gratuito o muy barato.</li> <li>• Las horas de funcionamiento anual a plena carga son elevadas.</li> </ul>

Fuente: (Bellés, 2009)

**Refrigeración por efecto Peltier**

Una célula Peltier (Figura 31) es un dispositivo termoeléctrico capaz de enfriar una de sus caras y al mismo tiempo calentar la otra al hacer circular corriente por él. El efector termoeléctrico se observa en uniones de metales o de semiconductores de tipo p y n. Los de tipo comercial son series de semiconductores p-n-p-n-p-n-...p-n encapsulados entre dos placas conductoras de calor. (Perez, 2006)



**Figura 31 Esquema de una célula Peltier**

Fuente: (Perez, 2006)



La refrigeración termoeléctrica supone una alternativa a los sistemas utilizados habitualmente. Los principales fenómenos físicos que intervienen son los efectos: Seebeck, Peltier, Thomson y Joule (Dpto. de Electrónica Automática e Informática Industrial, 2010).

**Tabla 32**

**Ventajas y desventajas de las células Peltier**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baratas</li> <li>• No presentan vibraciones.</li> <li>• No presentan ruido.</li> <li>• Reduce la Humedad Relativa del entorno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El espacio a enfriar está concentrado en una zona muy pequeña</li> </ul>

Fuente: (Perez, 2006)



**Figura 32 Célula Peltier comercial TEC1-12706**

Fuente: (Thermonamic, 2015)

**Tabla 33**

**Características TEC1-12706**

<b>Características</b>	
<b>Voltaje</b>	16V, 17.2V máx.
<b>Corriente</b>	6.1A máx.
<b>Potencia</b>	46.2W
<b>Máxima diferencia de temperatura entre caras</b>	79 °C
<b>Dimensiones (mm)</b>	40x40x4

Fuente: (Thermonamic, 2015)

### 3.2.2 Columna

Los requerimientos según la Tabla 20 se centran principalmente en el control del desplazamiento vertical del carro de la columna, de manera que el sensor pueda ubicarse de manera automática y precisa, evitando la tediosa tarea del ajuste manual que tendría que realizar el operador de la máquina. Dentro del control se encuentra la necesidad de sensar si el carro ha llegado a su límite, inferior o superior y detenerlo para evitar la sobrecarga del motor y además los posibles daños del mecanismo. Todo este control se complementará con una Interfaz Hombre-Máquina, mediante la cual se podrá tener acceso a todas las funciones, no solo de la columna si no de máquina en general.

Como se mencionó en el párrafo anterior, es necesario sensar si el carro ha llegado a su límite superior o inferior, y para este fin se ha decidido usar sensores de fin de carrera, como se indica en la Figura 33, que se colocarán en los extremos de la columna para que sean accionados cuando el carro de recorrido vertical llegue a los límites mencionados.

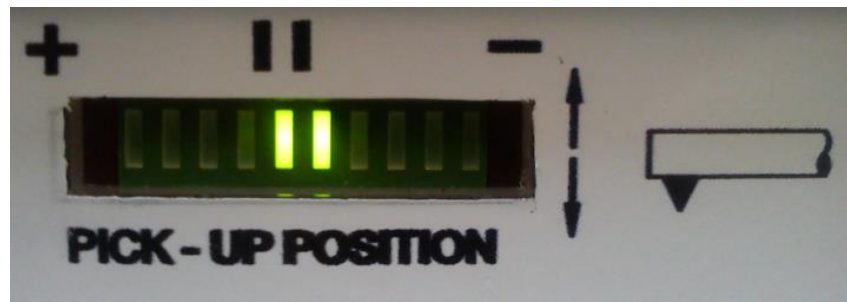


**Figura 33 Fin de carrera comercial**

Fuente: (Analog Devices, 2015)

#### 3.2.2.1 Control de posición del palpador

Una vez solventado el requerimiento de los límites superior e inferior, se puede proceder con el control de posicionamiento vertical, cuyo objetivo es alcanzar la posición óptima para la medición, la cual es posible conocer mediante el indicador led que se encuentra en el procesador original del equipo el cual muestra la posición de la aguja con respecto a la superficie que deseamos medir; de manera que para saber si la aguja está bien ubicada y en contacto con la superficie las dos barras de color verde en el centro del indicador deberán estar encendidas como se indica en la Figura 34.



**Figura 34** Indicador led que muestra la correcta ubicación del palpador

Es necesario realizar una identificación de los requerimientos limitadores, ya sean estos por limitaciones físicas, funcionales o económicas, entre los cuales se detallan:

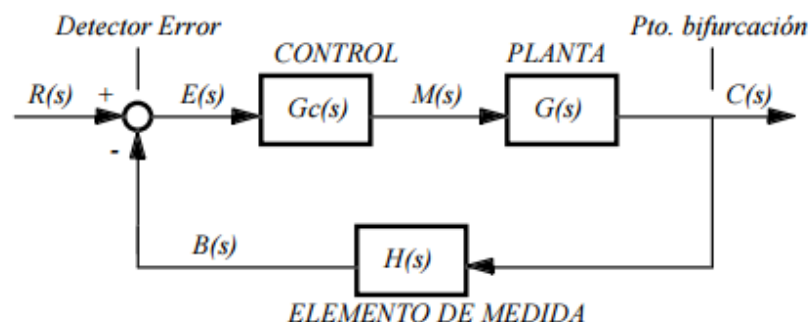
**Tabla 34**

**Requerimientos limitadores control de posición**

Requerimientos Limitadores	
1	Controlar el movimiento y posicionamiento mediante la HMI
2	Realizar una aproximación lenta de la aguja hacia la superficie
3	Menor cantidad de modificaciones físicas en la columna
4	Ubicación precisa del palpador antes de la medición

Las limitaciones figuradas en la Tabla 34 deben ser tomadas en cuenta al momento de buscar la solución que nos ayude a resolver de la mejor manera el problema que se ha planteado.

En la Figura 35 se muestra la estructura básica de un sistema de control el cual está compuesto por una señal de referencia o set point  $R(s)$ , una de error  $E(s)$ , una de control  $M(s)$ , una de salida  $C(s)$  y una señal de retroalimentación o sensado  $B(s)$ , además los bloques de control o controlador, la planta o actuador del sistema y el sensor o elemento de medida.



**Figura 35** Sistema de Control

Fuente: (Gomáriz, Biel, Matas, & Reyes, 2001)

A partir del esquema de la figura anterior podemos analizar, a continuación, algunos tipos de controladores para realizar la ubicación del palpador de la manera más eficaz y precisa.

### **Controlador Proporcional**

Es el que genera una señal de control proporcional a la señal de error, donde la señal de error es la diferencia entre la señal de referencia o set point y la señal del sensor. De este modo:

$$m(t) = k \cdot e(t) \rightarrow M(s) = k \cdot E(s) \quad (1)$$

Por lo tanto la función de transferencia del control proporcional es:

$$Gc(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k \quad (2)$$

Teóricamente, en este controlador, si la señal de error es cero, también lo será la salida del controlador. La respuesta, en teoría es instantánea, con lo cual el tiempo no intervendría en el control. En la práctica, no ocurre esto, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y presentará una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada.

### **Controlador Integral**

Este controlador genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error:

$$m(t) = ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \rightarrow M(s) = \frac{ki}{s} \cdot E(s) \quad (3)$$

La característica más importante de este tipo de control es que la acción correctora se efectúa mediante la integral del error, ello permite decir que el control integral proporciona una señal de control que es función de la propia 'historia' de la señal de error, permitiendo obtener una señal de control diferente de cero aunque la señal de error sea cero.

La velocidad de respuesta del sistema de control dependerá del valor de  $ki$  que es la pendiente de la rampa de acción integral.

El inconveniente del controlador integral es que la respuesta inicial es muy lenta, y, el controlador no empieza a ser efectivo hasta haber transcurrido un cierto tiempo. En cambio anula el error remanente que presenta el controlador proporcional.

## Controlador Proporcional Integral

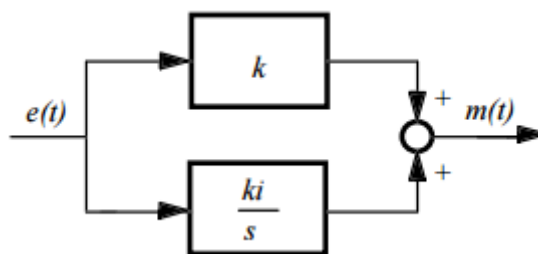
Este controlador genera una señal de control resultante de la combinación de la acción proporcional y la integral:

$$m(t) = k \cdot e(t) + ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt = k \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) \cdot dt \right] \quad (4)$$

Donde  $Ti$  es el tiempo integral,

$$M(s) = k \cdot \left[ 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] E(s) \rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k \cdot \left[ 1 + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \quad (5)$$

Por lo tanto el diagrama de bloques será:



**Figura 36 Diagrama control PI**

Fuente: (Gomáriz, Biel, Matas, & Reyes, 2001)

El control proporcional integral combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral; la acción integral elimina el error estacionario, mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que conlleva la introducción de la propia acción integral.

## Controlador Proporcional Derivativo

### Acción Derivativa

Genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error del sistema:

$$m(t) = kd \cdot \frac{de(t)}{dt} \rightarrow M(s) = kd \cdot s \cdot E(s) \quad (6)$$

De este modo, el control derivativo mediante la derivada de la señal de error 'conoce' sus características dinámicas (crecimiento o decrecimiento), produciendo una corrección antes de que la señal de error sea excesiva. A este efecto se le denomina acción anticipativa. Resumiendo, la acción de control derivativa añade sensibilidad al sistema y tiene un efecto de aumento de estabilidad relativa. Sin embargo, el control

derivativo no puede utilizarse en solitario porque es incapaz de responder a una señal de error constante ya que la derivada de una constante es cero.

### **Acción Proporcional Derivativa**

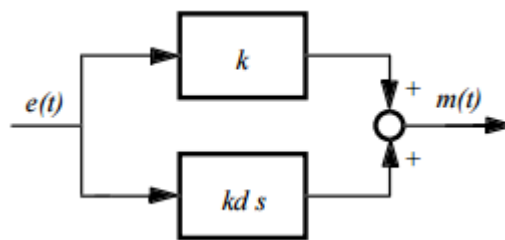
Este controlador genera una señal de control resultante de la combinación de la acción proporcional y la derivativa:

$$m(t) = k \cdot e(t) + kd \cdot \frac{de(t)}{dt} = k \cdot \left[ e(t) + Td \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

Donde Td es el tiempo derivativo.

$$M(s) = k(1 + Td \cdot s) \cdot E(s) \rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k(1 + Td \cdot s) \quad (8)$$

Por tanto el diagrama de bloques será:



**Figura 37 Diagrama control PD**

Fuente: (Gomáriz, Biel, Matas, & Reyes, 2001)

El control proporcional derivativo proporciona al sistema una mayor estabilidad relativa que se traduce en una respuesta transitoria con menor sobre impulso. Sin embargo, cuando la influencia del control es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta.

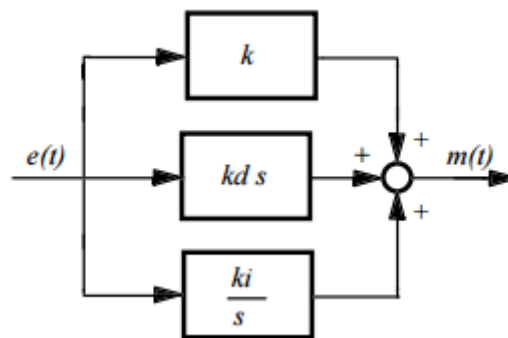
### **Controlador Proporcional Integral Derivativo**

Genera una señal de control resultante de la combinación de la acción proporcional, la integral y la derivativa:

$$m(t) = k \cdot e(t) + kd \cdot \frac{de(t)}{dt} + ki \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt = k \cdot \left[ 1 + Td \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) \cdot dt \right] \quad (9)$$

$$M(s) = k \cdot \left[ 1 + TD \cdot s + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \cdot E(s) \rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k \cdot \left[ 1 + TD \cdot s + \frac{1}{Ti \cdot s} \right] \quad (10)$$

Por tanto el diagrama de bloques queda de la siguiente forma:



**Figura 38 Diagrama control PID**

Fuente: (Gomáriz, Biel, Matas, & Reyes, 2001)

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control. La mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y un valor de máximo sobre impulso pequeño.

A continuación se presenta la Tabla 35 con las ventajas y desventajas para el uso de este controlador en nuestra aplicación:

**Tabla 35**

**Ventajas y desventajas del controlador PID**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina el error en estado estacionario.</li> <li>• Buena estabilidad relativa del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede generarse una desestabilización de la planta debido a la mala sintonización de las constantes.</li> <li>• Requiere de un modelo matemático.</li> </ul>

**Sistema de Control Difuso**

El controlador difuso es considerado una de las aplicaciones más importantes de la teoría de lógica difusa la cual permite a los sistemas trabajar con información que no es exacta; es decir, dicha información contiene un alto grado de imprecisión, contrario a la lógica tradicional que trabaja con información definida y precisa. Como ejemplo de información que maneja lógica difusa tenemos: estatura media, temperatura alta, etc., que en términos difusos son realmente imprecisos. La teoría de conjuntos difusos parte de la similitud con los conjuntos clásicos en los cuales se tiene

una función de pertenencia de 0 ó 1. En los conjuntos difusos se tiene la característica de que la función de pertenencia puede adquirir valores en el rango de 0 a 1.

Los sistemas de control difuso se encuentran constituidos de cuatro módulos:



**Figura 39 Estructura de un controlador difuso**

Fuente: (Hernández & Ochoa, 2004)

#### **Módulo de Fuzificación (Difusor)**

Es el módulo encargado de recibir valores numéricos y asignarles un grado de pertenencia a cada uno de conjuntos difusos que se ha considerado.

#### **Módulo de Inferencia**

Es el módulo que junto con la Base de conocimientos se encargan de relacionar los conjuntos difusos de entrada y de salida y asignarles su respectivo grado de pertenencia.

El conjunto de reglas que se encuentra en la base de conocimientos son del tipo antecedente – consecuente; es decir: si – entonces.

#### **Módulo de Defuzificación (Concesor)**

Es el encargado de asignar un valor numérico para la salida a partir del grado de pertenencia que asigno el módulo de inferencia.

A continuación se presenta la Tabla 36 con las ventajas y desventajas para el uso de este controlador en nuestra aplicación:



**Tabla 36****Ventajas y desventajas del Controlador Difuso**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad de implementación para procesos no lineales y con modelos matemáticos muy complejos.</li> <li>• Prescinde de la rigidez matemática y permite aplicar el raciocinio humano en el sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de una persona o un equipo experimentado en el proceso a controlar para definir con precisión sus reglas.</li> </ul>

**3.2.3 Traverse Unit**

El trabajo a realizarse en este módulo comprenderá dos ámbitos; el primero es la rehabilitación del módulo, lo que implica inspeccionar el estado mecánico y electrónico del mismo y realizar los pertinentes cambios y reparaciones que se crea necesario; el segundo es su automatización para lo cual se tomará en cuenta los siguientes requerimientos limitadores:

**Tabla 37****Requerimientos limitadores para el Traverse Unit**

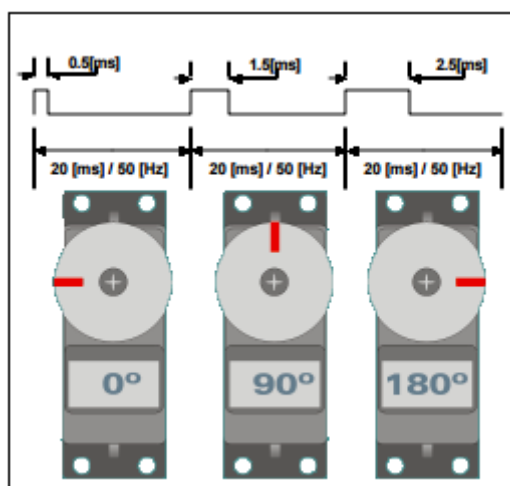
Requerimientos Limitadores	
1	Controlar el cambio de velocidad y accionamiento del recorrido longitudinal mediante la HMI.
2	Menor cantidad de modificaciones físicas en la unidad
3	Costo económico

A partir de estos requerimientos podemos presentar algunas opciones para realizar el cambio de las velocidades.

**Servomotores**

El servomotor es un potente dispositivo que dispone en su interior de un pequeño motor con un reductor de velocidad y multiplicador de fuerza, además posee un circuito que controla el sistema. En la mayoría de los servomotores el ángulo de giro es de 180°, pero se los puede modificar para que tengan un giro de 360°. (UTFSM, 2003)

Para controlar un servomotor es necesario aplicarle un pulso de duración y frecuencia específica. Todo servomotor dispone de tres cables, dos de alimentación, Vcc y GND y un tercero por el cual se aplica el tren de pulsos que lo controla. En la Figura 40 se aprecia un ejemplo de los pulsos necesarios para mover el servomotor a ciertos ángulos. (UTFSM, 2003)



**Figura 40 Ejemplo de posición del servomotor**

Fuente: (UTFSM, 2003)

**Tabla 38**

**Características Servomotor**

<b>GS-3630BB</b>	
<b>Voltaje de operación</b>	4.8V ~ 6.0V
<b>Rango de temperatura de operación</b>	-20C° ~ +60C°
<b>Voltaje de Prueba:</b>	A 4.8V                      A 6.0V
	3.0 Kg.cm                      3.6Kg.cm
	0.22 sec/60° sin              0.19 sec/60° sin
	carga                              carga
<b>Corriente de giro</b>	1200mA sin carga      1300mA sin carga
<b>Peso</b>	36 g
<b>Dimensiones</b>	41.2*20.1*37.7mm

Fuente: (Analog STD Servo)

A continuación se presenta la Tabla 39 con las ventajas y desventajas para el uso de este motor en nuestra aplicación:

Tabla 39

## Ventajas y desventajas de los servomotores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran torque a pesar de su pequeño tamaño.</li> <li>• Bajo consumo de energía.</li> <li>• Alta precisión.</li> <li>• Fácil de controlar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No presenta desventajas para nuestra aplicación.</li> </ul>

## Motores Paso a Paso

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

Su principal característica y a la cual deben su nombre es poder moverse un paso a la vez por cada pulso que recibe, dicho paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de  $1.8^\circ$ .

Básicamente estos motores están formados por un rotor sobre el que van colocados distintos imanes permanentes y un cierto número de bobinas en su estator. La excitación de las bobinas se la realiza externamente mediante un controlador.

Existen dos tipos de motores paso a paso:

**Bipolar:** generalmente poseen cuatro cables de salida, como se indica en la Figura 41.

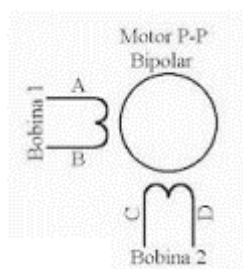
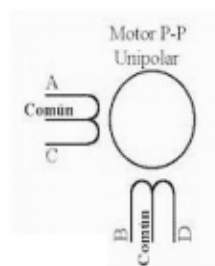


Figura 41 Motor Paso a Paso Bipolar

**Unipolar:** estos motores suelen tener 5 o 6 cables de salida dependiendo de la conexión interna que posean, como se indica en la Figura 42



**Figura 42 Motor Paso a Paso Unipolar**

**Tabla 40**

**Características motor paso a paso**

<b>Motor PAP Nema 17</b>	
<b>Voltaje de operación</b>	2V ~ 7V
<b>Rango de temperatura de operación</b>	-20C° ~ +60C°
<b>Corriente de giro</b>	400mA sin carga    1500mA con carga
<b>Aplicaciones</b>	Uso general con torques bajos 2.4Kg-cm
<b>Dimensiones</b>	50*50*40mm

Fuente: (TecMikro, 2016)

A continuación se presenta la Tabla 41 con las ventajas y desventajas para el uso de este motor en nuestra aplicación:

**Tabla 41**

**Ventajas y desventajas de los motores paso a paso**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisión debido a los pasos que realiza.</li> <li>• Variación de velocidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secuencia de control de pasos larga.</li> <li>• Para obtener torques altos necesita más corriente.</li> </ul>

### 3.2.4 Procesador

Como se observó en la Figura 19 para realizar la medición de la textura superficial el equipo utiliza un sensor de inductancia variable cuya señal es amplificada y comparada con un oscilador para determinar la dirección en la que se ha desplazado la aguja con respecto a su posición central o cero, como se indica en la Figura 20.

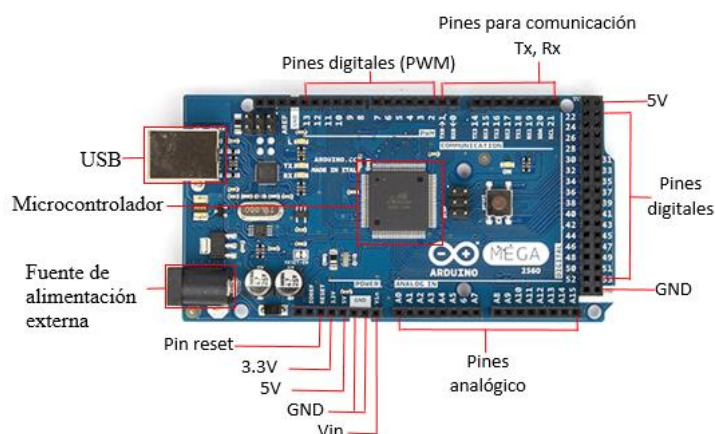
El inconveniente encontrado al momento de analizar la posibilidad de realizar el acondicionamiento de la señal del sensor y reemplazar el procesador por uno más

versátil y de menor tamaño, fue la falta de información acerca de las características del mismo lo que llevó a la conclusión de utilizar la señal acondicionada que entrega el equipo y trabajar a partir de esta.

La obtención de la señal del sensor está basada en el diagrama de la Figura 18, donde se indica la posibilidad de obtener la señal amplificada, que denota la forma del perfil de la pieza, fundamental para el cálculo de los parámetros de rugosidad.

### 3.2.4.1 Adquisición de datos

La adquisición de datos se realizará mediante una tarjeta Arduino Mega 2560 (Figura 43), la razón de trabajar con Arduino es básicamente su flexibilidad y bajo costo. Sus principales características técnicas se describen en la Tabla 42.



**Figura 43 Arduino Mega 2560**

Fuente: (Arduino , 2015)

**Tabla 42**

### **Especificaciones técnicas del Arduino Mega 2560**

<b>Especificaciones Técnicas Arduino ATmega 2560</b>	
<b>Microcontrolador</b>	ATmega2560
<b>Voltaje de operación</b>	5 V
<b>Voltaje de alimentación</b>	7 – 12 V
<b>Entradas/Salidas Digitales</b>	54 de las cuales 15 aportan PWM
<b>Entradas analógicas</b>	16
<b>Corriente por Pin</b>	20 mA
<b>Memoria Flash</b>	256
<b>Velocidad de reloj</b>	16 MHz

Fuente: (Arduino , 2015)

Una vez definida la tarjeta con la que se realizará la adquisición de datos se procede a realizar el tratamiento de la señal tomada directamente del equipo para acondicionarla al rango de voltaje con el que trabaja la entrada analógica de la tarjeta que es de 0 a 5 V, de manera que el equipo entrega una señal de voltaje DC con un rango de -11.37V a 11.37 V, por lo tanto es necesario realizar una validación de la señal para evitar los valores negativos y posteriormente una reducción en la escala de voltaje que permita tener el máximo valor, en este caso 11.37 V, como un valor de 5 V para poder ser usados en el controlador.

#### 3.2.4.1.1 Validación de señal

Para realizar la validación de la señal procedente del procesador, es necesario realizar una identificación de los requerimientos limitadores:

**Tabla 43**

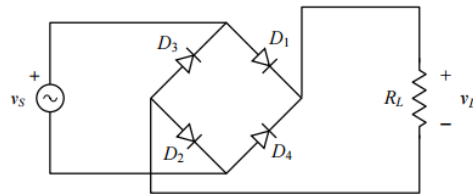
#### **Requerimientos limitadores validación señal**

<b>Requerimientos Limitadores</b>	
<b>1</b>	Precisión máxima en el valor validado del real
<b>2</b>	Máxima tolerancia de $\pm 0.01$ V del valor real
<b>3</b>	Costo económico de los componentes electrónicos
<b>4</b>	Rapidez de validación al cambio del valor real
<b>5</b>	Menor cantidad de modificaciones físicas en el procesador
<b>6</b>	Validación de valores bajos de voltaje (mili voltios)

Dichos requerimientos limitadores deben ser tomados en cuenta al momento de buscar la solución a la validación de la señal proveniente del procesador.

