



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

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

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EQUIPO
PARA MEDICIÓN DE RESISTENCIA DIELECTRICA DE ACEITES DE
TRANSFORMADORES”**

**AUTOR: REVELO OJEDA, CHRISTIAN ALBERTO
REVELO OJEDA, DAVID MIGUEL**

DIRECTOR: ING. ECHEVERRÍA YÁNEZ, MARIO ENRIQUE

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE EQUIPO PARA LA MEDICION DE RESISTENCIA DIELECTRICA DE ACEITES DE TRANSFORMADORES*” fue realizado por los señores *Revelo Ojeda Christian Alberto, Revelo Ojeda David Miguel* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 7 de Septiembre del 2018

Ing. Mario Enrique Echeverría Yáñez

C. C.:1710433689



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Revelo Ojeda, Christian Alberto*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Diseño y Construcción de un prototipo de equipo para la medición de resistencia Dieléctrica de Aceites de Transformadores* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 7 de Septiembre del 2018

.....
Christian Revelo

C.C.:1708713357



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Revelo Ojeda, David Miguel*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Diseño y Construcción de un prototipo de equipo para la medición de resistencia Dieléctrica de Aceites de Transformadores* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 7 de Septiembre del 2018

.....
David Revelo

C.C.:1710917863



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

*Yo, Revelo Ojeda, Christian Alberto autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: Diseño y Construcción de un prototipo de equipo para la medición de resistencia Dieléctrica de Aceites de Transformadores en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.***

Sangolquí, 7 de Septiembre del 2018

.....
Christian Revelo

C.C.:1708713357



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

*Yo, Revelo Ojeda, David Miguel autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título: Diseño y Construcción de un prototipo de equipo para la medición de resistencia Dieléctrica de Aceites de Transformadores en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.***

Sangolquí, 7 de Septiembre del 2018

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Duro', is positioned above a dotted line.

.....
David Revelo

C.C.:1710917863



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DEDICATORIA

A mis padres,

ya que ellos me han dado

la vida, la comprensión, y

el apoyo tanto económico

como moral, siendo este

trabajo una manera de demostrar

que su esfuerzo

no ha sido en vano



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me ha dado la perseverancia para continuar día a día con la realización de mi tesis.

A mi familia, quienes nos han apoyado en todo sentido, para poder llegar a buen término del trabajo de Titulación.

A mi tutor Ing. Mario Enrique Echeverría quien supo darnos las pautas necesarias con sus conocimientos, entrega y apoyo incondicional en todo este tiempo de desarrollo del trabajo de titulación, logrando hacer que las cosas sean más sencillas.

A las Autoridades respectivas de mi departamento, que, pese a las dificultades de tiempos y percances suscitados, supieron brindar la comprensión y el apoyo necesario para continuar con el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
AUTORIZACIÓN	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
Generalidades	1
1. Introducción al Proyecto	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Justificación e Importancia	4
1.4 Objetivos del Estudio	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 Hipótesis del Estudio	6
1.5.1 Hipótesis General	6
1.5.2 Hipótesis Específicas	7
1.6 Marco de Referencia	7
1.6.1 Marco conceptual	7
1.6.2 Metodología de la Investigación	9
Marco Teórico	11
2.1 El transformador	11
2.1.1 Transformador Eléctrico	11
2.1.2 Componentes del Transformador	16
2.1.3 Sistema de Aislamiento en el Transformador	23
2.1.4 El Papel Aislante	28
2.1.5 Factores que deterioran el sistema de aislamiento	31
2.2 Diagnóstico al Transformador	38
2.2.1 Pruebas ASTM para aceites aislantes en Operación	39
2.2.2 Resistencia Dieléctrica Norma ASTM D877, D1816, VDE 370	48
2.2.3 Diagnóstico predictivo por cromatografía de gases	53

2.2.4	Análisis de furanos	55
2.3	Normativa vigente Ecuatoriana	56
2.4	Impacto Ambiental	64
2.4.1	El PCB	64
2.4.2	Historia.....	66
2.4.3	Impacto a la salud y Medioambiente.....	69
2.4.4	Gestión y tratamiento	71
Diseño Mecatrónico		73
3.1	Diseño de componentes mecánicos	73
3.1.1	Diseño de electrodos.....	73
3.1.2	Diseño recipiente contenedor muestra de aceite	77
3.1.3	Diseño de la Estructura	83
3.2	Diseño de componentes eléctricos y electrónicos.....	94
3.2.1	Circuito generador de alto voltaje.....	94
3.2.3	Circuito agitador de aceite	112
3.2.4	Circuito electrónico de mando y control del conjunto.....	114
3.3	Diseño de componentes del sistema de control.....	121
3.3.1	Control de accionamiento de test de prueba.....	121
3.3.2	Control agitador de aceite	124
3.3.3	Control del dimmer.....	124
3.4	Diseño del software	131
3.4.1	Programación del Controlador.....	131
3.4.2	Programación HMI en panel Delta Electronics	134
Implementación y Pruebas.....		136
4.1	Implementación.....	136
4.1.1	Implementación del proceso, equipo o máquina	136
4.1.2	Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos.....	144
4.1.3	Implementación del sistema de control.....	147
4.1.4	Programación del sistema de control.	149
4.2	Pruebas.....	151
4.2.1	Desarrollo del protocolo de pruebas.....	151
4.2.2	Pruebas y resultados de los componentes eléctricos y/o electrónicos.....	152
4.2.3	Pruebas y resultados del sistema de control.	153

4.2.4	Pruebas y resultados del sistema mecatrónico general.....	155
4.2.5	Costo del prototipo.....	162
4.3	Discusión de resultados.....	163
4.4	Conclusiones y recomendaciones.....	164
Anexos.....		167
A1: Manual de usuario.....		167
A2: Sentencias programación Controlador Principal.....		176
A3: Sentencias programación Controlador Secundario HMI.....		198
A4: Planos Mecánicos.....		210
A5: Diagrama eléctricos/electrónicos, instrumentación y control u otros necesarios, con formatos estandarizados.....		224
BIBLIOGRAFÍA.....		225

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i>	<i>Pruebas más importantes para aceites aislantes en operación.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2</i>	<i>Clasificación de los aceites según el Índice de Calidad.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3</i>	<i>Características para prueba de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816.50</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4</i>	<i>Toma de datos de voltajes de salida del dimmer según número de pasos del motor.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 5</i>	<i>Datos de curva suavizada de voltaje de salida según pasos del motor.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 6</i>	<i>Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite SAE 15W40.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 7</i>	<i>Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite Girasol..</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 8</i>	<i>Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite Refrigerador.....</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 9</i>	<i>Costeo del Prototipo.....</i>	<i>162</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i>	<i>Planteamiento del Problema.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 2:</i>	<i>Proceso genérico de desarrollo del producto.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3:</i>	<i>Transformador monofásico de tipo de núcleo.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4:</i>	<i>Transformador monofásico de tipo acorazado.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5:</i>	<i>Transformador trifásico.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6:</i>	<i>Componentes del Transformador sumergido en aceite.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7:</i>	<i>Pasatapas.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8:</i>	<i>Depósito de Expansión.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9:</i>	<i>Medidor de nivel de aceite tipo universal.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10:</i>	<i>Relé de Buchholz.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11:</i>	<i>Filtro de Silicagel.....</i>	<i>21</i>