#### **Rectificador de onda completa tipo puente**

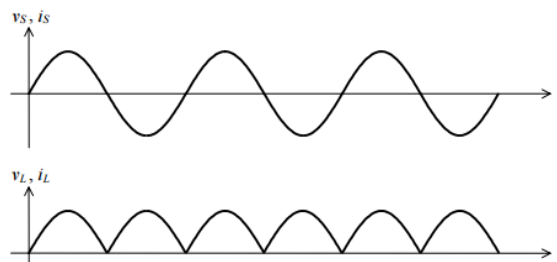
La rectificación se lleva a cabo por medio de uno o más diodos. Como es sabido, estos dispositivos idealmente permiten el paso de la corriente en un sentido y lo bloquean en el otro. El rectificador tipo puente de onda completa (Figura 44), permite utilizar toda la energía disponible ya que los semiciclos negativos no son desaprovechados. (Miyara, 2002)



**Figura 44 Rectificador de onda completa tipo puente**

Fuente: (Miyara, 2002)

Las formas de onda de entrada y salida se muestran en la Figura 45

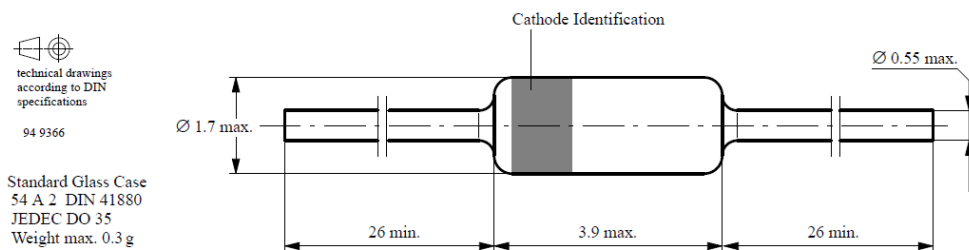


**Figura 45 Entrada y salida del rectificador de onda completa**

Fuente: (Miyara, 2002)

Recurriendo al catálogo de elementos y basándose en las características necesarias se escogió el diodo de alta velocidad 1N4148 (Figura 46). Sus características se describen en la Tabla 44.

#### Dimensions in mm



**Figura 46 Diodo de alta velocidad 1N4148**

Fuente: (Analog Devices, 2015)

**Tabla 44**

#### Características 1N4148

Características 1N4148	
<b>Max. Volt. inverso repetitivo</b>	100V
<b>Corriente directa DC</b>	300mA
<b>Max frecuencia</b>	1MHz

Fuente (Analog Devices, 2015)

Las ventajas y desventajas del rectificador de onda completa tipo puente se detallan en la Tabla 45.

**Tabla 45**

**Ventajas y desventajas del rectificador de onda completa tipo puente**

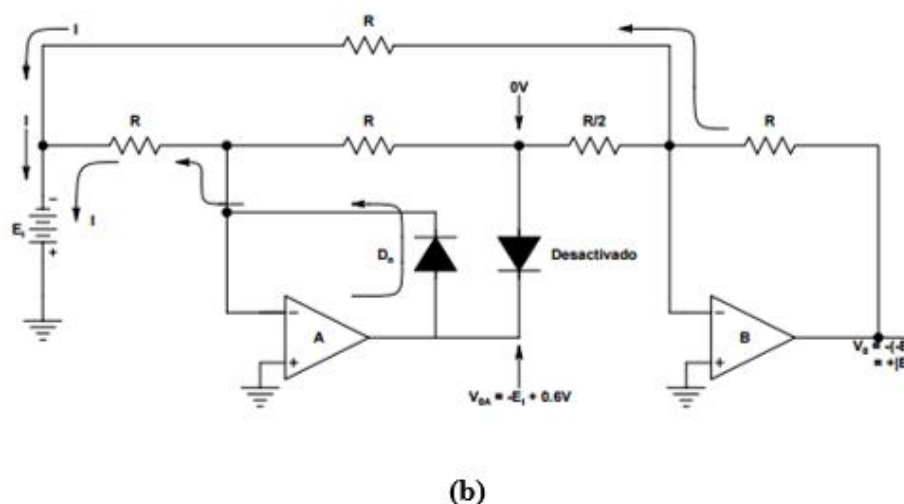
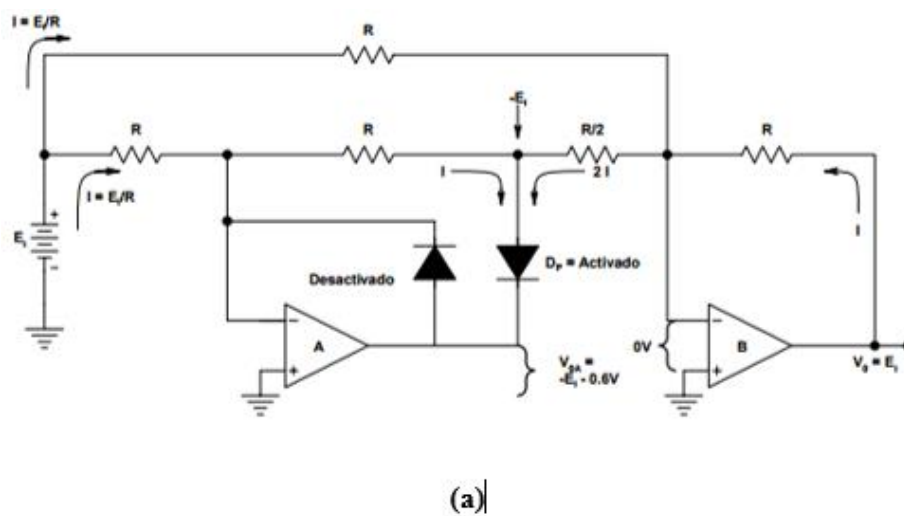
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta frecuencia de respuesta hasta 1MHz</li> <li>• Disponibilidad de los componentes en el mercado ecuatoriano.</li> <li>• Económico.</li> <li>• Ideal para conmutación extremadamente rápida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de tensión en los diodos de 700mV.</li> </ul>

**Rectificador de precisión con entradas sumadoras**

Mediante la utilización de amplificadores operacionales de instrumentación, los cuales según (Coughlin & Driscoll, 2000) es uno de los dispositivos electrónicos de mayor uso y versatilidad en aplicaciones lineales y los posibles errores de cableado no tienen consecuencias pues están provistos de circuitos internos para autoprotección, es posible implementar un rectificador de precisión de onda completa de una señal alterna, sin pérdida de tensión de umbral de los diodos como en el caso del rectificador de onda completa tipo puente, dicha pérdida (0.7V) es significativa cuando se trata de rectificar una señal alterna de amplitud pequeña (en el orden de los mili voltios).

Para construir un rectificador de precisión o amplificador de valor absoluto de la Figura 47. Para las entradas positivas de la Figura 47(a) el amplificador operacional A invierte  $E_i$ . El amplificador operacional B suma la salida de A y  $E_i$  para dar una salida de circuito  $V_o = E_i$ . En el caso de las entradas negativas, como se aprecia en la Figura 47(b), el amplificador operacional B invierte  $-E_i$  y la salida  $V_o$  del circuito es  $+E_i$ . Por lo tanto, la salida del circuito  $V_o$  es positiva e igual al valor rectificado o absoluto de la entrada. (Coughlin & Driscoll, 2000)





**Figura 47 Rectificador de precisión con entradas sumadoras**

Fuente: (Coughlin & Driscoll, 2000)

Mediante catálogo, se eligió un amplificador operacional de instrumentación de bajo ruido y alta precisión como lo es el OP27 (Figura 48). Sus principales características técnicas se describen en la Tabla 46.



**Figura 48 Amplificador operacional de precisión OP27**

Fuente: (Analog Devices, 2015)

**Tabla 46****Especificaciones técnicas OP27**

<b>Especificaciones Técnicas OP27</b>	
<b>Bajo ruido</b>	80nV p-p (0.1Hz a 10Hz)
<b>Baja desviación</b>	0.2uV/°C
<b>Alta velocidad</b>	2.8V/us
<b>Frecuencia</b>	8MHz
<b>Bajo voltaje de salida</b>	10 uV
<b>Alta ganancia en lazo abierto</b>	1.8 millones

Fuente: (Analog Devices, 2015)

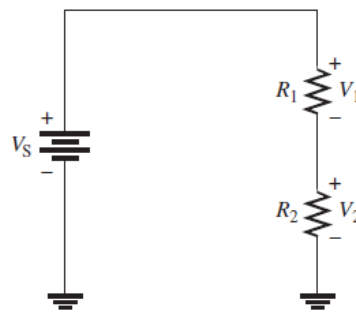
Las ventajas y desventajas del rectificador de onda completa mediante la utilización de amplificadores operacionales de precisión OP27 aplicadas a nuestro proyecto se resumen en la siguiente Tabla 47.

**Tabla 47****Ventajas y desventajas del amplificador operacional OP27**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta frecuencia de respuesta hasta 8MHz</li> <li>• Alta velocidad de respuesta 2.8V/us</li> <li>• Excelente precisión dinámica</li> <li>• Ideal para sistemas de alta velocidad y adquisición de datos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No disponible en el mercado ecuatoriano</li> </ul>

**3.2.4.1.2 Reducción en la escala de voltaje**

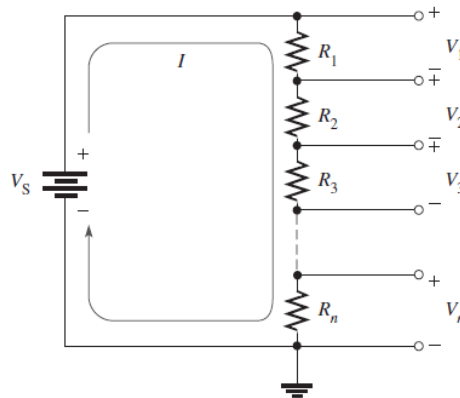
Según (Floyd, 2007) el divisor de voltaje es una aplicación importante de los circuitos en serie. Un circuito compuesto a partir de una serie de resistores conectada a una fuente de voltaje actúa como divisor de voltaje. La Figura 49 muestra un circuito con dos resistores en serie, aunque puede haber cualquier cantidad. Existen dos caídas de voltaje en los resistores: una en R1 y una en R2. Estas caídas de voltaje son V1 y V2, respectivamente, como indica el diagrama esquemático. Dado que cada resistor tiene la misma corriente, las caídas de voltaje son proporcionales a los valores de resistencia. Por ejemplo, si el valor de R2 es dos veces el de R1, entonces el valor de V2 es dos veces el valor de V1.



**Figura 49 Divisor de Tensión**

Fuente: (Floyd, 2007)

**Fórmula del divisor de voltaje:** Suponga un circuito con  $n$  resistores en serie como se muestra en la Figura 50, donde  $n$  puede ser cualquier número.



**Figura 50 Divisor de voltaje generalizado con  $n$  resistores**

Fuente: (Floyd, 2007)

Sean  $V_x$  la caída de voltaje a través de cualquiera de los resistores y  $R_x$  el número de un resistor en particular o de una combinación de resistores. Con la ley de Ohm, se puede expresar la caída de voltaje en  $R_x$  como sigue:

$$V_x = I * R_x \quad (11)$$

La corriente que circula por el circuito es igual al voltaje de la fuente dividido entre la resistencia total ( $I=V_S/R_t$ ). En el circuito de la Figura 50, la resistencia total es  $R_1+R_2+R_3+\dots+R_r$ . Sustituyendo  $I$  por  $V_S/R_t$  en la expresión para  $V_x$ ,

$$V_x = \left(\frac{V_S}{R_t}\right) R_x \quad (12)$$

Al reordenar los términos se obtiene:

$$V_x = \left(\frac{R_x}{R_t}\right) V_S \quad (13)$$

### 3.2.4.1.3 Filtrado de la Señal

El filtrado de señal es la parte más importante del proceso de medición de la rugosidad, ya que a partir del filtro que se aplique se puede separar el perfil de rugosidad y el de ondulación del perfil directo de la superficie y obtener la información necesaria para realizar el cálculo de los parámetros de rugosidad.

Filtro de perfil: dispositivo o proceso mecánico, electrónico (análogo), o digital usado para separar el perfil de rugosidad de fluctuaciones finas y del perfil de ondulación, o a su vez separar el perfil de ondulación del de rugosidad y, si es necesario, del error.

Filtros de perfil correctores de fase: filtro que no causan cambios de fase que conducen a distorsiones asimétricas del perfil.

#### **Filtro 2RC**

El filtro 2RC consiste en un circuito análogo con dos filtros RC ideales en serie. Los valores de resistencia y capacitor son seleccionados para producir las características de transmisión deseadas, consecuentemente con la velocidad transversal del instrumento. Este tipo de filtrado también puede ser aplicado digitalmente convolucionando una función de ponderación de fase distorsionada asimétrica con el perfil digital sin filtrar. (ASME B46.1, 2009)

En el filtro 2RC se genera una distorsión de fase lo que produce errores en los resultados de las mediciones y en algunos tipos de ondulaciones superficiales, además no separa la rugosidad de la ondulación tan eficazmente como el filtro gaussiano.

#### **Filtro Gaussiano**

El filtro Gaussiano tiene como característica especial no presentar una distorsión de fase y por el contrario la corrige. El filtro genera la línea media del perfil y está compuesta por la ondulación y cualquier otro componente de longitud de onda larga en el perfil que no esté asociado con la rugosidad de la superficie. La línea media es determinada por cualquier punto del perfil medido tomando una función de ponderación de promedio Gaussiano de los puntos adyacentes. (ASME B46.1, 2009)

El perfil de rugosidad se obtiene mediante la resta del perfil medido con la línea media obtenida con el filtro Gaussiano y su función de ponderación está dada por:

$$h(t) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi(t/\alpha \lambda_c)^2} \quad (14)$$

Donde  $\alpha=0.4697$ ,  $t$  es la variable independiente en el dominio espacial, y  $\lambda_c$  es el corte de longitud de onda (cut-off) del filtro. Si se usa  $x(t)$  para definir el perfil primario sin filtrar,  $m(t)$  para el perfil de ondulación filtrado mediante el filtro Gaussiano y  $r(t)$  para el perfil de rugosidad entonces se tiene:

$$m(t) = x(t) * h(t) \quad (15)$$

y

$$r(t) = x(t) - m(t) \quad (16)$$

Donde  $*$  representa convolución de dos funciones.

La forma de este filtro de aproximación es como sigue:

$$H_n(\lambda_c/\lambda) = \left( \frac{\sin(C_n \pi \lambda_c/\lambda)}{C_n \pi \lambda_c/\lambda} \right)^n \quad (17)$$

Donde  $C_n$  es una constante a ser determinada por la condición cuando  $\lambda = \lambda_c$ ,  $H_n(\lambda_c/\lambda) = 50\%$ . Algunos de los valores de  $C_n$  son dados en la Tabla 48.

**Tabla 48**

**Coefficientes  $C_n$  y orden  $n$  de Filtro**

<b>n</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>32</b>
<b><math>C_n</math></b>	0.6034	0.4429	0.3661	0.3189	0.2275	0.1616	0.1145

Las características de transmisión de los filtros Gaussianos de diferente orden y sus aproximaciones son mostradas a continuación:

$\lambda/\lambda_c$	$e^{-\pi(\alpha\lambda_c/\lambda)^2}$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_8$	$H_{16}$
0.1	0.0%	0.6%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
0.2	0.0%	-0.6%	0.8%	-0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
0.3	0.0%	0.6%	4.6%	-0.5%	0.0%	0.0%	0.0%
1/3	0.2%	-9.9%	4.2%	-0.1%	0.0%	0.1%	0.1%
0.5	6.3%	-16.0%	1.6%	3.4%	4.2%	5.3%	5.8%
0.7	24.3%	15.5%	21.2%	22.4%	22.9%	23.7%	24.0%
1.0	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%	50.0%
1.5	73.5%	75.4%	74.4%	74.1%	73.9%	73.7%	73.6%
2.0	84.1%	85.7%	84.9%	84.6%	84.5%	84.3%	84.2%
2.5	89.5%	90.7%	90.1%	89.9%	89.8%	89.6%	89.6%
3.0	92.6%	93.5%	93.0%	92.9%	92.8%	92.7%	92.6%

**Figura 51 Respuesta de los diferentes filtros Gaussianos**

Fuente: (Yuan, Vorburger, Song, & Renegar, 2000)

Como se observa en la Figura 51 los filtros que mejor respuesta tienen y un error porcentual son los filtros de orden 8 y 16, variando el filtro de orden 8 como máximo un 1% mientras que el filtro de orden 16 máximo 0.5%.

A continuación se presenta la Tabla 49 comparativa entre los dos filtros presentados anteriormente:

**Tabla 49**

**Comparación entre filtro 2RC y Gaussiano**

2RC	Gaussiano
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro análogo</li> <li>• Presenta distorsión de fase</li> <li>• Filtro poco eficaz y sensible a cambios por sus elementos físicos</li> <li>• 75% de transmisión de onda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtro digital</li> <li>• Corrige la distorsión de fase</li> <li>• Filtro eficaz</li> <li>• 50% de transmisión de onda</li> </ul>

Por tanto se elige al Filtro Gaussiano como el filtro a usarse en el procesamiento de la señal.

**3.2.4.1.4 Detección de cruce por cero**

Para el proceso de adquisición de datos propiamente dicho, es necesario saber el momento en el que la señal cruza por cero, en otras palabras saber cuándo pase de valores negativos a positivos y viceversa, para lo cual se ha decidido implementar un detector de cruce por cero que básicamente es un comparador de voltaje cuya referencia va a ser 0V, es decir tierra.

## Comparadores de voltaje

Los comparadores de voltaje analizan un valor de voltaje en una entrada respecto a un voltaje de referencia que está fijado en la otra entrada de tal manera que si el voltaje que se analiza es mayor o menor a la referencia el comparador genera en su salida una señal de tipo lógico, es decir 1 o 0, dependiendo si la configuración del comparador es inversora o no inversora.

Los amplificadores operacionales son generalmente usados para implementar comparadores de voltaje, sin embargo no están diseñados específicamente para realizar esta función, ya que su propio nombre lo dice, son amplificadores y el voltaje de su salida no cambia con mucha velocidad y además la salida varía dentro de los límites de los voltajes de saturación que por lo general están comprendidos entre  $\pm 13V$ . Dicho esto los amplificadores operacionales quedan descartados para la implementación del comparador. (Coughlin & Driscoll, 2000)

Existen circuitos integrados diseñados específicamente para funcionar como comparador, uno de ellos es el LM311 (Figura 52) el cual se ha decidido usar y cuyas características se detallan en la Tabla 50.



**Figura 52 Comparador de voltaje LM311P**

Fuente: (Analog Devices, 2015)

**Tabla 50**  
**Especificaciones Técnicas LM311**

<b>Especificaciones Técnicas LM311</b>	
<b>Voltaje total de alimentación</b>	Max. 36V
<b>Voltaje de entrada</b>	$\pm 15V$
<b>Disipación de energía</b>	500mW
<b>Frecuencia</b>	8MHz
<b>Temperatura de operación</b>	0 a 70°C
<b>Ganancia de voltaje</b>	200 V/mV
<b>Tiempo de respuesta</b>	200 ns

Fuente: (Analog Devices, 2015)

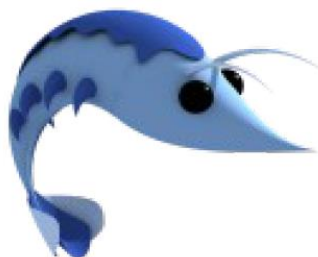
### 3.2.5 Interfaz con el usuario

Para mantener un costo económico del proyecto, es importante contar con una herramienta gratuita en la cual trabajar y realizar la interfaz hombre máquina necesaria, por lo que se recurre a los softwares libres o software Open Source, y a las plataformas de código abierto como Linux.

Entre las opciones que se ajustan a las necesidades se tiene:

#### **Gambas**

Gambas (Figura 53) no es sólo un lenguaje de programación, es también un entorno de programación visual para desarrollar aplicaciones gráficas o de consola. Hace posible el desarrollo de aplicaciones complicadas muy rápidamente. Gambas está orientado a eventos, lo que significa que llama automáticamente a los procedimientos cuando el usuario de la aplicación elige un menú, hace clic con el ratón, mueve objetos en la pantalla, etc. (Campos, 2010)



**Figura 53 Logotipo Gambas**

Fuente: (Campos, 2010)



Las ventajas y desventajas se presentan en la Tabla 51:

**Tabla 51**

**Ventajas y desventajas de Gambas**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidad de comunicación con software Arduino mediante la comunicación serial</li> <li>• Software libre</li> <li>• Aplicaciones gráficas</li> <li>• Programación orientada a objetos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatible con plataforma Ubuntu</li> </ul>

**Python**

Python (Figura 54) es un lenguaje de programación de software libre. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos. (Van Rossum, 2009)



**Figura 54 Logotipo Python**

Fuente: (Van Rossum, 2009)

Las ventajas y desventajas del lenguaje de programación Python se encuentran detalladas en la Tabla 52.

**Tabla 52**

**Ventajas y desventajas de Python**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicable a todo tipo de aplicaciones</li> <li>• Software libre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compatible con plataforma Ubuntu</li> <li>• Interfaz poco amigable</li> </ul>

**3.2.6 Evaluación y selección de la alternativa de diseño preliminar**

Una vez obtenidas las diferentes alternativas de diseño preliminar para cada uno de los módulos presentes en el rugosímetro, es necesario escoger la más óptima para el diseño, por lo cual, partiendo de las tablas Tabla 22, Tabla 29, Tabla 34, Tabla 37 y Tabla 43, correspondientes a los requerimientos limitadores que debemos tener en cuenta al momento de tomar la decisión, se procede a usar el método ordinal corregido

de criterios ponderados. Este método permite determinar un orden preferencial de la evaluación global, obteniéndose resultados altamente satisfactorios.

Se procede así a elaborar una tabla de ponderaciones en la cual se asignan valores comprendidos entre 0 y 1, siendo 1 el valor que representa que el criterio de la fila es más importante que el criterio de la columna, y siendo 0 el valor que representa que el criterio de la columna es más relevante que el de la fila.

A continuación se detallan y evalúan las alternativas de diseño de cada uno de los módulos.

### 3.2.7 Bancada

Para realizar la selección de alternativas, se tomarán los criterios mostrados en la Tabla 53 referente al control de la humedad de la cabina y la Tabla 58 referente al control de la temperatura.

#### Control humedad

#### Tabla 53

#### Criterio de evaluación y peso específico para control de humedad

<b>Costo &gt; Precisión = Mantener capacidad calorífica (MCC)</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Precisión</b>	<b>MCC</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación.</b>
<b>Costo</b>	-	1	1	3	0.5
<b>Precisión</b>	0	-	0.5	1.5	0.25
<b>MCC</b>	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

Posibles soluciones:

- Solución A: Humidificador de atomización.
- Solución B: Humidificador de evaporación.
- Solución C: Humidificador de vapor.

A continuación se procede a generar la evaluación de cada una de las alternativas (Tabla 54, Tabla 55 y Tabla 56); se detallan las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 54****Costo en el control de humedad**

<b>Solución B &gt; Solución A = Solución C</b>					
<b>Costo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0.5	1.5	0.25
<b>Solución B</b>	1	-	1	3	0.5
<b>Solución C</b>	0.5	0	-	1.5	0.25
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

**Tabla 55****Precisión en el control de la humedad**

<b>Solución C = Solución A &gt; Solución B</b>					
<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	0.5	2.5	0.42
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0.17
<b>Solución C</b>	0.5	1	-	2.5	0.42
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

**Tabla 56****Actuar sin aumentar la capacidad calorífica en el control de la humedad**

<b>Solución B = Solución A &gt; Solución C</b>					
<b>MCC</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	1	2.5	0.42
<b>Solución B</b>	0.5	-	1	2.5	0.42
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0.17
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

Finalmente se obtiene en la Tabla 57 las conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para el control de la humedad en la cabina.

**Tabla 57****Conclusión en el control de la humedad**

<b>Conclusión</b>	<b>Costo</b>	<b>Precisión</b>	<b>MCC</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0.125	0.105	0.105	0.33	2
<b>Solución B</b>	0.25	0.04	0.105	0.4	1
<b>Solución C</b>	0.125	0.105	0.04	0.27	3

## Control temperatura

**Tabla 58**

### Criterio de evaluación y peso específico para control de temperatura

Disminución de la HR (Dsm. HR) > Costo = Precisión > Simplicidad						
Criterio	Simplicidad	Costo	Precisión	Dsm. HR	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Simplicidad</b>	-	0	0	0	1	0.1
<b>Costo</b>	1	-	0.5	0	2.5	0.25
<b>Precisión</b>	1	0.5	-	0	2.5	0.25
<b>Dsm. HR</b>	1	1	1	-	4	0.4
Suma					10	1

Posibles soluciones:

- Solución A: Refrigeración por máquinas de compresión de vapor.
- Solución B: Refrigeración por absorción.
- Solución C: Refrigeración por efecto Peltier.

De igual manera se procede a detallar las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 59**

### Simplicidad en el control de temperatura

Solución C > Solución A = Solución B					
Simplicidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.5	0	1.5	0.25
<b>Solución B</b>	0.5	-	0	1.5	0.25
<b>Solución C</b>	1	1	-	3	0.5
Suma				6	1

**Tabla 60**

### Coto en el control de la temperatura

Solución C > Solución A > Solución B					
Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	1	0	2	0.33
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0.17
<b>Solución C</b>	1	1	-	3	0.5
Suma				6	1

**Tabla 61****Precisión el control de la temperatura**

<b>Solución A = Solución B &gt; Solución C</b>					
<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	1	2.5	0.42
<b>Solución B</b>	0.5	-	1	2.5	0.42
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

**Tabla 62****Disminución de la Humedad Relativa el control de la temperatura**

<b>Solución C &gt; Solución A = Solución B</b>					
<b>Dsm. HR</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	0	1.5	0.25
<b>Solución B</b>	0.5	-	0	1.5	0.25
<b>Solución C</b>	1	1	-	3	0.5
			Suma	6	1

Finalmente se obtiene en la Tabla 63 las conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para el control de la temperatura en la cabina.

**Tabla 63****Conclusión en el control de la temperatura**

<b>Conclusión</b>	<b>Simplicidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Precisión</b>	<b>Dsm. HR</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0.025	0.0825	0.105	0.1	0.3125	2
<b>Solución B</b>	0.025	0.0425	0.105	0.1	0.2725	3
<b>Solución C</b>	0.05	0.125	0.0425	0.2	0.4175	1

**3.2.8 Columna**

Los criterios tomados en cuenta para el desarrollo de la selección de alternativas así como su respectiva ponderación referentes al control de posición del palpador se muestran en la Tabla 64.

**Tabla 64****Criterio de evaluación y peso específico para control de posición**

<b>Precisión &gt;Tiempo Establecimiento (ts).&gt; Modelamiento Matemático (MM)</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Precisión</b>	<b>ts</b>	<b>MM</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Precisión</b>	-	1	1	3	0.5
<b>ts</b>	0	-	1	2	0.33
<b>MM</b>	0	0	-	1	0.17
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

Posibles soluciones:

- Solución A: Controlador PI
- Solución B: Controlador PID
- Solución C: Controlador Difuso

**A continuación se procede a generar la evaluación de cada una de las alternativas (Tabla 65,Tabla 66 y**

Tabla 67); se detallan las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 65****Precisión en el Control de Posición del Palpador**

<b>Solución A = Solución B = Solución C</b>					
<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	0.5	2	0.33
<b>Solución B</b>	0.5	-	0.5	2	0.33
<b>Solución C</b>	0.5	0.5	-	2	0.34
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

**Tabla 66****Tiempo de establecimiento en el Control de Posición del Palpador**

<b>Solución C &gt; Solución B &gt; Solución A</b>					
<b>ts</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0.17
<b>Solución B</b>	1	-	0	2	0.33
<b>Solución C</b>	1	1	-	3	0.5
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

Tabla 67

**Modelamiento matemático en el Control de Posición del Palpador**

<b>Solución C &gt; Solución A &gt; Solución B</b>					
<b>MM</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	0	2	0.33
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0.17
<b>Solución C</b>	1	1	-	3	0.5
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

Finalmente se obtiene en la Tabla 68 las conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para el control de la posición.

Tabla 68

**Conclusión para el Control de Posición del Palpador**

<b>Conclusión</b>	<b>Precisión</b>	<b>ts</b>	<b>MM</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0.17	0.06	0.06	0.28	3
<b>Solución B</b>	0.17	0.11	0.03	0.30	2
<b>Solución C</b>	0.07	0.17	0.08	0.42	1

**3.2.9 Traverse Unit**

Los criterios tomados en cuenta para el desarrollo de la selección de alternativas así como su respectiva ponderación referentes al cambio de velocidades del Traverse Unit se muestran en la Tabla 69.

Tabla 69

**Criterio de evaluación y peso específico para Cambio de Velocidad**

<b>Torque &gt; Precisión = Peso</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Torque</b>	<b>Precisión</b>	<b>Peso</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Torque</b>	-	1	1	3	0.5
<b>Precisión</b>	0	-	0.5	1.5	0.25
<b>Peso</b>	0	0.5	-	1.5	0.25
			<b>Suma</b>	<b>6</b>	<b>1</b>

Posibles soluciones:

- Solución A: Servomotor
- Solución B: Motor Paso a Paso

A continuación se procede a generar la evaluación de cada una de las alternativas (Tabla 70, Tabla 71 y Tabla 72); se detallan las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 70****Torque en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit**

<b>Solución A&gt;Solución B</b>				
<b>Torque</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	2	0.67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

**Tabla 71****Precisión en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit**

<b>Solución B&gt;Solución A</b>				
<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	1	0.33
<b>Solución B</b>	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

**Tabla 72****Peso en el Cambio de Velocidad del Traverse Unit**

<b>Solución A&gt;Solución B</b>				
<b>Peso</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	2	0.67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Finalmente se obtiene en la Tabla 73 las conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para el control de la posición.

**Tabla 73****Conclusión para el Cambio de Velocidad del Traverse Unit**

<b>Conclusión</b>	<b>Torque</b>	<b>Precisión</b>	<b>Peso</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0,33	0.08	0.17	0.58	1
<b>Solución B</b>	0,17	0.17	0.08	0.42	2



### 3.2.10 Procesador

La selección de alternativas en la validación de señal se realizará tomando en cuenta los criterios mostrados en la Tabla 74.

#### Validación de señal

**Tabla 74**

#### Criterio de evaluación y peso específico para validación de la señal

Precisión máxima > Tolerancia mínima > Costo					
Criterio	Precisión	Tolerancia	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Precisión máxima	-	1	1	3	0.5
Tolerancia mínima	0	-	1	2	0.33
Costo	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Posibles soluciones:

- Solución A: Rectificador de onda completa tipo puente.
- Solución B: Rectificador de precisión con entradas sumadoras.

A continuación se detallan las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 75**

#### Precisión en el sistema de validación de señal

Solución A < Solución B				
Procesamiento	Solución A	Solución B	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

**Tabla 76**

#### Tolerancia en el sistema de validación de señal

Solución A < Solución B				
Programación	Solución A	Solución B	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

**Tabla 77****Costo en el sistema de validación de señal**

<b>Solución A &gt; Solución B</b>				
<b>Información</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	2	0.67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0.33
		Suma	6	1

Como resultado se obtiene en la Tabla 78 referente a conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para la implementación del sistema de validación de señal.

**Tabla 78****Conclusión en el sistema de validación de señal**

<b>Conclusión</b>	<b>Precisión</b>	<b>Tolerancia</b>	<b>Costo</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0.165	0.1089	0.1139	0.39	2
<b>Solución B</b>	0.335	0.2211	0.0561	0.61	1

**Interfaz con el usuario:**

Los criterios tomados en cuenta para el desarrollo de la selección de alternativas así como su respectiva ponderación referentes a la selección del software para la implementación de la interfaz de usuario se muestran en la Tabla 79.

**Tabla 79****Criterio de evaluación y peso específico para interfaz gráfica**

<b>Rapidez de procesamiento (1) &gt; Programación gráfica (2) &gt; Información (3)</b>					
<b>Criterio</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>1</b>	-	1	1	3	0.5
<b>2</b>	0	-	1	2	0.33
<b>3</b>	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Posibles soluciones:

- Solución A: Gambas.
- Solución B: Python.

A continuación se detallan las ponderaciones y evaluaciones de acuerdo a los criterios de selección.

**Tabla 80**

**Rapidez de procesamiento de datos**

<b>Solución A = Solución B</b>				
<b>Procesamiento</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	1.5	0.5
<b>Solución B</b>	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

**Tabla 81**

**Programación gráfica de la interfaz**

<b>Solución A &gt; Solución B</b>				
<b>Programación</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	2	0.67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

**Tabla 82**

**Información disponible del software de programación**

<b>Solución A &gt; Solución B</b>				
<b>Información</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma +1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	2	0.67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0.33
		Suma	6	1

Finalmente se obtiene en la Tabla 83 las conclusiones y ponderaciones para cada solución, así como la selección de la solución más óptima para la implementación de la interfaz con el usuario.

**Tabla 83**

**Conclusión para software de interfaz gráfica**

<b>Conclusión</b>	<b>Procesamiento</b>	<b>Programación</b>	<b>Información</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	0.25	0.2211	0.1139	0.585	1
<b>Solución B</b>	0.25	0.1089	0.0561	0.415	2

### 3.3 Diseño preliminar

En la Tabla 84 se observa un resumen general de las alternativas de diseño seleccionadas a implementarse.

Tabla 84

## Alternativas de diseño seleccionadas a implementarse

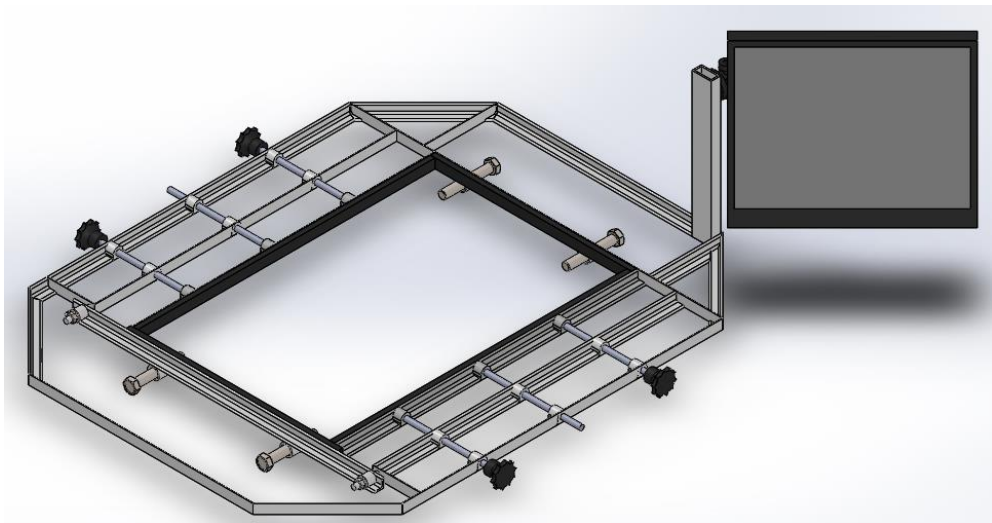
Módulo	Aplicación	Selección
<b>Bancada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control humedad</li> <li>• Control temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidificador de evaporación</li> <li>• Refrigeración por efecto Peltier</li> </ul>
<b>Columna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posicionamiento Palpador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control Difuso</li> </ul>
<b>Traverse Unit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambio de velocidad Traverse Unit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servomotor</li> </ul>
<b>Procesador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquisición de datos</li> <li>• Validación de la señal</li> <li>• Reducción de la escala de voltaje</li> <li>• Filtrado de la señal</li> <li>• Detección de cruce por cero</li> <li>• Interfaz con el usuario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arduino Mega 2560</li> <li>• Rectificador de precisión con entradas sumadoras</li> <li>• Divisor de tensión</li> <li>• Filtro Gaussiano</li> <li>• Comparador de voltaje LM311</li> <li>• Gambas</li> </ul>

## 3.3.1 Bancada

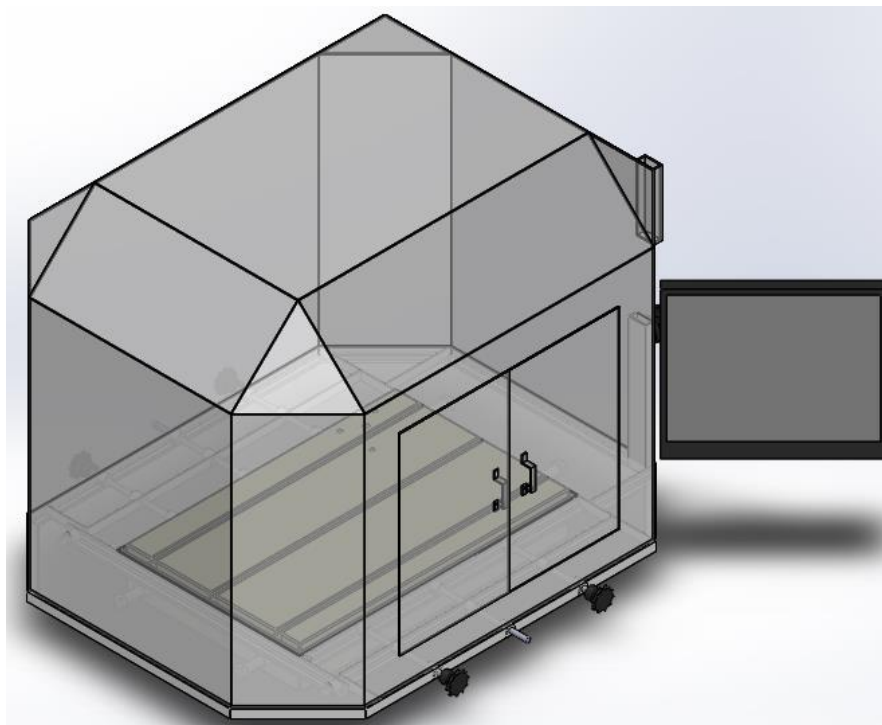
## Modelado 3D

El diseño preliminar de la bancada comprende la implementación de la cabina de ambiente controlado (humedad y temperatura) realizando un control ON-OFF para lo mismo.

Como primer paso se procedió a elaborar un modelado 3D de la estructura de la cabina, la misma que constará con una estructura metálica (Figura 55) que actúa como soporte, descansará sobre 4 pernos acoplados a la bancada original del rugosímetro; el cuerpo de la cabina se realizará en planchas de acrílico de 3 mm de espesor. (Figura 56)

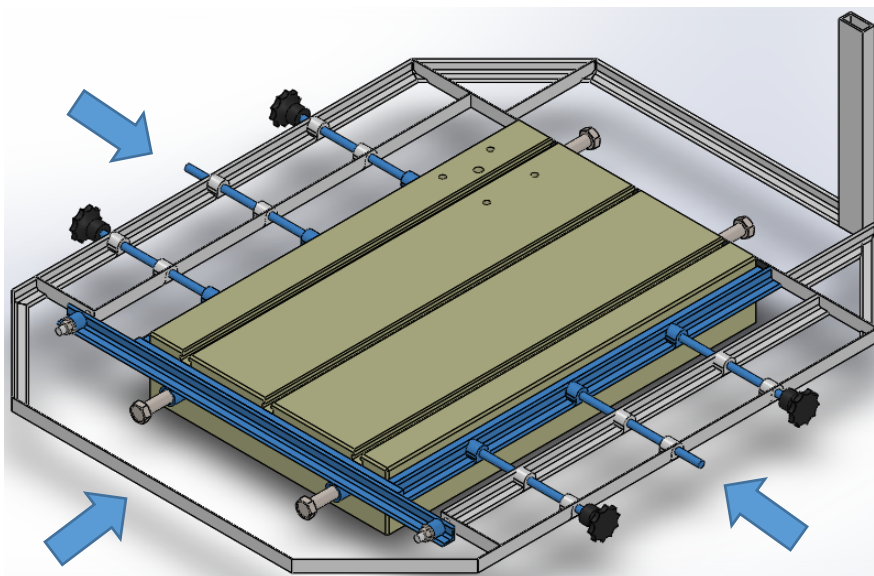


**Figura 55 Estructura metálica cabina**



**Figura 56 Cabina de acrílico**

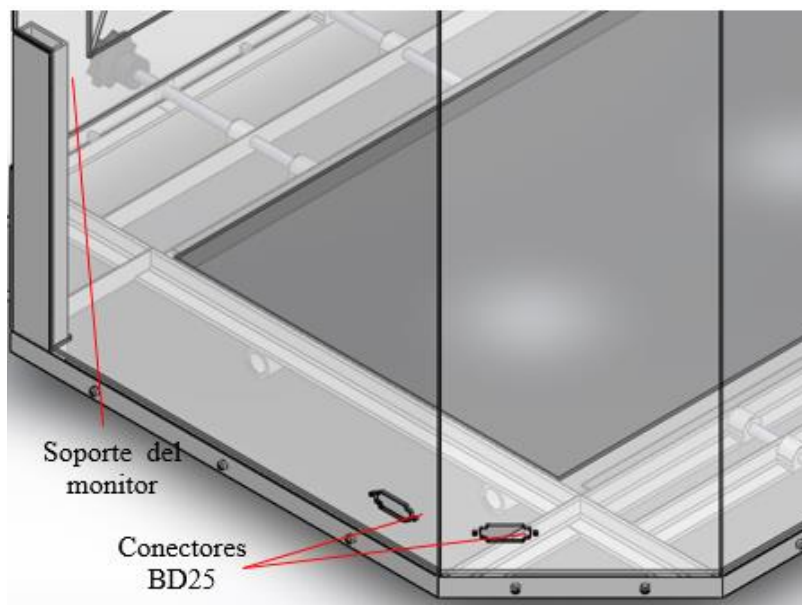
Para ayudar al control de las condiciones ambientales dentro de la cabina, la estructura metálica constará de barras laterales y en sus extremos cauchos selladores (Figura 57), las cuales se comprimirán contra las paredes laterales de la bancada, facilitando el montaje y desmontaje de la cabina.



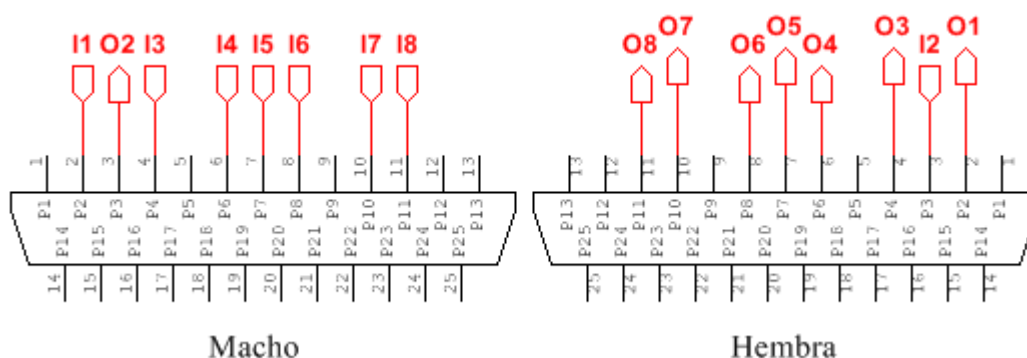
**Figura 57 Barras laterales**

### **Conectores DB25 para comunicación Cabina-Procesador**

Se colocará dos conectores DB25 en la cabina para realizar la comunicación entre el procesador y los elementos que se encontrarán dentro de la cabina tales como el Traverse Unit, servomotor, humidificador, sensor de temperatura y humedad, la Figura 58 muestra la ubicación que se ha elegido para colocar dichos conectores, en la Figura 59 se muestra la configuración de los pines y en la Tabla 85 se detalla dicha configuración.



**Figura 58 Ubicación conectores DB25**



**Figura 59 Configuración de pines conector DB25**

**Tabla 85**

**Descripción de pines conector DB25**

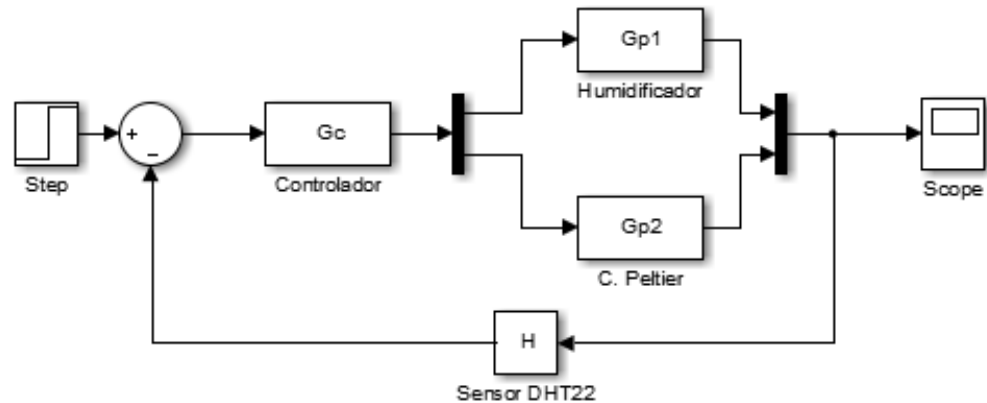
Pin	Descripción
2	Vcc sensor DHT
3	Señal Sensor DHT
4	GND Sensor DHT
6	Vcc servomotor
7	Señal servomotor
8	GND servomotor
10	Vcc Humidificador
11	GND humidificador

Como podemos apreciar, solo se describe la distribución de uno de los conectores, esto se debe a que el otro solo se lo hará para separar el cable original del Traverse Unit.

### 3.3.1.1 Control humedad

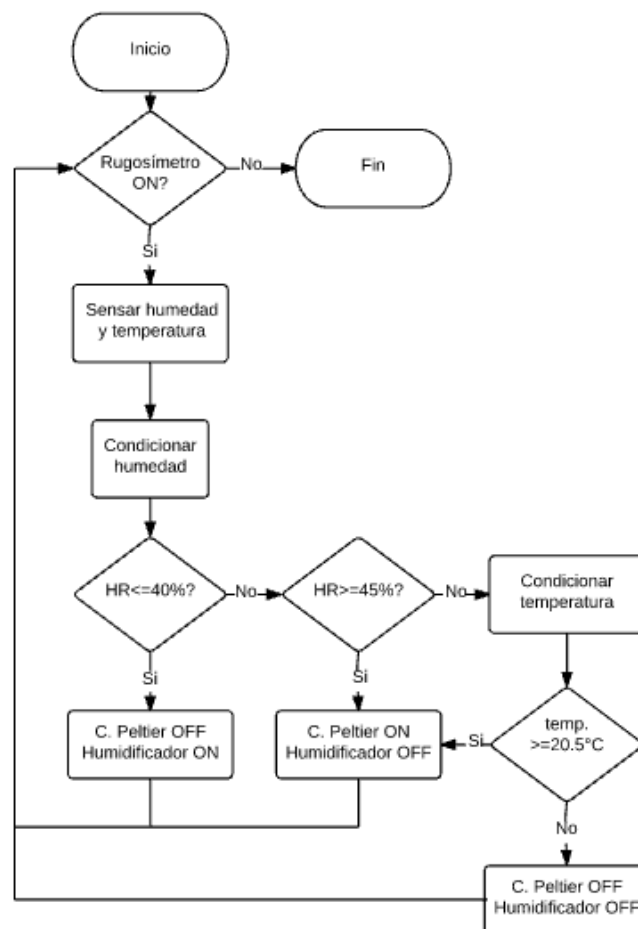
#### Diagrama de control y flujo

El control de los niveles de humedad dentro de la cabina se procederá a realizar mediante un control ON-OFF mismo que será implementado como se muestra en la Figura 60.



**Figura 60 Diagrama de bloques del control de humedad y temperatura**

Tanto la temperatura como la humedad serán sensadas a través del sensor DHT22 compatible con Arduino, mismo que tiene la capacidad de sensar las dos magnitudes a la vez, y la programación capaz de controlar dicho proceso cumplirá como se muestra en el diagrama de flujo a continuación:



**Figura 61 Diagrama de flujo del control de humedad y temperatura**



## Circuito electrónico

El sensor de humedad y temperatura DHT22 tiene las siguientes características:

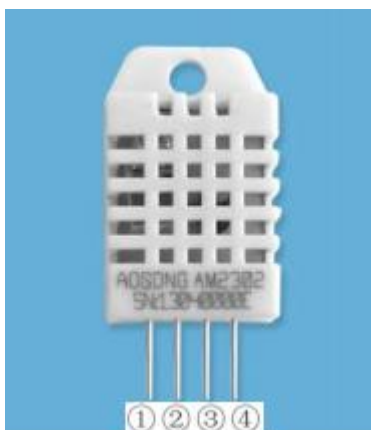
**Tabla 86**

**Características DHT22**

<b>Especificaciones Técnicas DHT22</b>	
<b>Voltaje</b>	3.3-6VDC
<b>Rango de humedad</b>	0-100%HR
<b>Rango de temperatura</b>	-40 – 80°C
<b>Precisión humedad</b>	+/-2%HR (Max +/-5%HR)
<b>Precisión temperatura</b>	<+/-0.5°C
<b>Periodo de sensado</b>	2 s

Fuente: (Liu, 2015)

La implementación del sensor DHT22 se detalla a continuación:



**Figura 62 Sensor DHT22**

Fuente: (Liu, 2015)

**Tabla 87**

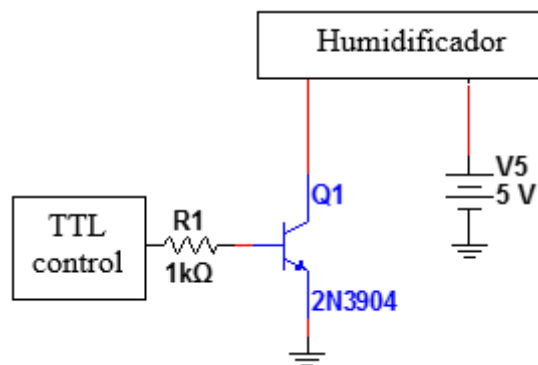
**Distribución de pines DHT22**

<b>Pin</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
1	VCC	Alimentación(3.3 – 5.5V)
2	Señal	Datos
3	NC	No se conecta
4	GND	Tierra

Fuente: (Liu, 2015)

El circuito electrónico a usarse se presenta en la Figura 63, el cual mediante la señal TTL (señal cuadrada) proveniente del controlador (Arduino Mega) gobierna





dependiendo del control a realizarse (Figura 61), sobre la base del transistor 2N3904 activando o desactivando el humidificador.



**Figura 63 Circuito de activación del Humidificador**

**Tabla 88**

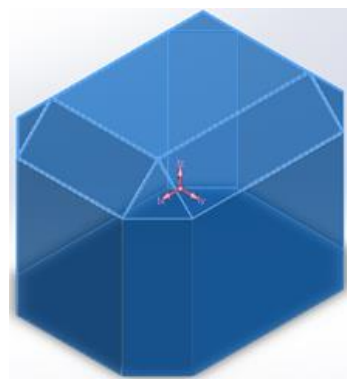
**Simbología del circuito de activación del Humidificador**

Símbolo	Descripción
	Transistor NPN
	Resistencia
	Fuente de Voltaje
	Tierra

### 3.3.1.2 Control de temperatura

#### Cálculo del tiempo de respuesta del sistema

El sistema de refrigeración debe ser capaz de enfriar un volumen de  $4.97 \times 10^8 \text{ mm}^3$  de aire, volumen calculado con la ayuda de un software para estudio de elementos finitos. Dicho volumen comprende el valor obtenido en la Figura 65, volumen total, disminuido el volumen de las láminas de acrílico de 3mm de espesor, de tal manera que se obtiene un valor real a enfriar.



**Figura 64 Cabina**

Propiedades de masa de selected Solid Bodies:		
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --		
Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico		
Masa = 500934.59 gramos		
Volumen = 500934589.41 milímetros cúbicos		
Área de superficie = 3500397.23 milímetros cuadrados		
Centro de masa: ( milímetros )		
X =	-24.36	
Y =	356.41	
Z =	80.17	
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos * milímetro cúbico )		
Medido desde el centro de masa.		
lx = (0.00, 0.00, 1.00)	Px = 43517068063.55	
ly = (1.00, 0.02, -0.00)	Py = 56293270339.17	
lz = (-0.02, 1.00, -0.00)	Pz = 56569184806.89	
Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )		
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas		
Lxx = 56293348170.98	Lxy = 4633450.72	Lxz = 1879.14
Lyx = 4633450.72	Ly y = 56569106522.10	Lyz = 2431519.35
Lzx = 1879.14	Lzy = 2431519.35	Lzz = 4351706851
Momentos de inercia: ( gramos * milímetros cuadrados )		
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.		
lxx = 123146539946.74	lxy = -4344712549.92	lxz = -978368407.47
lyx = -4344712549.92	lyy = 60086289284.68	lyz = 1431651868.76
lzx = -978368407.47	lzy = 1431651868.76	lzz = 10744763466

**Figura 65 Propiedades físicas y mecánicas de la cabina**

Para calcular el tiempo de variación de temperatura se utilizará el libro de Termodinámica (Boles & Cengel, 2002).

Como condiciones iniciales tenemos un promedio de:

$$t = 22^{\circ}\text{C}$$

$$HR = 55\%$$

Basado en las tablas termodinámicas encontradas en el libro se tiene la presión de saturación del agua a  $22^{\circ}\text{C}$  y su calor específico.

$$P_{\text{SatH}_2\text{O}} = 2.6448 \text{ kPa}$$

$$C_{p\text{H}_2\text{O}} = 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K}}$$

La carga térmica de la cabina en las condiciones mencionadas equivale a la masa del aire y la de vapor de agua suspendida en éste volumen (Perez, 2006). Se toma el volumen netamente interno por tanto se procede a restar el volumen ocupado por la capa de 3 mm de acrílico. La masa de aire es:

$$V_{\text{cabina}} = 500934589.41 - 8236580.37 = 4.927 \cdot 10^8 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{cabina}} = \frac{V_{\text{cabina}}}{(1000)^3} = 0.493 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{aire a } 22^{\circ}\text{C}} = 1.1961 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{aire} = V_{cabina} * \rho_{aire} \quad (18)$$

$$m_{aire} = 0.493m^3 * 1.1961 \frac{kg}{m^3} = 0.589kg$$

Para el cálculo de la masa de agua, primero se calcula el número de moles del agua utilizando la ecuación de los gases ideales y el principio de las presiones parciales (Perez, 2006).

$$PV = nRT$$

Tomando del libro de Termodinámica (Boles & Cengel, 2002), la constante R tiene un valor de:

$$R = 8.31 \frac{J}{mol \cdot ^\circ K}$$

$$P_{H_2O} = 0.55 * 2.6448kPa = 1.455kPa$$

$$1455kPa * 0.493m^3 = n * 8.31 \frac{J}{mol \cdot ^\circ K} * (273.15 + 22^\circ C)$$

$$n = 0.292 \text{ moles de } H_2O$$

La masa molecular del agua es:

$$m_{mol H_2O} = 18.02 \frac{g}{mol}$$

Por tanto la masa de agua presente es:

$$m = n * m_{mol H_2O} \quad (19)$$

$$m = 0.292mols * 18.02 \frac{g}{mol} = 5.266 g$$

La capacidad calorífica total de la cabina es:

$$C_{p \text{ cabina}} = m_{aire} * C_{p \text{ aire}} + m_{H_2O} * C_{p \text{ H}_2O} \quad (20)$$

$$C_{p \text{ cabina}} = 0.589kg_{aire} * 1.009 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} + 0.005266kg_{H_2O} * 4.18 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$$

$$C_{p \text{ cabina}} = 0.617 \frac{kJ}{^\circ K}$$

Considerando que el sistema de refrigeración de 2 células Peltier tiene una potencia de 72W, el tiempo que se tardará en bajar un grado de temperatura de la cabina es:

$$t_{-1^\circ K} = \frac{617 J}{72W} = 8.564 s$$

### Sistema de recolección del condensado presente

El sistema de enfriamiento por efecto Peltier al generar frío en una de sus caras y calor en la otra produce un efecto de condensación en la primera de ellas (gotas de agua) alrededor de los disipadores en ella acoplados, por lo que es necesario diseñar un recolector de dichas gotas (Figura 66) que sea capaz de conducir las al reservorio de agua necesario para la humidificación de la cabina pues de otra manera la oxidación en las piezas del rugosímetro, especialmente en la bancada, se verá presente.

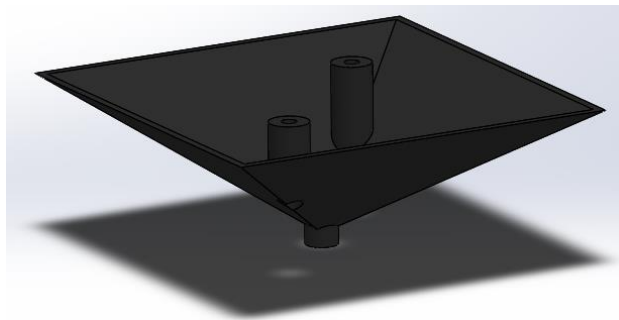


Figura 66 Recolector de gotas de condensado

### Circuito electrónico

El circuito electrónico a usarse se presenta en la Figura 67, el cual mediante la señal TTL (señal cuadrada) proveniente del controlador (Arduino Mega) gobierna dependiendo del control a realizarse (Figura 61), sobre la base del transistor 2N3904 activando o desactivando el relé presente por consiguiente al sistema de refrigeración por efecto Peltier.

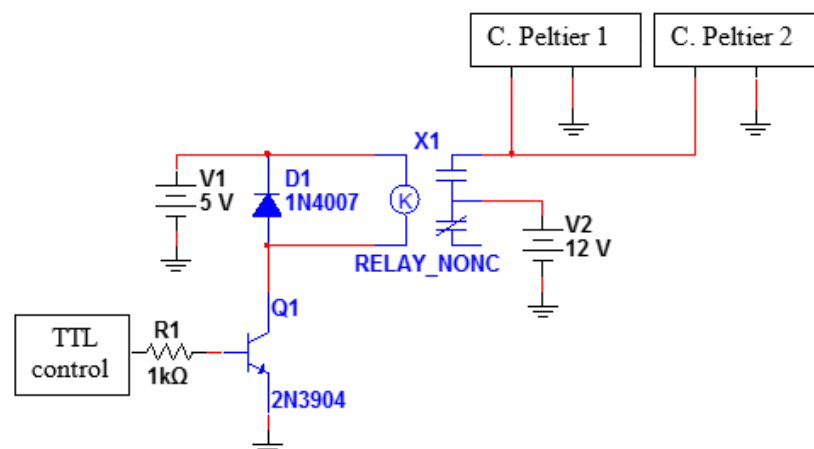
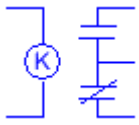







Figura 67 Circuito de activación C. Peltier

Tabla 89

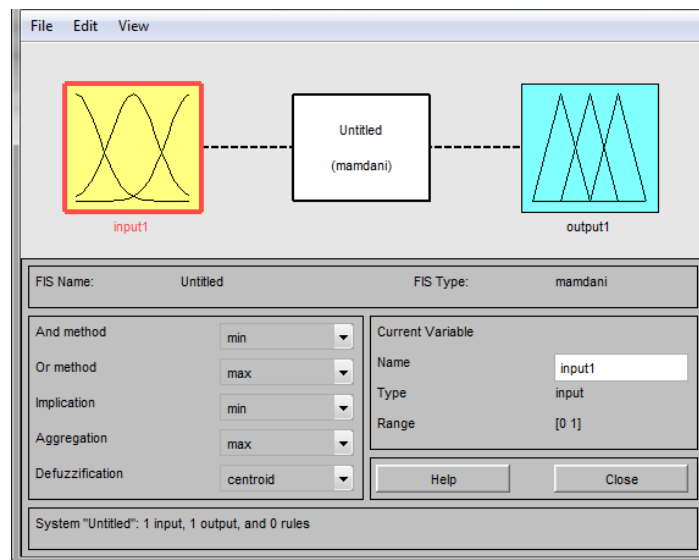
## Simbología del circuito de activación C. Peltier

Símbolo	Descripción
	Relé NO y NC
	Transistor NPN
	Resistencia
	Fuente de Voltaje
	Tierra
	Diodo

## 3.3.2 Columna

Como se ha decidido en la sección anterior, el posicionamiento de la aguja del sensor se lo realizará mediante un controlador difuso diseñado con la ayuda del Toolbox de Control Difuso de un software para análisis matemático. Dicho controlador está dividido en tres etapas, magnificaciones bajas (x 100, x 200, x 500, x 1 000), magnificaciones medias (x 2 000, x 5 000, x 10 000) y magnificaciones altas (x 20 000, x 50 000, x 100 000). A continuación se presentará la forma en la que se realizó el diseño para cada etapa empezando por las magnificaciones bajas.

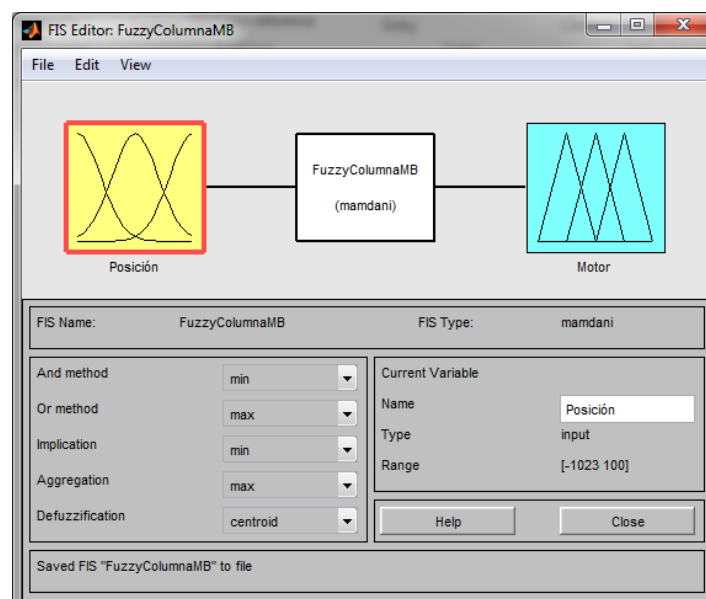
Como primer paso se ingresa al software de análisis matemático y se tipea fuzzy en la línea de comandos para ingresar al Toolbox. Se abrirá una ventana en la cual se observa un pequeño diagrama de flujo donde se detallan la entrada, el controlador y la salida del controlador con sus respectivas características descritas bajo el diagrama las cuales se puede modificar a conveniencia, en este caso no se las modificará puesto que son las que se requiere.



**Figura 68 Ventana principal del Toolbox Fuzzy.**

A continuación se modificará los nombres de la entrada, el control y la salida, además se define los rangos de cada una de ellas y las respectivas reglas de inferencia que regirán el comportamiento del controlador y consecuentemente sus salidas.

Se comenzará con la definición de la entrada cuyo nombre será “Posición”, haciendo referencia a la posición del sensor, a continuación su rango el cual quedará definido entre  $[-1023; 100]$  puesto que el Conversor análogo-Digital del Arduino tiene una resolución de 10 bits y podemos admitir valores de  $\pm 5V$ , es decir  $\pm 1023$  divisiones.



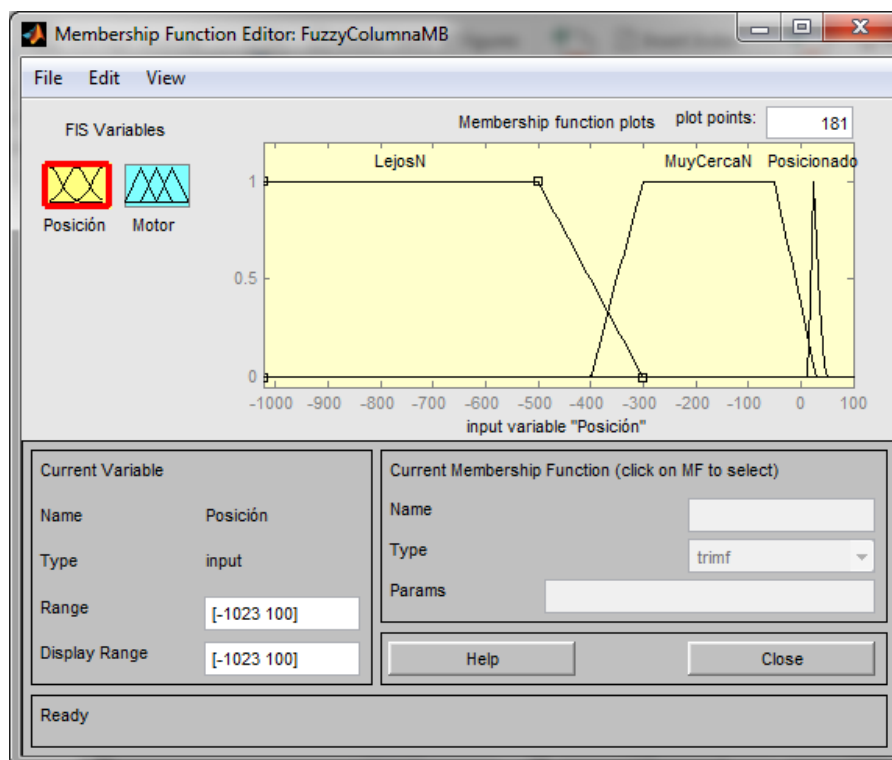
**Figura 69 Nombre y rango de la entrada para magnificaciones bajas.**

Luego se define cada una de las funciones de pertenencia sus respectivos rangos y la forma que tendrá, ya sea triangular, trapezoidal, gaussiana, etc. En la Tabla 90 se encuentran los nombres, rangos y formas finales de las funciones de pertenencia que se obtuvo luego de realizar algunas pruebas y afinamientos para el controlador y en la Figura 70 se aprecia cómo se ha implementado en el programa:

**Tabla 90**

**Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones bajas**

Nombre	Forma	Rango
LejosN	Trapezoidal	[-1023; -1023; -500; -300]
MuyCercaN	Trapezoidal	[-400 ; -300; -50; 30]
Posicionado	Triangular	[15; 25; 45]



**Figura 70 Funciones de pertenencia de la entrada para magnificaciones bajas**

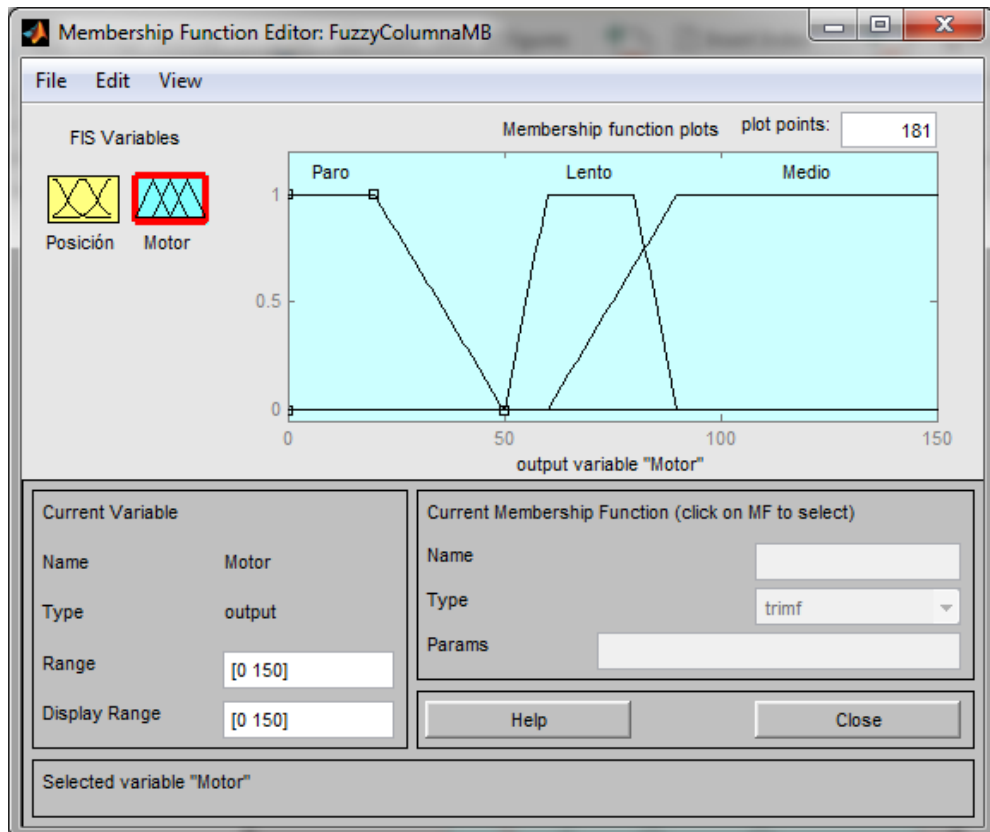
Una vez definidas las funciones de pertenencia de la entrada del controlador, procedemos a definir de la misma manera las funciones de pertenencia de la salida, con la diferencia de que su nombre será “Motor” y su rango [0; 150], ya que el PWM de la tarjeta Arduino tiene una resolución de 8 bits, es decir 255 divisiones de las cuales tomamos hasta 150 para realizar una bajada más suave.



Tabla 91

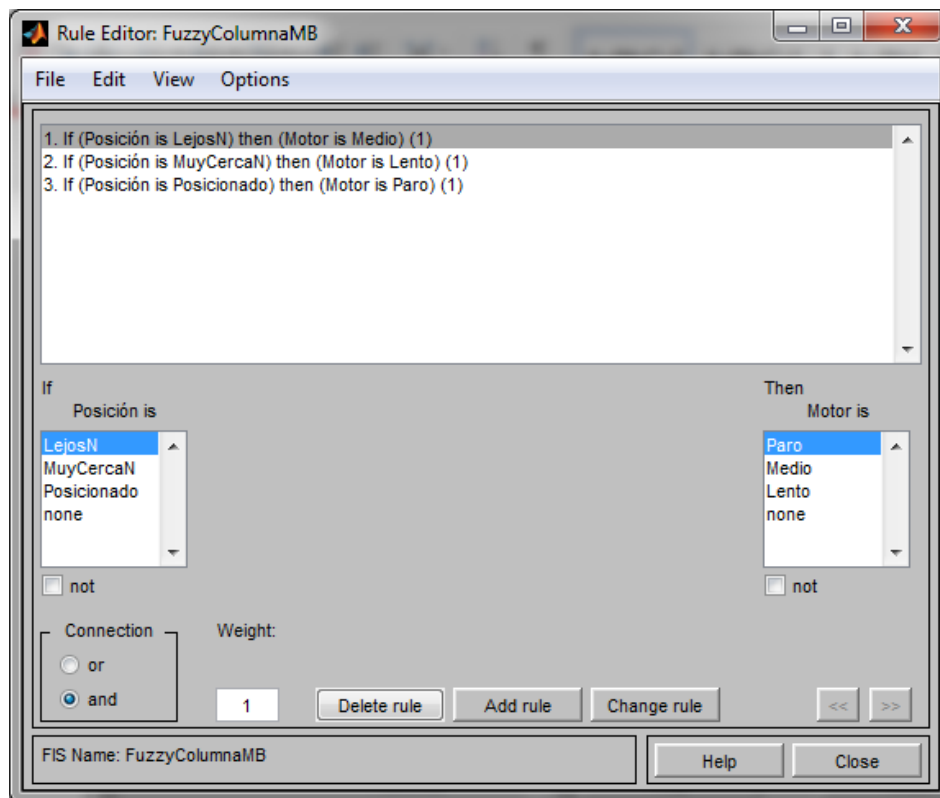
## Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones bajas

Nombre	Forma	Rango
<b>Paro</b>	Trapezoidal	[0; 0; 20; 50]
<b>Lento</b>	Trapezoidal	[50; 60; 80; 90]
<b>Medio</b>	Trapezoidal	[60; 90; 150; 150]



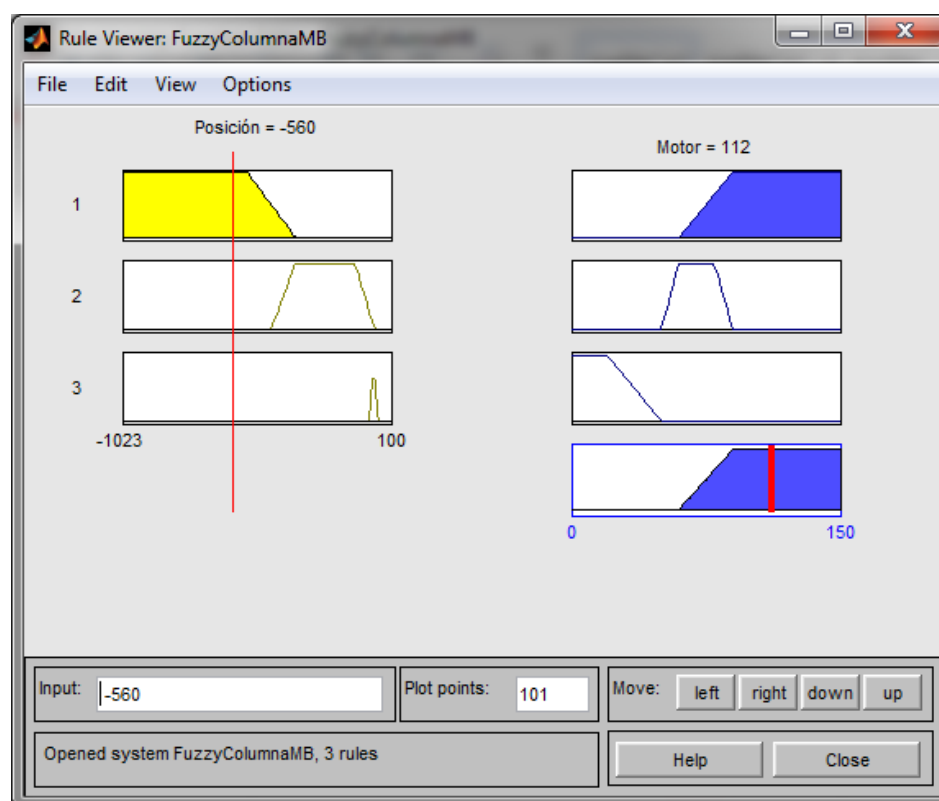
**Figura 71 Funciones de pertenencia de la salida para magnificaciones bajas**

Ahora que ya tenemos definidos los rangos de las funciones de pertenencia según nuestra experiencia con el equipo y la ubicación del sensor, podemos pasar a establecer las reglas de inferencia que definirán el comportamiento del controlador según la posición en la que se encuentre el sensor, como se indica en la Figura 72.



**Figura 72 Reglas de inferencia para magnificaciones bajas**

Ahora que el controlador ya está diseñado, se puede observar su comportamiento conforme varía la posición del sensor eligiendo en la pestaña de Vista la opción Reglas o con el atajo de teclado Ctrl+5, a continuación se abrirá una pantalla donde se puede variar el valor de la entrada y ver el valor de salida que tendrá el controlador, es decir el valor de PWM que la tarjeta Arduino entregará.



**Figura 73 Comportamiento del Controlador Difuso en magnificaciones bajas**

Se repite el mismo procedimiento para el diseño de los controladores en magnificaciones medias y altas. Dando como resultado las siguientes tablas:

**Tabla 92**

**Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones medias**

Nombre	Forma	Rango
LejosN	Triangular	[-1023; -1023; -800]
MuyCercaN	Trapezoidal	[-900; -800; -100; 20]
Posicionado	Triangular	[-5; 40; 40]

**Tabla 93**

**Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones medias**

Nombre	Forma	Rango
Paro	Trapezoidal	[0; 0; 30; 50]
Lento	Trapezoidal	[45; 55; 65; 80]
Medio	Trapezoidal	[70; 100; 120; 120]

**Tabla 94****Funciones de pertenencia de la Posición para magnificaciones altas**

<b>Nombre</b>	<b>Forma</b>	<b>Rango</b>
<b>LejosN</b>	Triangular	[-1023; -1023; -950]
<b>MuyCercaN</b>	Trapezoidal	[-1023; -950; -300; -150]
<b>Posicionado</b>	Trapezoidal	[-180; -100; -30; 40]

**Tabla 95****Funciones de pertenencia del Motor para magnificaciones altas**

<b>Nombre</b>	<b>Forma</b>	<b>Rango</b>
<b>Paro</b>	Trapezoidal	[0; 0; 30; 50]
<b>Lento</b>	Triangular	[40; 60; 80]
<b>Medio</b>	Trapezoidal	[70; 90; 100; 100]

Nota: el rango de la salida para estas magnificaciones es [0; 100] ya que se necesita una aproximación aún más suave.

Para la implementación del controlador en la tarjeta Arduino, se utilizará la Librería de Lógica Difusa para Sistemas Embebidos, eFLL por sus siglas en inglés, cuyo autor es el Msc. Marvin Lemos. La librería se la puede encontrar en <https://github.com/zerokol/eFLL> en donde se especifican sus características y la forma en la que se la instala, cabe mencionar que su forma de uso se detalla con ejemplos sencillos que se encuentran dentro de la librería.

**Circuito electrónico**

El circuito electrónico que se usará está en la [Figura 10](#) y consiste básicamente en un circuito integrado modelo L239D el cual es un puente H que nos permite cambiar el giro del motor mediante el envío de un pulso continuo o PWM a sus pines de entrada 2 y 7 en este caso; el pulso que se envía desde la tarjeta Arduino es la señal que nos entrega el controlador difuso.

Las salidas del integrado tienen 4 diodos 1N4148 para proteger el integrado, y además están conectadas al motor de la columna, de modo tal que se produzca el control sobre el sensor.

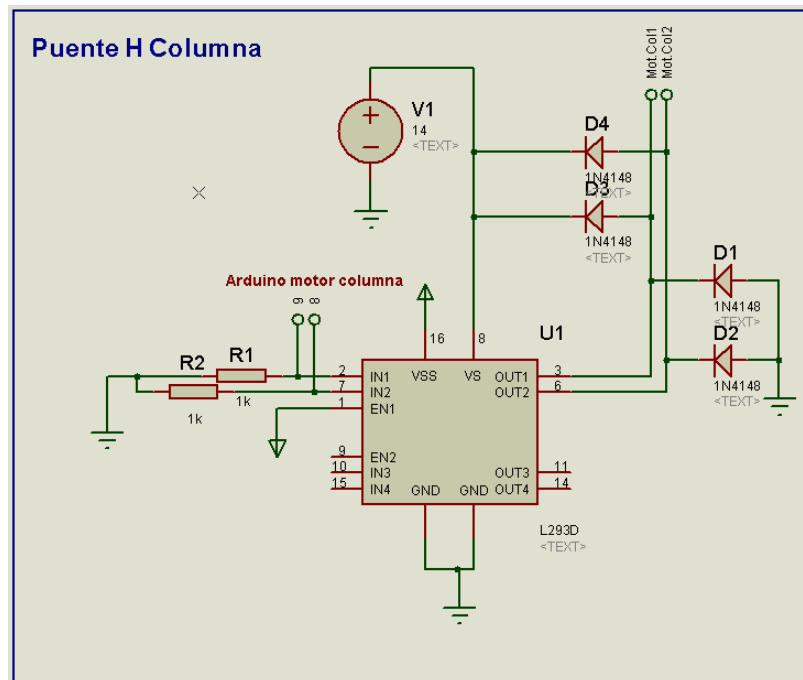


Figura 74 Circuito electrónico para posicionamiento del palpador

Tabla 96

Simbología del circuito para posicionamiento del palpador

Símbolo	Descripción
	Circuito Integrado L293D Puente H
	Resistencia
	Diodo
	Fuente de Voltaje
	Terminal
	5 VCC
	Tierra

### 3.3.3 Traverse Unit

A continuación se presenta la Tabla 97 con los resultados de la inspección física del módulo y las acciones que se ha decidido llevar a cabo para cumplir con los objetivos planteados.

**Tabla 97**

#### **Inspección física y modificaciones a realizarse**

<b>Parte</b>	<b>Detalle de la Inspección</b>	<b>Trabajo a Realizarse</b>
<b>Placa Electrónica</b>	Se encontró una falla en la activación de los relés encargados del accionamiento del motor del módulo.	Sustituir los relés dañados.
<b>Cambio de velocidad del carro.</b>	El cambio de velocidad se realiza de forma manual y funciona correctamente.	Fabricar un soporte para el servomotor, de manera que realice el cambio de velocidad del carro.
<b>Movimiento del carro</b>	El movimiento se activa de forma manual con un interruptor en el panel del procesador.	Diseñar un circuito que permita accionar el movimiento desde la HMI.

El servomotor seleccionado para el cambio de las velocidades del carro es un servomotor modelo GS-3630BB, el cual se puede observar junto con sus aditamentos en la Figura 75 y Figura 76 respectivamente y cuyas características se citan en la Tabla 98.



**Figura 75 Servomotor GS-3639BB**

Fuente: (Analog STD Servo, 2014)



**Figura 76 Aditamentos Servomotor**

Fuente: (Analog STD Servo, 2014)

**Tabla 98**

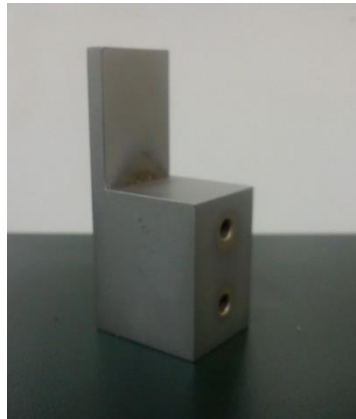
**Características Servomotor**

<b>GS-3630BB</b>	
<b>Voltaje de operación</b>	4.8V ~ 6.0V
<b>Rango de temperatura de operación</b>	-20C° ~ +60C°
<b>Voltaje de Prueba:</b>	A 4.8V                      A 6.0V
	3.0 Kg.cm                      3.6Kg.cm
	0.22 sec/60° sin carga      0.19 sec/60° sin carga
<b>Corriente de giro</b>	1200mA sin carga      1300mA sin carga
<b>Peso</b>	36 g
<b>Dimensiones</b>	41.2*20.1*37.7mm

Fuente: (Analog STD Servo)

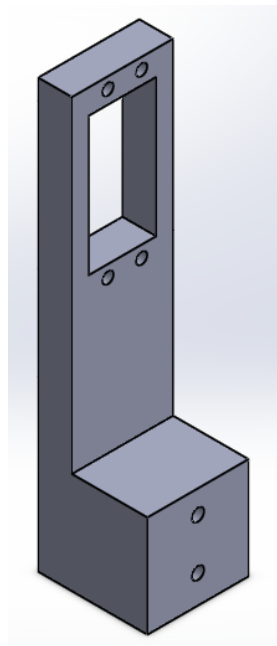
**3.3.3.1 Soporte y acople para servomotor**

El soporte para colocar el servomotor que controlará el cambio de la velocidad del carro se lo ha diseñado en base a las dimensiones del servomotor descritas en la Tabla 98, a los planos de la hoja técnica del servomotor en el anexo T3 y a partir de una pieza original del Traverse Unit, cuya función es cubrir la perilla para accionamiento manual del recorrido transversal, la cual se puede observar en la Figura 77.



**Figura 77 Pieza Traverse Unit**

A partir de esta pieza, se ha diseñado otra del mismo material pero con la adecuación necesaria para sostener el servomotor, de manera que nos permita acoplar el eje de salida del mismo, con la ayuda de uno de los aditamentos que incluye el paquete del servomotor, al eje que cambia las velocidades del carro. A continuación se presenta una isometría del soporte.

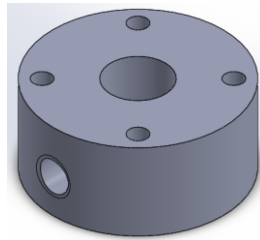


**Figura 78 Soporte Servomotor**

El acople que une el eje de salida del servomotor con el eje de cambio de velocidades del Traverse Unit se los diseñó en base al aditamento enmarcado de la Figura 76, de manera que la pieza tenga el mismo diámetro exterior del aditamento y un agujero pasante de diámetro igual al del eje de cambio de velocidades, además para la sujeción se aprovecharán los orificios del aditamento para colocar pasadores



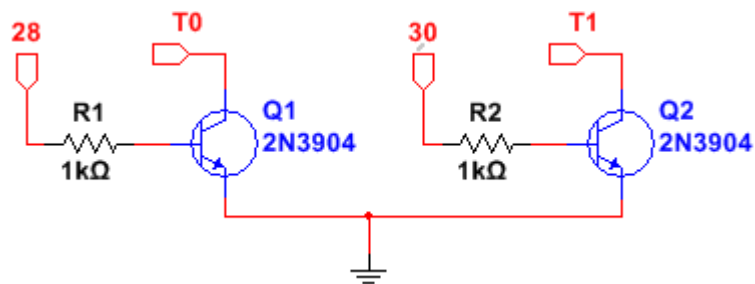
metálicos y se colocará un prisionero en la pieza para la sujeción al eje de cambio de velocidades.



**Figura 79 Acople Servomotor**





### **Movimiento del carro**

Para realizar el movimiento del carro desde la HMI se ha diseñado un circuito a base de transistores que permitirá obtener un 1 o 0 lógico en las señales del procesador que activan el movimiento del carro, en la Figura 80 se puede observar el circuito que se diseñó donde 28 y 29 son pines del Arduino, T0 y T1 son las señales del procesador, y en la Tabla 100 tenemos la tabla de verdad que nos indica el comportamiento de las señales para el avance y el retroceso del carro.



**Figura 80 Circuito lógico para el movimiento del carro**

**Tabla 99****Simbología del circuito lógico para el movimiento del carro**

Símbolo	Descripción
	Transistor NPN
	Resistencia
	Entrada
	Tierra

**Tabla 100****Tabla de verdad para movimiento del carro**

Movimiento	Pin Arduino		Procesador	
	28	30	T0	T1
<b>Avance</b>	1	0	0	1
<b>Retroceso</b>	1	1	0	0

**3.3.4 Procesador****Regulador de voltaje a 5 VCD**

El módulo procesador presenta una avería en su fuente de alimentación DC de 5 Voltios, por lo que es necesario su reemplazo. Se utilizará un regulador de voltaje variable LM338K el cual puede entregar desde 1.2 a 25 VDC con una corriente máxima de 5A, regulando su salida a 5V. La principal causa de su uso es la disponibilidad limitada en el mercado de reguladores de voltaje fijo a 5V con corriente de 5A.

El circuito electrónico encargado de éste propósito se muestra a continuación:

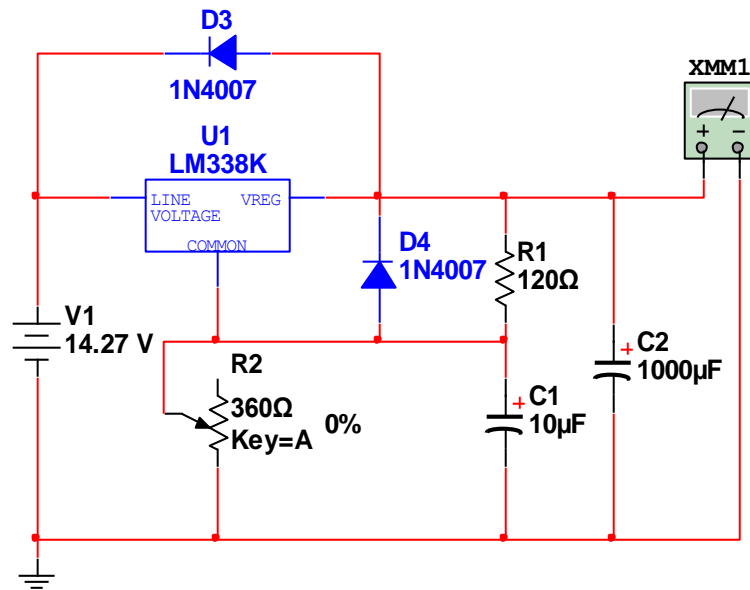


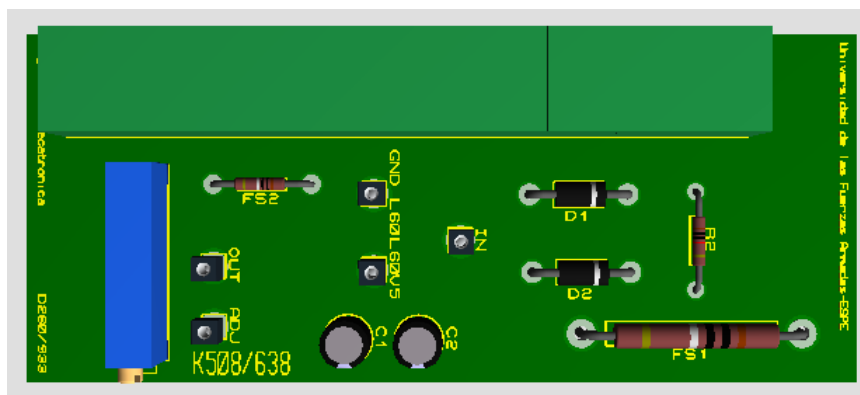
Figura 81 Regulador de voltaje LM338K

Tabla 101

Simbología circuito regulador de voltaje LM338K

Símbolo	Descripción
	Regulador de voltaje LM338K
	Potenciómetro
	Resistencia
	Fuente de Voltaje
	Tierra
	Diodo
	Multímetro
	Capacitor

El diseño de pistas de la placa se encuentra en el anexo P1, mientras que la distribución de los componentes se muestra en la Figura 82:



**Figura 82 Distribución de los componentes del regulador de 5Vdc**

### **Acondicionamiento de señal**

Del módulo procesador del rugosímetro TALYSURF 5 se obtiene la señal sin filtrar, proveniente del acondicionamiento del sensor de inductancia variable, dicha señal posee un rango de -11.37V a 11.37V DC por lo que es necesario realizar un acondicionamiento adicional para ser usada como parte de la modernización del equipo. Dicho acondicionamiento adicional consta de un rectificador de precisión para eliminar la parte negativa de la señal y trabajar con valores positivos, un comparador de voltaje para saber cuándo dicho valor se ha cambiado y un divisor de voltaje para la disminución a máximo 5 voltios de la señal. Todo esto se realizará por el hecho de usar el Arduino como tarjeta de adquisición de datos, específicamente el puerto A/D (análogo – digital), mismo que acepta valores desde 0 a 5 voltios.

### **Rectificador de precisión con entradas sumadoras**

El circuito rectificador (Figura 83) a implementarse, consta a su vez con diodos de alta rapidez como lo es el modelo 1N4148. La respuesta del sistema se presenta en la Figura 84.

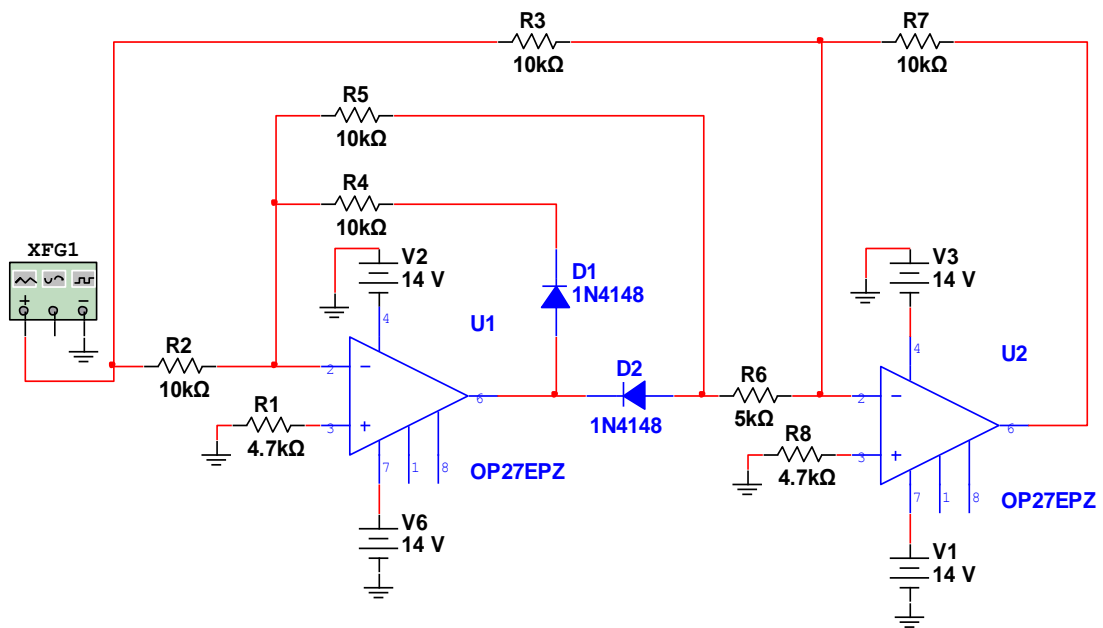
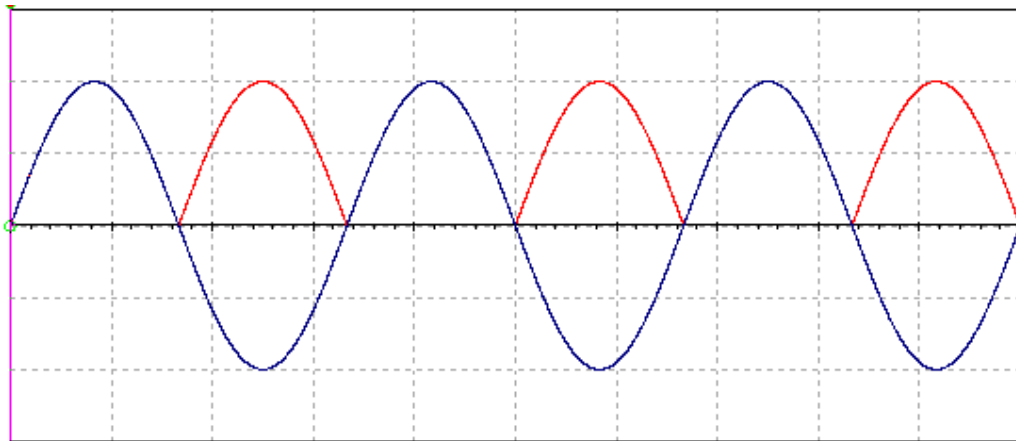


Figura 83 Rectificador de precisión a implementarse

Tabla 102

**Simbología circuito rectificador de precisión**

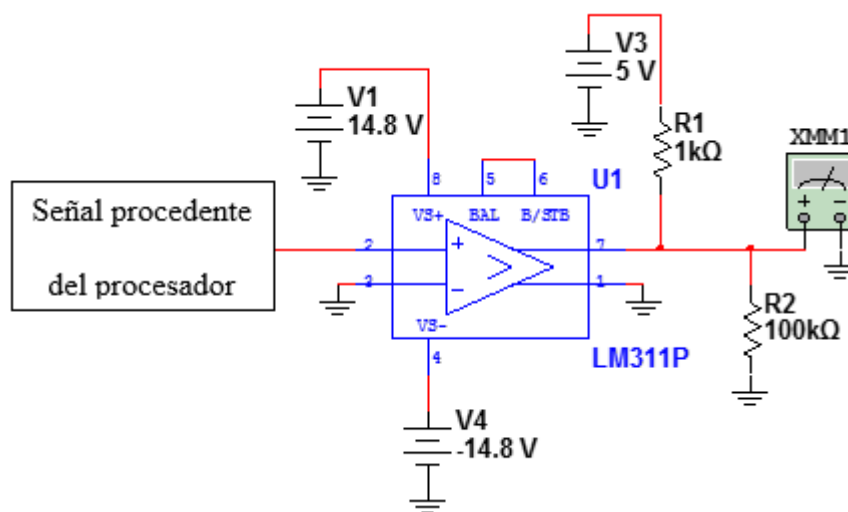
Símbolo	Descripción
	Amplificador operacional
	Resistencia
	Fuente de Voltaje
	Tierra
	Generador de funciones
	Diodo



**Figura 84 Respuesta del rectificador de precisión**

### Circuito comparador de voltaje

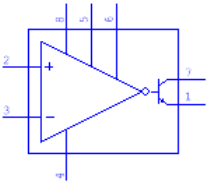



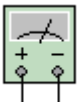
El circuito detector de paso por cero o cambio de signo del valor de la señal a efectuarse se detalla a continuación:



**Figura 85 Circuito comparador de voltaje**

Tabla 103

## Simbología circuito comparador de voltaje

Símbolo	Descripción
	Comparador de voltaje
	Resistencia
	Fuente de Voltaje
	Tierra
	Multímetro

## Divisor de tensión

La escala de 11.37 a 5 voltios se reduce con la configuración de divisor de voltaje o tensión, se procede entonces a calcular los valores de resistencias necesarios.

$$V_x = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_s \quad (21)$$

Despejando R2 tenemos que:

$$R_2 = \left( \frac{R_1 * V_s}{V_x} \right) - R_1 \quad (22)$$

Donde  $V_s$  representa los 11.37V y  $V_x$  los 5V deseados; se toma un valor de  $R_1$  de 1K $\Omega$ , valor comercial. Por lo tanto  $R_2$  queda de la siguiente manera:

$$R_2 = \left( \frac{1000 * 11.37}{5} \right) - 1000 = 1274\Omega$$

Un valor de 1274 $\Omega$  no es un valor comercial de resistencia por lo que se usará un potenciómetro de precisión de valor 2K $\Omega$ , resistencia variable que nos ayuda a llegar a dicho valor. El circuito por tanto se implementa de la siguiente manera:

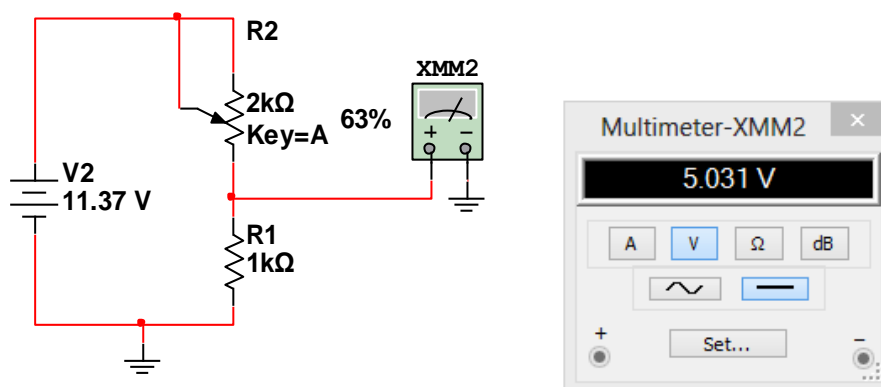





Figura 86 Divisor de voltaje a implementarse

Tabla 104

### Simbología divisor de voltaje

Símbolo	Descripción
	Potenciómetro
	Resistencia
	Fuente de Voltaje

### Filtro Gaussiano

El estudio de Yuan, Vorburger, Song, & Renegar del 2000 dejó lo siguiente:

A partir de la ecuación del filtro Gaussiano:

$$H_n(\lambda_c/\lambda) = \left( \frac{\sin(C_n \pi \lambda_c/\lambda)}{C_n \pi \lambda_c/\lambda} \right)^n \quad (23)$$

Bajo las condiciones de medición digital, si  $x(i)$  representa el perfil real digitalizado e igual al espacial, entonces el punto medio de ondulación  $m_1(i)$  está dado por:

$$m_1(i) = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} x(j) \quad (24)$$

Donde  $2k+1$  es el número de datos tomados dentro de la longitud  $C_1 * \lambda_c$ .

La función de transferencia  $H_1(z)$  en el espacio de la transformada  $z$  corresponde:

$$H_1(z) = \frac{1}{2k+1} \frac{z^{-k}(1 - z^{2k+1})}{1 - z} \quad (25)$$



A partir de ésta ecuación, las características digitales de transmisión del método de filtrado Gaussiano son representadas por:

$$H_1(N/N_c) = \frac{1}{2k+1} \frac{\sin((2k+1)\pi/N)}{\sin(\pi/N)} \quad (26)$$

Donde  $N_c$  es el número de datos tomados dentro de una longitud de corte o cut-off  $\lambda_c$ ;  $N$  es el número de datos tomados a lo largo de la longitud de muestreo;  $k$  es un entero determinado por

$$2k+1 = c_1 N_c \quad (27)$$

Y el valor de  $k$  es escogido para hacer a  $|2k+1 - c_1 N_c|$  mínimo.

### Filtro Gaussiano de alto orden de aproximación

La forma de este filtro de alto orden analógicamente es:

$$H_n(N/N_c) = \left( \frac{1}{2k+1} \frac{\sin((2k+1)\pi/N)}{\sin(\pi/N)} \right)^n \quad (28)$$

Donde  $k$  satisface la condición de mínimo  $|2k+1 - c_n N_c|$ .

Su función de transferencia  $H_n(z)$  de la transformada  $z$  es:

$$H_n(z) = \left( \frac{1}{2k+1} \frac{z^{-k}(1-z^{2k+1})}{1-z} \right)^n \quad (29)$$

Por tanto se puede usar dicha ecuación  $n$  veces y finalmente obtener la aproximación Gaussiana filtrada. El proceso computacional a seguir es el siguiente:

El perfil sin filtrar  $m_0$  está dado por:

$$m_0(1) = x(1), m_0(2) = x(2), \dots, m_0(M) = x(M). \quad (30)$$

Para cualquier etapa del filtrado final o intermedia  $p=1, 2, 3, \dots, n$ , la línea media filtrada  $m_p$  es dada por:

$$m_p(i) = \sum_{j=(p-1)k+1}^{(p+1)k+1} m_{p-1}(j) \text{ para } i = pk + 1 \quad (31)$$

$$m_p(i) = m_p(i-1) + m_{p-1}(i+k) - m_{p-1}(i-(k+1)), \text{ para } i = pk + 2, pk + 3, \dots, M - pk, \quad (32)$$

$$m(i) = \frac{m_n(i)}{(2k+1)^n} \quad (33)$$

$$i = nk + 1, nk + 2, \dots, M - nk,$$

Donde  $M$  es el número de datos tomados dentro de la longitud de medición y  $m(i)$ ,  $i=nk+1, \dots, M-nk$  es la línea media precisa filtrada mediante el filtro Gaussiano. En general, las condiciones de muestreo para el filtro Gaussiano debe satisfacer con  $M - 2nk \geq 5N_c$ . Éstos  $5N_c$  datos representan los datos obtenidos en la longitud de muestreo y los datos del principio y final son omitidos (cut off inicio y cut off del final) (Yuan, Vorburger, Song, & Renegar, 2000).

El filtro  $H_8(z)$  es seleccionado para efectos del proyecto. Teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo ( $T_s$ ) es de 1200us, el número de datos tomados en los diferentes recorridos posibles ( $N_c$  totales), el número de datos tomados en cada uno de los cut off ( $N_c$ ) y los diferentes valores de  $k$  se muestra a continuación:

Tabla 105

## Parámetros teóricos del filtro Gaussiano

	N° cutoff	1	7	27	1	7	14	1	7	9	1	4	7	1	4	7
	cut off	0,08			0,25			0,8			2,5			8		
	Distancia [mm]	0,08	0,56	2,16	0,25	1,75	3,5	0,8	5,6	7,2	2,5	10	17,5	8	32	56
Teórico	Nc	6400	6400	6400	4000	4000	4000	6400	6400	6400	8000	8000	8000	6400	6400	6400
	Ts [us]	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
	Nc totales	6400	44800	172800	4000	28000	56000	6400	44800	57600	8000	32000	56000	6400	25600	44800
	k (H8) C <sub>8</sub> =0,2275	727,5	727,5	727,5	454,5	454,5	454,5	727,5	727,5	727,5	909,5	909,5	909,5	727,5	727,5	727,5
	Intervalo de muestreo [um]	0,013	0,013	0,013	0,063	0,063	0,063	0,125	0,125	0,125	0,313	0,313	0,313	1,250	1,250	1,250

Considerando la velocidad lineal usada en cada uno de los recorridos, se calcula el tiempo de accionamiento del motor de recorrido longitudinal del Traverse Unit con el que se alcanza la distancia requerida:

Tabla 106

## Tiempos de accionamiento

N° cutoff	1	7	27	1	7	14	1	7	9	1	4	7	1	4	7
cut off	0,08			0,25			0,8			2,5			8		
Distancia [mm]	0,08	0,56	2,16	0,25	1,75	3,5	0,8	5,6	7,2	2,5	10	17,5	8	32	56
tiempo [s]	8	56	216	5	35	70	8	56	72	10	40	70	8	32	56
Vh [mm/s]	0,01			0,05			0,1			0,25			1		

Una vez realizado el programa en Arduino de adquisición de datos, se procede a contabilizar el número de datos obtenidos de manera práctica, por lo que se calcula el factor k nuevo:

Tabla 107

## Parámetros prácticos del filtro Gaussiano

	N° cutoff	1	7	27	1	7	14	1	7	9	1	4	7	1	4	7
	cut off	0,08			0,25			0,8			2,5			8		
	Distancia [mm]	0,08	0,56	2,16	0,25	1,75	3,5	0,8	5,6	7,2	2,5	10	17,5	8	32	56
Práctico	Nc	6399	6363	6337	4000	3979	3976	6399	6363	6362	7999	7958	7953	6399	6368	6363
	Ts [us]	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
	Nc totales	6399	44544	171089	4000	27856	55666	6399	44544	57260	7999	31831	55670	6399	25473	44544
	k (H8) C1=0,2275	727,4	723,3	720,3	454,5	452,2	451,8	727,4	723,3	723,2	909,4	904,7	904,1	727,4	723,9	723,3
	Intervalo de muestreo [um]	0,013	0,013	0,013	0,063	0,063	0,063	0,125	0,125	0,125	0,313	0,313	0,313	1,250	1,250	1,250

El filtro Gaussiano debe cumplir que  $M - 2nk \geq 5N_c$  por tanto se procede a realizar la comprobación para cada uno de ellos:

Tabla 108

## Validación del filtro

Validación del filtro $M-2nK \geq 5N_c$															
Práctico															
N° cutoff	1	7	27	1	7	14	1	7	9	1	4	7	1	4	7
cut off	0,08			0,25			0,8			2,5			8		
Distancia [mm]	0,08	0,56	2,16	0,25	1,75	3,5	0,8	5,6	7,2	2,5	10	17,5	8	32	56
M-2nK	6399	32970,6	159564,3	4000	20621,4	48437,4	6399	32970,6	45688,8	7999	17355,9	41203,8	6399	13890,8	32970,6
(N°cutoff-2)Nc	6399	31817,1	158415,7	4000	19897,1	47713,7	6399	31817,1	44535,6	7999	15915,5	39764,3	6399	12736,5	31817,1
Teórico															
M-2nK	6400	33160,0	161160,0	4000	20728,0	48728,0	6400	33160,0	45960,0	8000	17448,0	41448,0	6400	13960,0	33160,0
(N°cutoff-2)Nc	6400	32000,0	160000,0	4000	20000,0	48000,0	6400	32000,0	44800,0	8000	16000,0	40000,0	6400	12800,0	32000,0

El código de programa utilizado para el cálculo de los perfiles de rugosidad y ondulación se encuentra en el anexo E.

### Selección de Magnificación

Para realizar la selección de la magnificación desde la HMI, se ha diseñado un circuito básico de selección formado por transistores que son los encargados de hacer 1 o 0 lógico a las señales del procesador y que permiten el cambio. A continuación se presenta el circuito en la Figura 87, donde M0, M1, M2 y M3 son las señales que entran desde el procesador a la placa, y 32, 34, 36 y 38 son los pines del Arduino que dan la señal de control a la placa.

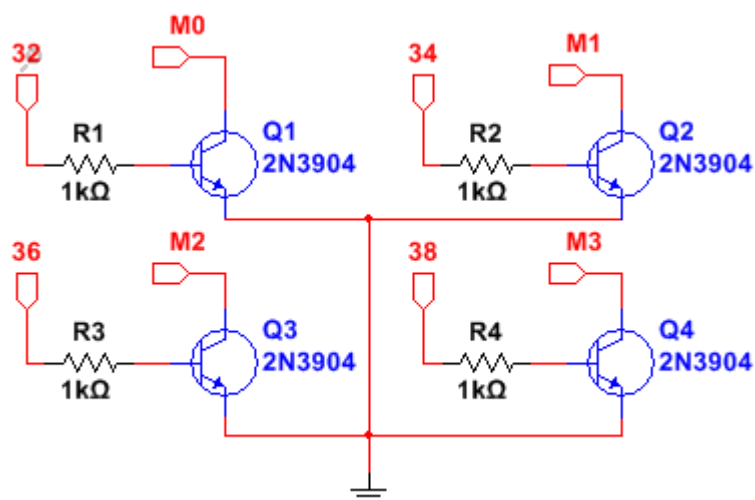






Figura 87 Circuito selector de magnificaciones

Tabla 109

### Simbología circuito selector de magnificaciones

Símbolo	Descripción
	Transistor NPN
	Resistencia
	Entrada
	Tierra

La Tabla 110 nos indica el comportamiento de las señales para obtener las diferentes magnificaciones del equipo.

**Tabla 110**

**Tabla de verdad para selección de magnificaciones**

Magnificación	Pin Arduino				Señal del procesador			
	38	36	34	32	M3	M2	M1	M0
x 100	1	1	1	1	0	0	0	0
x 200	1	1	1	0	0	0	0	1
x 500	1	1	0	1	0	0	1	0
x 1 000	1	1	0	0	0	0	1	1
x 2 000	1	0	1	1	0	1	0	0
x 5 000	1	0	1	0	0	1	0	1
x 10 000	1	0	0	1	0	1	1	0
x 20 000	1	0	0	0	0	1	1	1
x 50 000	0	1	1	1	1	0	0	0
x 100 000	0	1	1	0	1	0	0	1

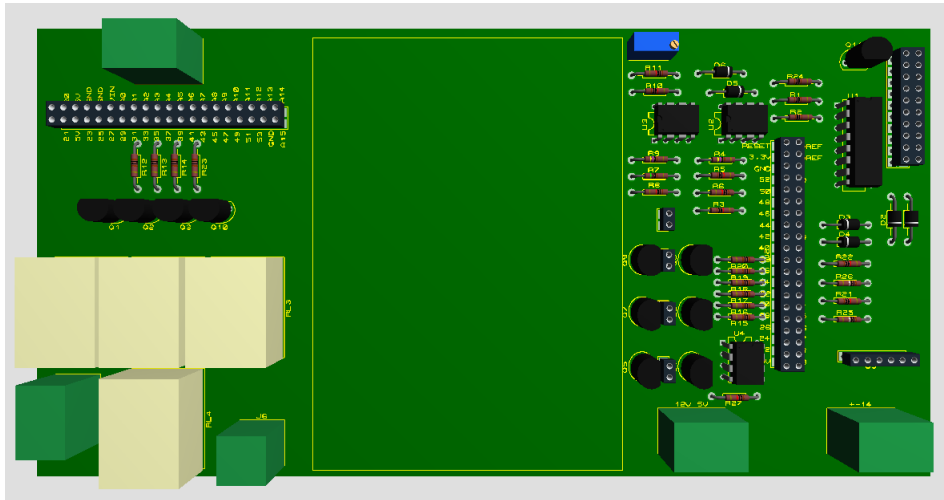
### Placas electrónicas

Se diseñó una placa electrónica para la comunicación entre el Arduino y la placa de control del procesador (Figura 88), de manera que se pueda tener todos los pines del Arduino en dicha placa, además la facilidad de montar y desmontar sin necesidad verificar los pines a los que va conectada la placa de control. El diseño de pistas de la placa se encuentra en el anexo P2.



**Figura 88 Placa de comunicación Arduino – Placa de control**

El diseño de pistas de la placa de control se encuentra en el anexo P3, mientras que la distribución de los componentes se muestra en la Figura 89.



**Figura 89 Distribución de componentes de la Placa de Control**

### Interfaz con el usuario

La interfaz con el usuario responsable de brindar una interacción amigable e intuitiva entre el equipo y la persona que lo use se diseñó en el software de desarrollo GAMBAS siguiendo la guía GEDIS que es un referente estándar para en buen diseño de HMIs. A continuación se muestran las diferentes pantallas de nuestra interfaz.



**Figura 90 Pantalla inicial**



Figura 91 Selección de puerto de comunicación

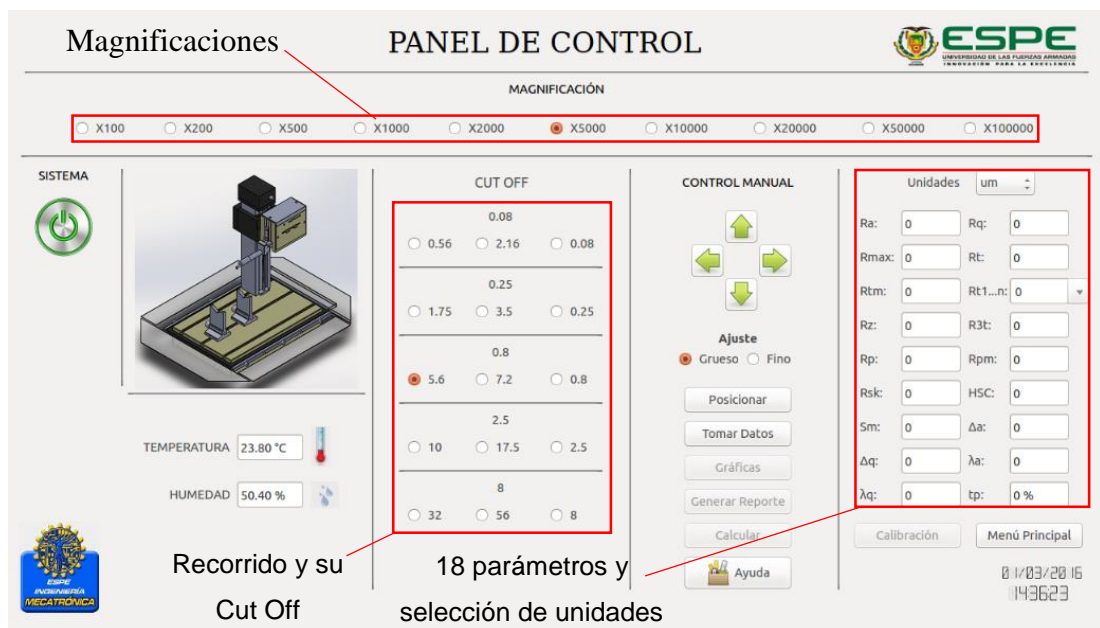
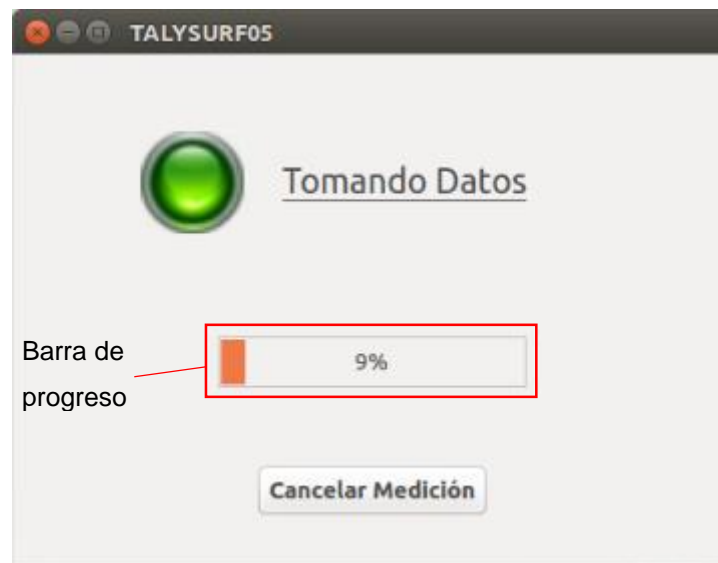


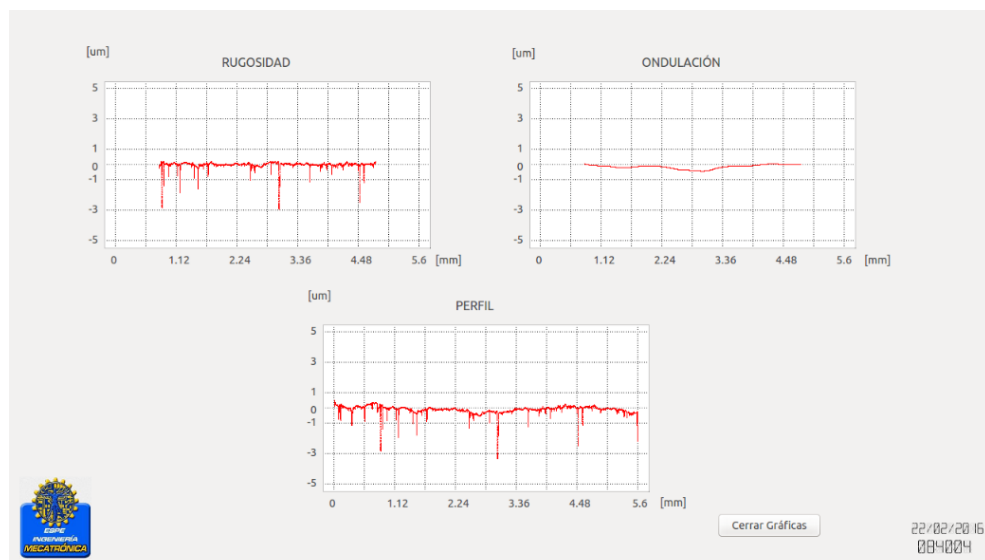
Figura 92 Panel principal de control



Figura 93 Aviso de palpador en posición



**Figura 94 Progreso de toma de datos**



**Figura 95 Pantalla de gráficas**



Figura 96 Ingreso de datos para reporte

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
"ESPE"

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE  
LA ENERGÍA Y MECÁNICA

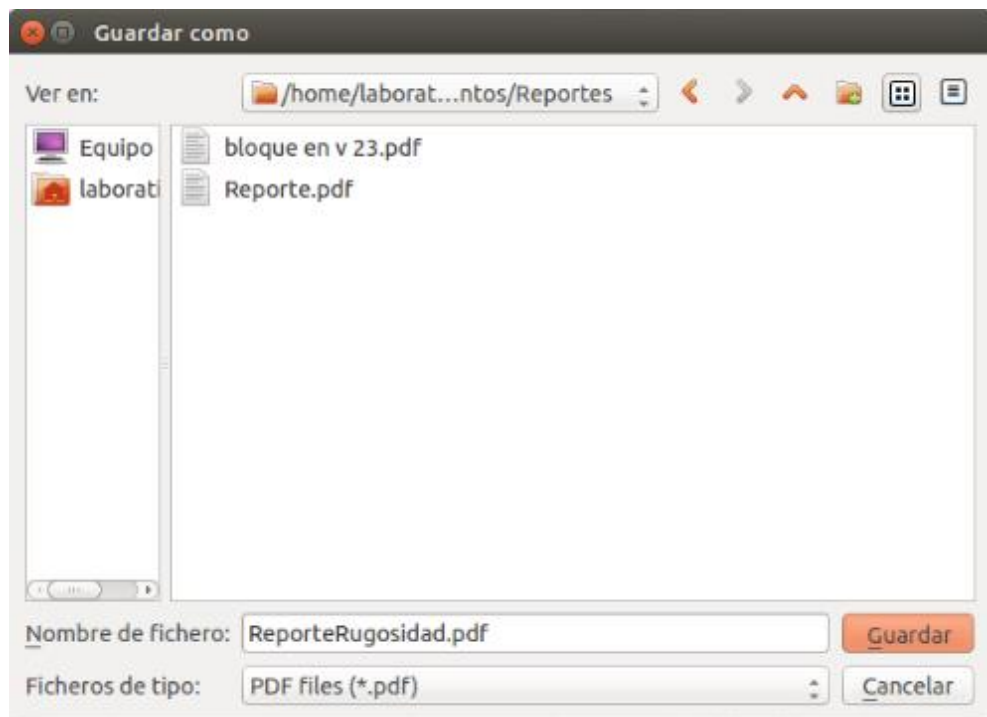
**Reporte de Textura Superficial**

Usuario: Usuario      Material: Material  
 Fecha: 22/02/2016 09:01      Recorrido: 5.6      Cut-Off: 0.8  
 Temperatura: 24.30 °C      Humedad: 45.90 %

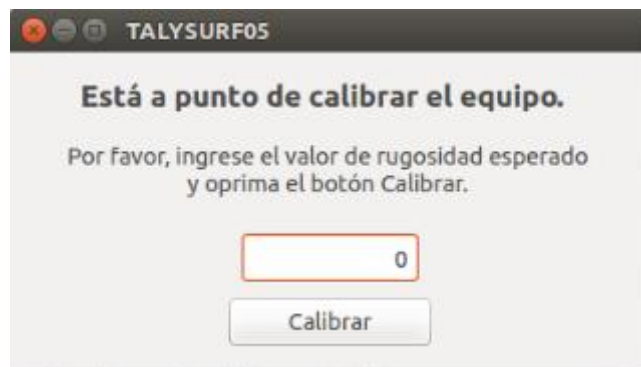
Parámetro	Valor	Unidades
Ra	0,1125	x10 <sup>-4</sup> m
Rq	0,7155	x10 <sup>-4</sup> m
Rmax	2,8616	x10 <sup>-4</sup> m
RE	2,8616	x10 <sup>-4</sup> m
Rfm	2,4579	x10 <sup>-4</sup> m
Rz	2,8731	x10 <sup>-4</sup> m
R3s	2,8183	x10 <sup>-4</sup> m
Rp	0,2844	x10 <sup>-4</sup> m
Rpm	0,2166	x10 <sup>-4</sup> m
Rsk	-2,862	
HSC	476	
Sm	8,3642	x10 <sup>-4</sup> m
Sa	0,4974	

"Página 1 de 2"

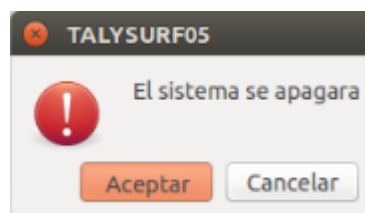
Figura 97 Configuración para impresión o almacenamiento del reporte



**Figura 98 Dirección y nombre de almacenamiento de reporte**



**Figura 99 Pantalla de calibración del equipo**



**Figura 100 Salida del sistema**



**Figura 101 Pantalla de ayuda al usuario**

### **Tapa frontal del procesador**

Gracias a la implementación de la HMI en el equipo, ya no es necesario operarlo manualmente a través de los interruptores, pulsadores, etc. que se encuentran en el panel del procesador motivo que dio lugar al diseño de una nueva tapa frontal donde únicamente se mostrará el desplazamiento del palpador mediante el arreglo LED que posee el procesador, además tendrá acceso a la tarjeta de control que se ha diseñado y tendrá los datos de los autores del proyecto, la carrera y la institución. El diseño del nuevo panel se muestra en la Figura 102.



## CAPÍTULO IV

### MONTAJE, PRUEBAS Y RESULTADOS

Luego de haber concluido con el diseño mecánico, electrónico y de control referente a la modernización del rugosímetro, se procede a realizar la rehabilitación pertinente de cada uno de los módulos, seguido del montaje de los componentes que cumplen con la modernización del proyecto.

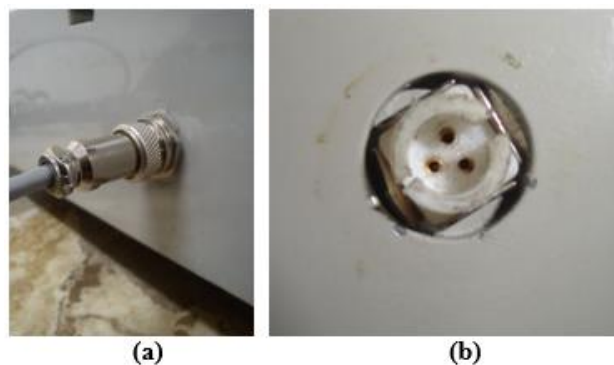
#### 4.1 Bancada

##### 4.1.1 Rehabilitación

Con base en la tabla de inspección correspondiente (Tabla 5), la rehabilitación de la bancada comprende el cambio de los conectores viejos existentes, evitando un futuro corte de algún tipo de señal.



**Figura 103 Conector antiguo del motor de la columna**



**Figura 104 (a) Conector nuevo de 5 pines AERO MI-745M (b) Conector antiguo**

## 4.1.2 Modernización

La modernización de la bancada comprende el accionamiento del movimiento de la columna desde la interfaz, sin considerar el interruptor existente ya que no funciona, también se incluye la construcción de la cabina de ambiente controlado.

### 4.1.2.1 Cabina de ambiente controlado

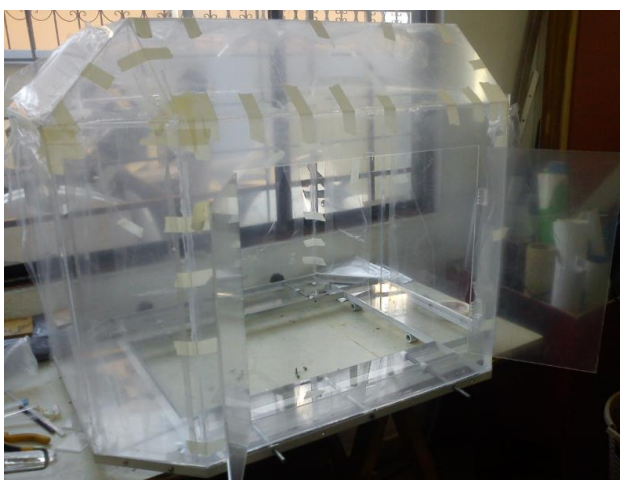
La construcción de la estructura soporte de la cabina se realizó con perfiles estructurales en L de dimensiones 20x20x2mm, con un peso de 0.6 Kg/m, escogidos del catálogo de la acería local Novacero (Figura 105).



**Figura 105 Ángulos estructurales en L, donde  $a=20\text{mm}$ ,  $e=2\text{mm}$ .**

EL peso total de la estructura de acrílico se estima en 11700 g distribuidos sobre el perímetro de la estructura metálica que conformará un área de apoyo de  $8154\text{ mm}^2$  obteniéndose una carga de  $1,43\text{ g/mm}^2$  por lo tanto no se vio la necesidad de realizar un estudio pormenorizado mediante criterios de diseño.

La construcción de la cabina se la realizó conforme a la hoja de procesos que se detalla en los anexos B7, B8, B9, B10, B11 y B12. La simbología que en esta se utiliza está conforme a la norma DIN.



**Figura 106 Cabina de acrílico de 3mm de espesor**

Para la conexión del procesador con los elementos en el interior de la cabina se colocó dos conectores DB25 como se muestra en la Figura 107.



**Figura 107 Conectores DB25**

#### 4.1.2.2 Control humedad

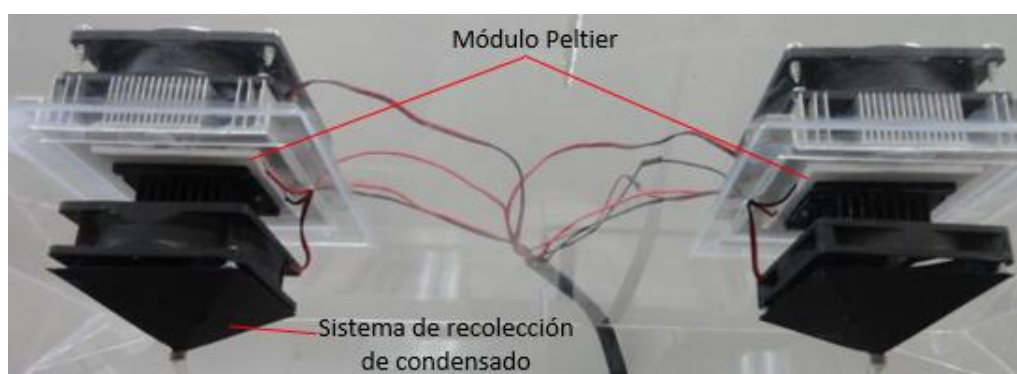
Para el montaje del humidificador escogido en el Capítulo III se fabricó un soporte con la ayuda del prototipado 3D usando PLA (Poliácido Láctico) como materia prima, el cual es un termoplástico de origen natural que permite impresiones más rápidas en una variedad de colores.



**Figura 108 Soporte Humidificador**

#### 4.1.2.3 Control de temperatura

Se efectuó el montaje de dos módulos de refrigeración por efecto Peltier adquiridos, en la parte superior de la cabina de ambiente controlado, como se muestra en la Figura 109. El sistema de recolección de condensado se fabricó mediante el proceso de prototipado 3D con PLA como materia prima.



**Figura 109 Montaje módulos Peltier**

## 4.2 Columna

### 4.2.1 Rehabilitación

Conforme a la Tabla 6, es necesario realizar una rehabilitación tanto del carro de recorrido vertical, como del husillo de bolas recirculantes, con la finalidad de obtener un movimiento que permita al sensor llegar a la posición óptima para realizar una medida precisa, además se determinó la necesidad de fabricar un poste para la correcta sujeción de la tapa superior de la columna puesto que el original se encontró roto en su parte inferior, imposibilitando su función de sujeción.

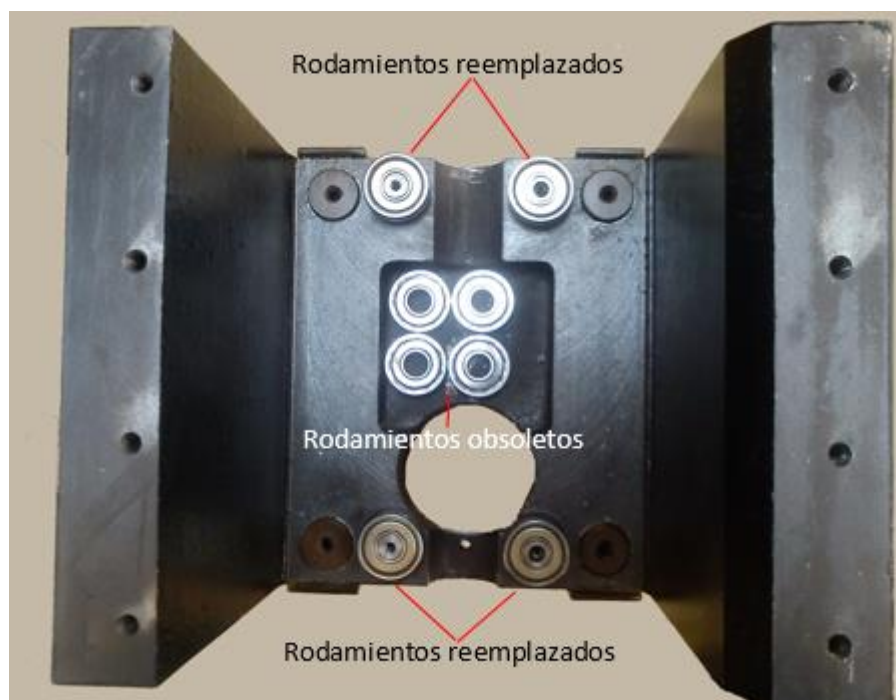
Lo primero que se realizó fue desmontar el carro de recorrido vertical y verificar si existían elementos en mal estado para luego ser reemplazados por elementos de las mismas características. Se hallaron 5 rodamientos en mal estado (Figura 110) que impedían el desplazamiento fluido del carro.



**Figura 110 Rodamientos en mal estado retirados de la columna**



Los cuatro rodamientos pequeños de la Figura 110 fueron reemplazados por otros de sus mismas características modelo SKF 607 2Z y el rodamiento más grande se lo reemplazo por uno modelo SKF 6000 2Z según el anexo SKF\_3 y el anexo SFK\_4 respectivamente. En los anexos SKF\_1 y SKF\_2 se encuentra la descripción de las designaciones complementarias de los modelos.

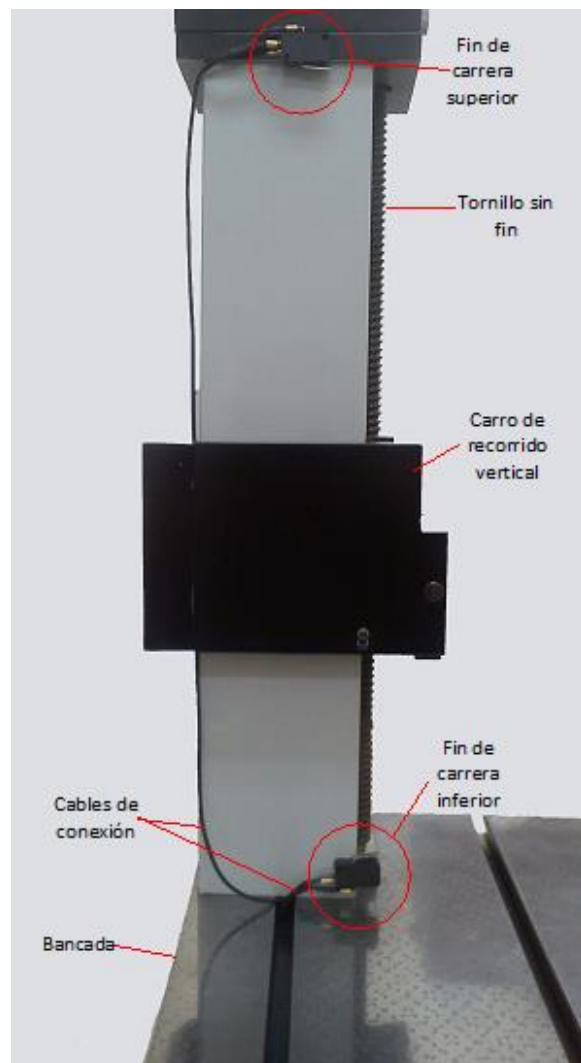


**Figura 111 Vista superior del carro de la columna, rodamientos reemplazados**

Como segundo punto, se desmontó el tornillo sin fin y el husillo de bolas recirculantes de la columna para darles una limpieza profunda y protección contra la humedad con el producto multiusos WD-40 y lubricar las bolas del husillo con grasa ligera para disminuir su fricción. Por último, se fabricó un poste de dimensiones iguales a las de los postes originales para la sujeción de la tapa superior de la columna. Anexo C1.

#### **4.2.2 Modernización**

Se colocaron fines de carrera en la parte superior e inferior de la columna, de manera tal que se accionen mecánicamente debido a la presencia del carro de la columna, como se muestra en la Figura 112.



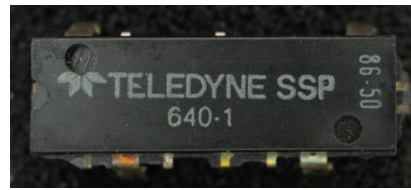
**Figura 112 Fines de carrera – Columna**

Se reemplazó el conector del motor de la columna ya que el anterior tenía mal aspecto y en cualquier momento podía llegar a dañarse.

### 4.3 Traverse Unit

#### 4.3.1 Rehabilitación

Se reemplazó los dos relés de estado sólido modelo Teledyne 640-1 (Figura 113) que presentaban fallas al momento de accionar el motor del módulo.



**Figura 113 Relé de estado sólido del Traverse Unit**

#### 4.3.2 Modernización

La modernización del módulo comprende la fabricación de un soporte y un acople para el servomotor elegido responsable del cambio de las velocidades.

El plano de dicho soporte para el servomotor se detalla en el anexo T1.



**Figura 114 Fresado del soporte para el servomotor**

El acople para el servomotor hacia el eje de cambio de velocidad del Traverse Unit se fabricó como se detallan en el anexo T2.



**Figura 115 Torneado del acople para el servomotor**

El resultado final para la unión del servomotor al Traverse Unit se muestra en la Figura 116



**Figura 116 Servomotor acoplado al eje selector de velocidades**

## **4.4 Procesador**

### **4.4.1 Rehabilitación**

Se fabricó un regulador de voltaje variable que se lo fijó a 5 voltios y es capaz de entregar 5 amperios de corriente para todo el procesador. El regulador se lo utilizará para reemplazar a un regulador del mismo voltaje y corriente que presentó mal funcionamiento y se averió.

La placa electrónica obtenida se muestra en la Figura 117.



**Figura 117 Placa electrónica regulador variable**

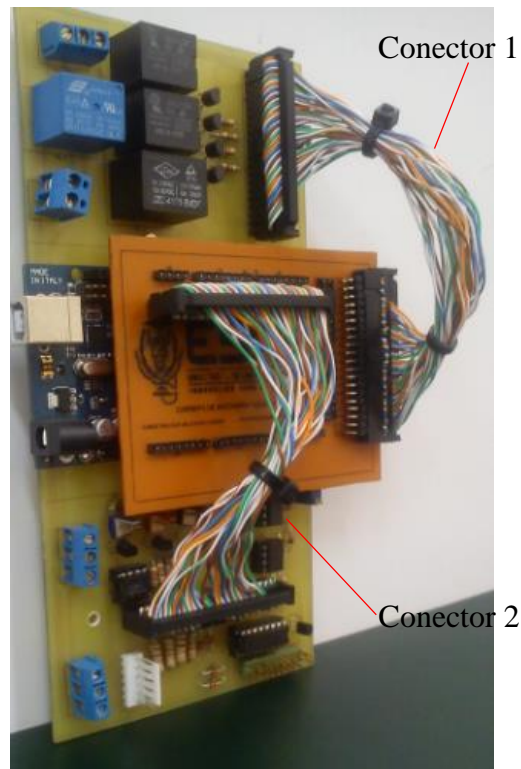
#### 4.4.2 Modernización

Esta sección del proyecto se la llevo a cabo a partir de una tarjeta Arduino Mega 2560, de tal manera que se fabricaron dos tarjetas electrónicas con los componentes necesarios para reemplazar en su mayor parte las funciones del procesador, exceptuando el acondicionamiento inicial del sensor de inductancia variable el cual no se pudo realizar debido a la falta de información técnica sobre el mismo.

A continuación se presentan la Figura 118 y la Figura 119, donde se aprecia las placas electrónicas fabricadas.

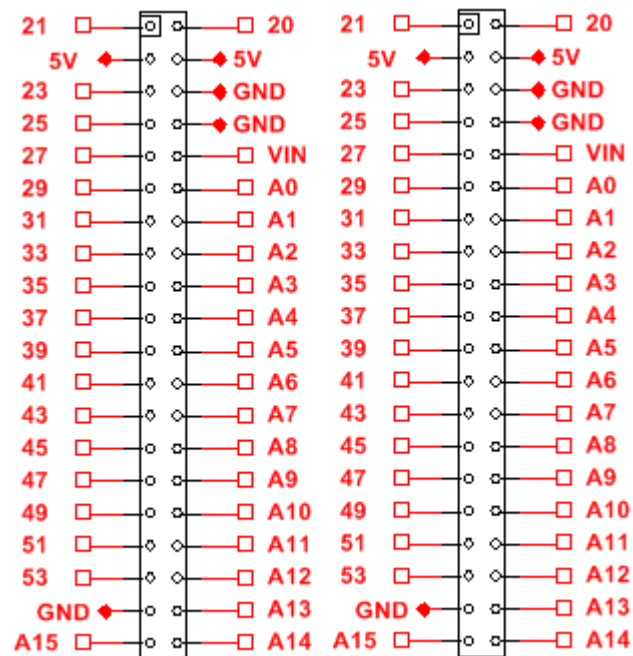


**Figura 118 Placa electrónica para Arduino**

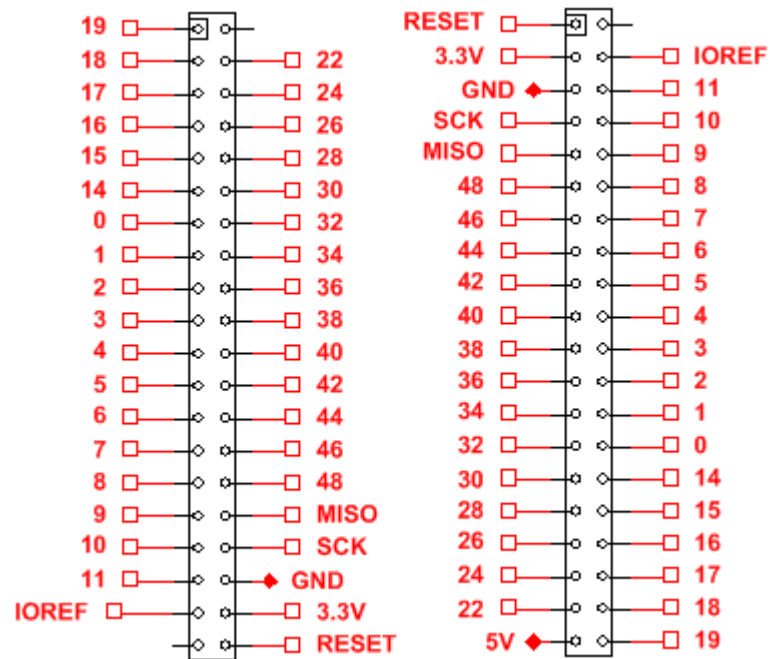


**Figura 119 Placa electrónica de control del procesador**

La configuración del conector 1 y el conector 2 se muestran en la Figura 120 y Figura 121 respectivamente.



**Figura 120 Configuración conector 1**

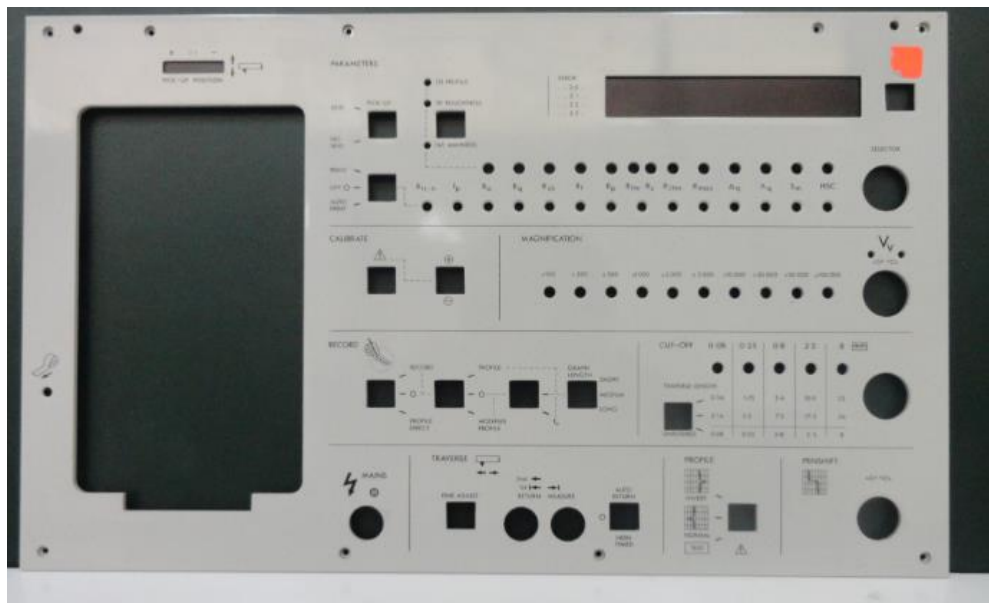


**Figura 121 Configuración conector 2**

Como parte de la modernización también se incluyó la fabricación de una nueva tapa frontal (Figura 122) para el procesador ya que se todos los controles e indicadores del panel de control ahora se encuentran en el HMI.

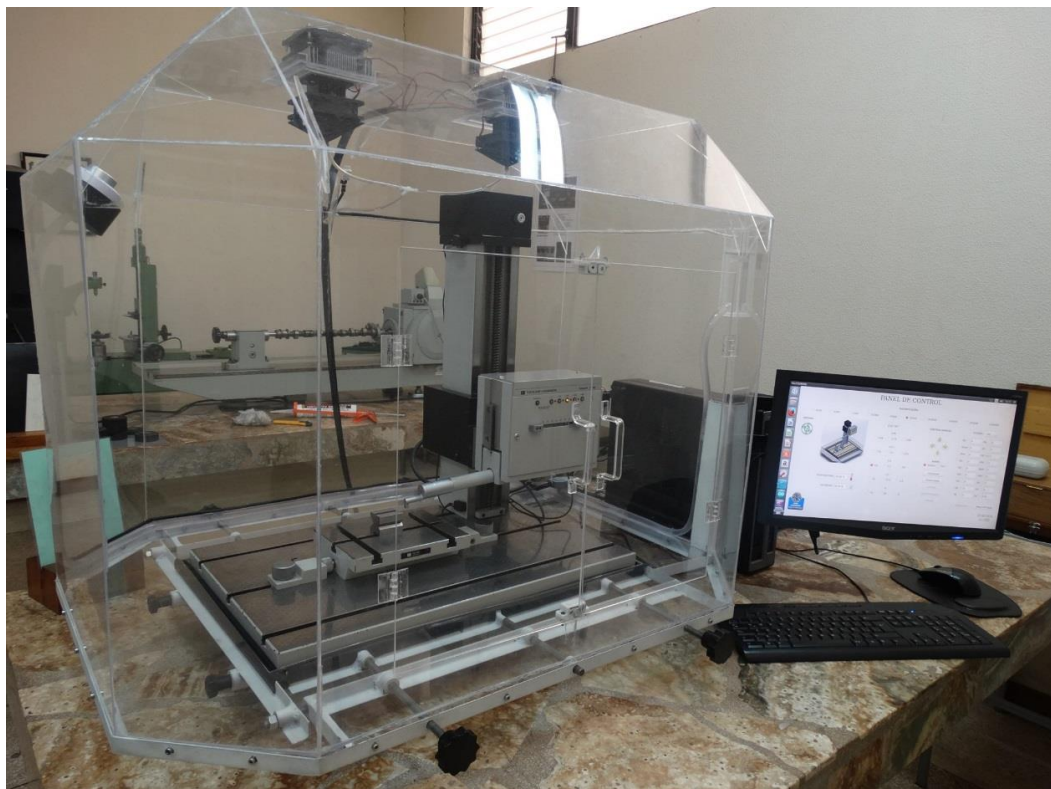


**Figura 122 Diseño de la nueva tapa frontal del procesador**



**Figura 123 Antigua tapa frontal del procesador**

Una vez finalizado el montaje de todos los componentes se tiene la Figura 124 donde se puede apreciar el resultado final del proyecto y en el anexo D un resumen de los costos.



**Figura 124 Resultado final del proyecto**



#### 4.5 Pruebas y resultados

Se procedió a realizar 3 pruebas de 10 mediciones de rugosidad cada una, sobre el patrón disponible de calibración del rugosímetro, mismo que no posee un certificado vigente, pero no presenta rayaduras a simple vista. El valor de rugosidad Ra del patrón es de 0.93 $\mu\text{m}$  con una tolerancia de 4%, obtenido de (HOBSON, TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK, pág. 8 sección 50).

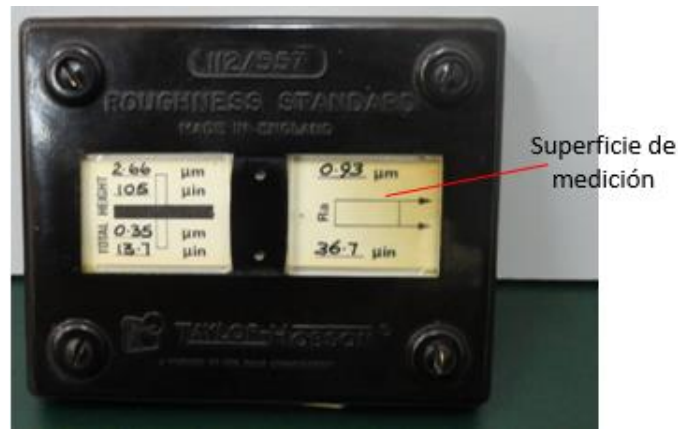


Figura 125 Patrón de calibración

Tabla 111

#### Valor Ra del patrón de calibración

Patrón de calibración		
P	0,93	um
P <sub>max</sub> (+2%)	0,9486	um
P <sub>min</sub> (-2%)	0,9114	um

#### Distribución normal

Mediante la distribución normal z se obtuvo el nivel de confiabilidad del equipo como se muestra a continuación:

Tabla 112

## Distribución normal

Distribución normal			
Nº	Xi	Xi-P	Error %
1	0,9285	-0,0015	0,1613
2	0,9278	-0,0022	0,2366
3	0,9392	0,0092	0,9892
4	0,9220	-0,008	0,8602
5	0,9419	0,0119	1,2796
6	0,9423	0,0123	1,3226
7	0,9427	0,0127	1,3656
8	0,9416	0,0116	1,2473
9	0,9198	-0,0102	1,0968
10	0,9200	-0,01	1,0753
11	0,9292	-0,0008	0,0860
12	0,9477	0,0177	1,9032
13	0,9246	-0,0054	0,5806
14	0,9496	0,0196	2,1075
15	0,9325	0,0025	0,2688
16	0,9305	0,0005	0,0538
17	0,9305	0,0005	0,0538
18	0,9304	0,0004	0,0430
19	0,9292	-0,0008	0,0860
20	0,9256	-0,0044	0,4731
21	0,9340	0,004	0,4301
22	0,9340	0,004	0,4301
23	0,9340	0,004	0,4301
24	0,9304	0,0004	0,0430
25	0,9325	0,0025	0,2688
26	0,9298	-0,0002	0,0215
27	0,9300	0	0,0000
28	0,9351	0,0051	0,5484
29	0,9335	0,0035	0,3763
30	0,9279	-0,0021	0,2258
Promedio	0,9326		
Desviación Estándar	0,0074		

El cálculo de los límites Z del patrón se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Z_{Pmin} = \frac{0.9114 - \bar{X}}{\sigma} \quad (34)$$

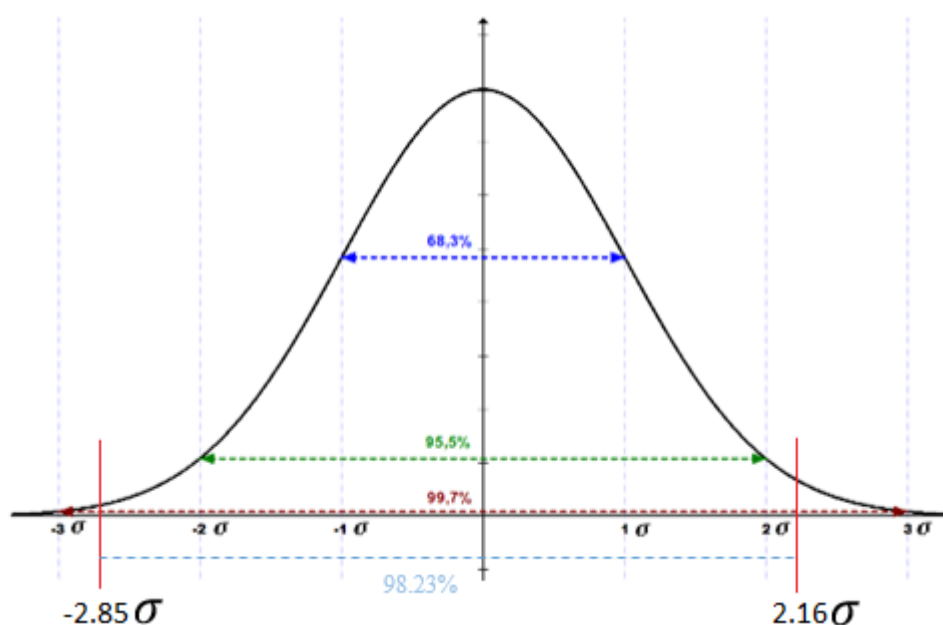
$$Z_{Pmax} = \frac{0.9486 - \bar{X}}{\sigma} \quad (35)$$

El porcentaje de confiabilidad de cada uno de los límites se obtuvo de la tabla de áreas bajo la curva normal del anexo A1.

**Tabla 113**

**Nivel de confiabilidad del equipo**

Probabilidad de ocurrencia		
$Z_{pmin}$	-2,85	49,77%
$Z_{pmax}$	2,16	48,46%
Confiabilidad		<b>98,23%</b>



**Figura 126 Distribución normal**

Este análisis nos indica que el 98.23% de los eventos sucederán dentro de la tolerancia del patrón.

**Distribución t student:**

Mediante la distribución t student se requiere saber si el valor obtenido en las mediciones de rugosidad realizadas con el rugosímetro clasifican como válidas, es decir se requiere aceptar la hipótesis nula que dice que:

$$H_0: X_{i_{promedio}} = P$$

Además se tiene la hipótesis alternativa:

$$H_1: X_{i_{promedio}} \neq P$$

La hipótesis alternativa no indica una dirección, por lo que se trata de una prueba de dos colas. Hay 9 grados de libertad, los cuales se obtiene por  $n - 1 = 10 - 1 = 9$ . El nivel de significancia escogido es de 0.01, por lo tanto al consultar el anexo A2, el valor crítico de t es de 3.25.

La regla de decisión es rechazar la hipótesis nula si el valor de t calculado se encuentra a la izquierda de -3.25, o a la derecha de 3.25.

Para efectos de cálculos la desviación estándar de la muestra se determina con la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (36)$$

El cálculo del valor t para las pruebas se lo realiza con la fórmula:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (37)$$

Donde:

$\bar{X}$  = Valor promedio

$\mu = 0.93\text{um}$

$s$  = Desviación estándar

$n$  = Numero de muestras (10)

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 114, Tabla 115 y Tabla 116.

Tabla 114

## Resultados distribución t student Prueba 1

Prueba 1			
N°	Xi	Xi-P	Error %
1	0,9285	-0,0015	0,1613
2	0,9278	-0,0022	0,2366
3	0,9392	0,0092	0,9892
4	0,9220	-0,008	0,8602
5	0,9419	0,0119	1,2796
6	0,9423	0,0123	1,3226
7	0,9427	0,0127	1,3656
8	0,9416	0,0116	1,2473
9	0,9198	-0,0102	1,0968
10	0,9200	-0,01	1,0753
<b>Promedio</b>	0,9326		
<b>Desviación Estándar</b>	0,0099		
<b>Nivel de significancia</b>		0,01	
<b>t calculada</b>		0,82	
<b>Valor crítico de t</b>		3,25	

Tabla 115

## Resultados distribución t student Prueba 2

Prueba 2			
N°	Xi	Xi-P	Error %
1	0,9292	-0,0008	0,0860
2	0,9477	0,0177	1,9032
3	0,9246	-0,0054	0,5806
4	0,9496	0,0196	2,1075
5	0,9325	0,0025	0,2688
6	0,9305	0,0005	0,0538
7	0,9305	0,0005	0,0538
8	0,9304	0,0004	0,0430
9	0,9292	-0,0008	0,0860
10	0,9256	-0,0044	0,4731
<b>Promedio</b>	0,9330		
<b>Desviación Estándar</b>	0,0086		
<b>Nivel de significancia</b>		0,01	
<b>t calculada</b>		1,10	
<b>Valor crítico de t</b>		3,25	

Tabla 116

## Resultados distribución t student Prueba 3

Prueba 3			
N°	Xi	Xi-P	Error %
1	0,9340	0,004	0,4301
2	0,9340	0,004	0,4301
3	0,9340	0,004	0,4301
4	0,9304	0,0004	0,0430
5	0,9325	0,0025	0,2688
6	0,9298	-0,0002	0,0215
7	0,9300	0	0,0000
8	0,9351	0,0051	0,5484
9	0,9335	0,0035	0,3763
10	0,9279	-0,0021	0,2258
<b>Promedio</b>	0,9321		
<b>Desviación Estándar</b>	0,0024		
<b>Nivel de significancia</b>		0,01	
<b>t calculada</b>		2,78	
<b>Valor crítico de t</b>		3,25	

Con base en los resultados, la hipótesis nula de que la media es igual a 0.93um es aceptada al nivel de significancia 0.01. Puede concluirse además que la máquina no se encuentra desajustada o descalibrada.

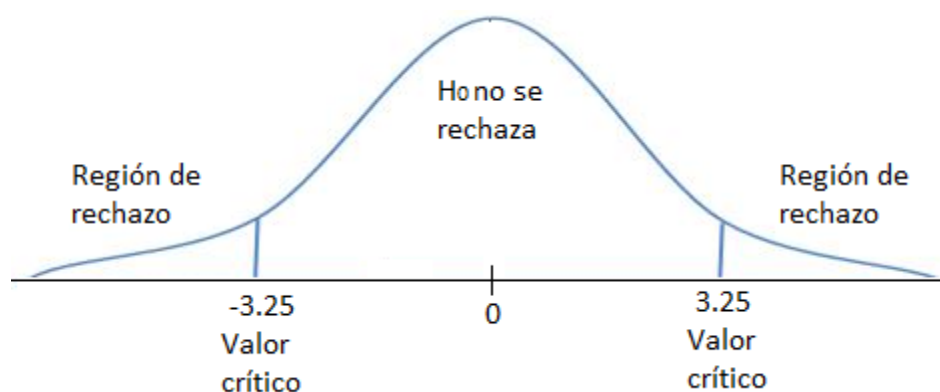


Figura 127 Distribución t student

**Análisis de la varianza:**

Con el análisis de varianza (ANOVA), se compara varias medias y se busca descomponer la variabilidad total de los datos. Test F. Partimos de:

$$\begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{l} \text{Variabilidad} \\ \text{total en los} \\ \text{datos} \end{array} \right] \\
 \\
 \text{SCT}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{l} \text{Variabilidad} \\ \text{debida a} \\ \text{diferencias entre} \\ \text{tratamientos} \\ \\ \text{(efecto del factor} \\ \text{proveedor)} \end{array} \right]
 +
 \begin{array}{c}
 \left[ \begin{array}{l} \text{Variabilidad} \\ \text{residual} \\ \\ \text{(diferencias} \\ \text{dentro de cada} \\ \text{tratamiento)} \end{array} \right] \\
 \\
 \text{SCR}
 \end{array}
 \end{array}$$

Suma de cuadrados total (Variabilidad total):

$$SCT = \sum_{i=1}^{nA} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (38)$$

Suma de cuadrados entre (Variabilidad entre, SCF):

$$SCTR = n \sum_{i=1}^{nA} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (39)$$

Suma de cuadrados dentro (Variabilidad dentro, SCR):

$$SCR = \sum_{i=1}^{nA} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (40)$$

A continuación se presenta los cálculos pertinentes al análisis de varianzas:

**Tabla 117**  
**Resultados del Análisis de Varianzas**

ANOVA											
Prueba 1				Prueba 2				Prueba 3			
N°	Xi	SCT	SCR	N°	Xi	SCT	SCR	N°	Xi	SCT	SCR
1	0,9285	1,648E-05	1,66E-05	1	0,9292	1,129E-05	1,43E-05	1	0,9340	2,074E-06	3,53E-06
2	0,9278	2,266E-05	2,28E-05	2	0,9477	2,292E-04	2,17E-04	2	0,9340	2,074E-06	3,53E-06
3	0,9392	4,409E-05	4,38E-05	3	0,9246	6,336E-05	7,02E-05	3	0,9340	2,074E-06	3,53E-06
4	0,9220	1,115E-04	1,12E-04	4	0,9496	2,904E-04	2,76E-04	4	0,9304	4,666E-06	2,96E-06
5	0,9419	8,724E-05	8,69E-05	5	0,9325	3,600E-09	2,30E-07	5	0,9325	3,600E-09	1,44E-07
6	0,9423	9,487E-05	9,45E-05	6	0,9305	4,244E-06	6,15E-06	6	0,9298	7,618E-06	5,38E-06
7	0,9427	1,028E-04	1,02E-04	7	0,9305	4,244E-06	6,15E-06	7	0,9300	6,554E-06	4,49E-06
8	0,9416	8,172E-05	8,14E-05	8	0,9304	4,666E-06	6,66E-06	8	0,9351	6,452E-06	8,88E-06
9	0,9198	1,628E-04	1,63E-04	9	0,9292	1,129E-05	1,43E-05	9	0,9335	8,836E-07	1,90E-06
10	0,9200	1,578E-04	1,58E-04	10	0,9256	4,844E-05	5,45E-05	10	0,9279	2,172E-05	1,78E-05
<b>Promedio</b>	0,9326			<b>Promedio</b>	0,9330			<b>Promedio</b>	0,9321		
<b>Σ</b>		8,820E-04	8,82E-04	<b>Σ</b>		6,671E-04	6,65E-04	<b>Σ</b>		5,411E-05	5,218E-05
<b>Σ SCT</b>	1,60E-03										
<b>SCF</b>	4E-09			1,76E-06				1,94E-06			
<b>Σ SCF</b>	3,70E-06										
<b>Σ SCR</b>	1,60E-03										
<b>Σ SCT comprobación</b>	1,60E-03										
<b>Promedio Total</b>	0,9326										



Se procede a calcular los grados de libertad  $gl$  con los cuales se debe referir al anexo A3 para conocer el límite  $F$  de aceptación o rechazo de la hipótesis nula, la que nos dice que:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

**Tabla 118**

**Grados de libertad**

Grados de libertad		
SCT	29	N°. de datos -1
SCF	2	N°. de tratamientos -1
SCR	27	$gl_{SCT} - gl_{SCF}$

Para calcular la variable  $F$  se procede a calcular el valor cuadrado medio  $CM$ :

$$CM = \frac{SC}{gl} \quad (41)$$

$$CMF = \frac{SCF}{gl} = \frac{3.7 \times 10^{-6}}{2} = 1.85 \times 10^{-6}$$

$$CMR = \frac{SCR}{gl} = \frac{1.6 \times 10^{-3}}{27} = 5.92 \times 10^{-5}$$

Por lo tanto:

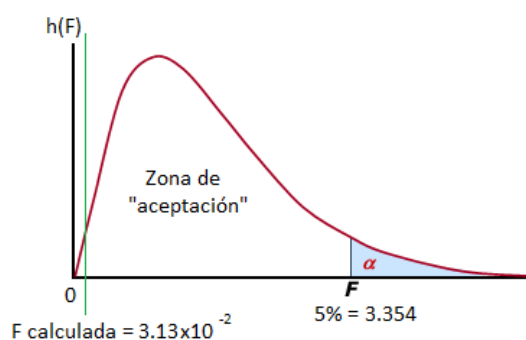
$$F \text{ calculada} = \frac{CMF}{CMR} \quad (42)$$

$$F \text{ calculada} = \frac{1.85 \times 10^{-6}}{5.92 \times 10^{-5}} = 3.13 \times 10^{-2}$$

Refiriéndose al anexo A3 usando los grados de libertad  $SCF$  y  $SCR$ , se obtiene el valor límite de aceptación:

$$F_{5\%} = 3.354$$

Por lo tanto se acepta la hipótesis nula.



**Figura 128 Distribución F**

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Se entregó el rugosímetro TALYSURF 5 totalmente operativo, funcional y modernizado con las siguientes características: capacidad para medir variables relacionadas con la rugosidad, observar el perfil real, de rugosidad y de ondulación, alta confiabilidad en medidas dentro de un rango de 0,0125  $\mu\text{m}$  hasta las 50  $\mu\text{m}$  realizadas con tres diferentes tipos de sensores, control de módulos desde una HMI, control de condiciones ambientales dentro de la zona de medición, calculo y presentación de 18 parámetros de rugosidad
- Se entregó al laboratorio beneficiario la siguiente documentación técnica: manual de operación y mantenimiento, diagramas de conexión eléctrica, diagramas de ruteo de pistas de tarjetas electrónicas realizadas, planos mecánicos de piezas manufacturadas y una guía de práctica para el estudiante.
- Se rehabilitó y modernizó con éxito el rugosímetro TALYSURF 5 del Laboratorio de Metrología de la Universidad, el cual representó un gran reto por falta de información técnica del equipo y sus aditamentos, obteniéndose resultados muy buenos que entregan una relación rendimiento-costos alta.
- Se realizó un estudio total de los módulos del rugosímetro TALYSURF 5 como: Columna, Bancada, Traverse Unit y Procesador, donde éste último presentó una calificación en su estado de operación de 1, equivalente a lo peor, por lo que se descartaron algunas de las tarjetas electrónicas con las que contaba el equipo debido a que se manejaban con tecnología electrónica obsoleta y menos precisa que la actual reemplazando casi todo su funcionamiento y control por una tarjeta Arduino Mega 2560.
- Se diseñó un controlador capaz de cumplir con los requerimientos de accionamiento de partes mecánicas móviles, procesamiento y muestreo de datos más eficiente y preciso.

- Se implementó una interfaz hombre – máquina (HMI), que hace mucho más amigable la interacción del usuario con el equipo y todas sus funciones, además brinda la alternativa de visualizar las gráficas del perfil real de la pieza medida, el perfil de rugosidad y el perfil de ondulación, de manera que se puede apreciar de mejor manera la diferencia entre dichos perfiles.
- Se comprobó el funcionamiento de todos los módulos del equipo obteniéndose resultados satisfactorios en el control desde la HMI.
- Se efectuó 30 mediciones de rugosidad al patrón de calibración del rugosímetro, donde mediante la curva normal presentó un nivel de confiabilidad de 98.23%, situando a éste instrumento de medición entre aquellos de confiabilidad elevada.
- El proyecto demuestra que es posible rehabilitar y modernizar equipos que datan de hace más de 30 años o en línea muerta, con soluciones prácticas y económicas las cuales abaratan el costo de mantenimiento y extienden la vida útil del equipo.
- Como punto adicional, se construyó una cabina de acrílico cuya función es conservar las condiciones ambientales al interior de la misma y evitar la excesiva presencia de partículas en la zona de medición, buscando garantizar una medida más exacta y evitar en lo posible el efecto de factores externos en la misma.
- El código de sensor a utilizar debe coincidir con el código de la tarjeta insertada en el procesador, de no ser así reemplazarla con su correspondiente.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Cuidar el equipo, sus módulos y aditamentos para que tengan una vida útil más larga, guardar los sensores y sus respectivas tarjetas en sus cajas después de haber utilizado el equipo.
- Aumentar la potencia del sistema de refrigeración para lograr la disminución de 1°C de temperatura dentro de la cabina de ambiente controlado en un tiempo menor al alcanzado en el presente proyecto.
- Plantear futuros proyectos de rehabilitación y modernización de equipos presentes en los laboratorios de la institución, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos por los estudiantes a lo largo de su formación académica, generando un beneficio mutuo.
- Incluir la materia de Metrología en la malla curricular de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica para beneficio de los estudiantes en cuanto a análisis de control de calidad empresarial.
- Mantener los módulos del equipo en buen estado, seguir el plan de mantenimiento entregado junto con el mismo o realizar un plan de mantenimiento propio del laboratorio, de manera que se extienda la vida útil del equipo el mayor tiempo posible y en las mejores condiciones para prestar un servicio de calidad a la comunidad politécnica.
- Es importante que el uso del equipo sea supervisado por una persona calificada para solventar cualquier inquietud del usuario.
- Como proyecto a futuro, implementar aditamentos automáticos para la medición de piezas cilíndricas, esféricas y de piezas con formas especiales y así extender el campo de medida del equipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- American National Standards Institute, Inc. (1987). *Surface Texture, ANSI B46.1*. Nueva York: American Society of Mechanical Engineers.
- American National Standards Institute, Inc. (1986). *Surface Integrity, ANSI 211.1*. Dearborn, Mich., Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers.
- Analog Devices. (2015). *Analog Devices, Inc.* Obtenido de [www.analog.com](http://www.analog.com)
- Arduino . (2015). *Arduino*. Obtenido de Arduino: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)
- ASME B46.1. (2009). *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Bellés, J. (2009). *Estudio comparativo entre una instalación de refrigeración por compresión y una instalación de refrigeración solar para la climatización en verano de una vivienda unifamiliar situada en Cnit (Tarragona)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Boles, M., & Cengel, Y. (2002). *Termodinámica (4ta ed.)*. McGrawHill.
- Campos, D. (2010). *Gambas Programación visual con Software Libre*.
- CONDAIR. (2015). *Catálogo de humidificadores por vapor*.
- Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (2000). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. México DF.: PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA. S.A.
- DONG YANG MODEL TECHNOLOGY CO. (2014). *Analog STD Servo*. Obtenido de GOTECK: <http://www.goteckrc.com/>
- Dpto. de Electrónica Automática e Informática Industrial. (2010). *Modelado de una célula de Peltier*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Floyd, T. (2007). *Principios de circuitos eléctricos (Octava ed.)*. México: Pearson Educación.
- FOG-SYSTEM. (2015). *Catálogo Humidificadores por atomización*.
- Gomáriz, S., Biel, D., Matas, J., & Reyes, M. (2001). *Teoría de control Diseño electrónico*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Groover, M. P. (2007). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA*. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.

- Hernández, I., & Ochoa, C. (2004). *Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar*. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- HOBSON, T. (2011). *Exploring Surface Texture*. England: Taylor Hobson Limited.
- HOBSON, T. (s.f.). *TALYSURF 5 SYSTEM OPERATOR'S HANDBOOK*. England: Rank Taylor Hobson.
- HOBSON, TAYLOR. (2015). *Catalogo de Productos*. Obtenido de Taylor Hobson: [www.taylorhobson.es](http://www.taylorhobson.es)
- Liu, T. (2015). *Aosong Electronics Co. Ltd.*. Obtenido de [www.aosong.com](http://www.aosong.com)
- Ministerio de Sanidad Ambiental y Salud Laboral. (2003). *Guía técnica para la prevención y control de la legionelosis en instalaciones*. Cataluña, España.
- Mitutoyo. (9 de Diciembre de 2015). *Mitutoyo México*. Obtenido de Descargas/Boletines: [www.Mitutoyo.com.mx](http://www.Mitutoyo.com.mx)
- Miyara, F. (2002). *Rectificación*. Rosario, Argentina.
- OEM. (2015). *Catálogo de productos OEM*.
- Perez, E. (2006). *Diseño de un sistema de aire acondicionado portátil termoeléctrico*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- TecMikro. (11 de Enero de 2016). *Componentes electromecánicos*. Obtenido de TecMikro: [www.tecmikro.com](http://www.tecmikro.com)
- The International Society of Automation. (7 de Diciembre de 2015). *Standards & Publications*. Obtenido de ISA: [www.isa.org](http://www.isa.org)
- Thermonamic. (16 de Noviembre de 2015). *Products*. Obtenido de Thermonamic: [www.thermonamic.com](http://www.thermonamic.com)
- Tocagón, A. (2015). *Diseño y construcción de un humidificador de obleas para el monasterio "Corazón de Jesús" sector Bellavista San Antonio de Ibarra*. Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte.
- UTFSM. (2003). *Servomotores*. Obtenido de Departamento de Electrónica de la Universidad Técnica Federico Santa María: <http://www2.elo.utfsm.cl/~mineducagv/docs/ListaDetalladadeModulos/servos.pdf>
- Van Rossum, G. (2009). *Guía de aprendizaje de Python*. BeOpen PythonLabs.

Yuan, Y. B., Vorburger, T. V., Song, J. F., & Renegar, T. B. (2000). A Simplified Realization for the Gaussian Filter in Surface Metrology. *Tenth International Colloquium on Surfaces* (pág. 133). Aachen: Shaker Verlag GmbH: M. Dietzsch, H. Trumpold, eds.