Figura 12: Radiadores, ventiladores y bombas de circulación	23
Figura 13: Proceso de envejecimiento del papel aislante y su efecto en el papel kraft	30
Figura 14: Factores de oxidación del aceite mineral aislante	37
Figura 15: Curva de saturación de agua en el aceite mineral	45
Figura 16: Rosca Métrica	74
Figura 17: Electrodo Cara Plana 25mm.....	74
Figura 18: Electrodo Cara Plana vista lateral	75
Figura 19: Electrodo Cara Plana vista Superior.....	75
Figura 20: Electrodo Cara Semiesférica 36mm	76
Figura 21: Electrodo Cara Semiesférica vista lateral.....	76
Figura 22: Electrodo Cara Semiesférica Vista Superior	77
Figura 23: Diseño del Recipiente de aceite	78
Figura 24: Diseño Tapa del Recipiente de aceite	79
Figura 25: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista frontal	79
Figura 26: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista lateral.....	80
Figura 27: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista superior	81
Figura 28: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista frontal	81
Figura 29: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista lateral.....	82
Figura 30: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista superior.....	83
Figura 31: Ejemplo de Equipo de medición de Resistencia Dieléctrica Marca Amperis A-2.....	84
Figura 32: Ejemplo de Equipo de medición de Resistencia Dieléctrica Marca Baur	85
Figura 33: Esquema tapa lateral derecha e izquierda	86
Figura 34: Esquema dimensional tapa lateral derecha e izquierda	86
Figura 35: Esquema tapa inferior	87
Figura 36: Esquema tapa inferior chapa metálica desplegada	87
Figura 37: Esquema tapa inferior chapa metálica desplegada.....	88
Figura 38: Esquema tapa posterior	88
Figura 39: Esquema tapa posterior chapa metálica desplegada.....	89
Figura 40: Esquema tapa posterior chapa metálica desplegada.....	89
Figura 41: Esquema tapa frontal.....	90
Figura 42: Esquema tapa frontal chapa metálica desplegada	90
Figura 43: Esquema tapa frontal chapa metálica desplegada	91
Figura 44: Esquema Ensamble tapa superior.....	91
Figura 45: Esquema tapa superior chapa metálica desplegada.....	92
Figura 46: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista isométrica.....	92
Figura 47: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista frontal.....	93
Figura 48: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista superior	93
Figura 49: Distribución de Componentes del Equipo.....	94
Figura 50: Esquema Generador de alto voltaje.....	95
Figura 51: Circuito Eléctrico Generador de alto voltaje.....	95
Figura 52: Bobina Automotriz.....	96
Figura 53: Circuito detector de Chispa.....	97
Figura 54: Circuito Electrónico del Dimmer	98
Figura 55: Esquema del Circuito Electrónico del Dimmer.....	100
Figura 56: Malla 1 Circuito Dimmer	101

Figura 57: Malla 2 Circuito Dimmer	102
Figura 58: Características Eléctricas del DIAC DB3	103
Figura 59: Características Eléctricas del TRIAC BTB16	103
Figura 60: Pcb Circuito Electrónico del Dimmer	107
Figura 61: Circuito Electrónico del Dimmer en 3D	107
Figura 62: Curva Característica Original del Dimmer.....	109
Figura 63: Ingreso datos matlab para obtener función polinomial grado 5	110
Figura 64: Función Polinomial de grado 5	111
Figura 65: Curva Característica del Dimmer Suavizada	111
Figura 66: Circuito activación del agitador de aceite	112
Figura 67: Circuito control industrial del chispometro.....	113
Figura 68: Circuito de Potencia del chispometro.....	114
Figura 69: Circuito Controlador HMI.....	115
Figura 70: Circuito Controlador Principal	116
Figura 71: Circuito Elementos de Mando y Control	117
Figura 72: Circuito Elementos de Visualización	117
Figura 73: Circuito Test de Chispa.....	118
Figura 74: Placa PCB doble capa	118
Figura 75: Placa PCB Vista Superior 3D	119
Figura 76: Placa PCB Vista Posterior 3D.....	120
Figura 77: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301	121
Figura 78: Dimensiones del Sensor de Humedad y Temperatura AM2301	122
Figura 79: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301	122
Figura 80: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301	123
Figura 81: Rango de medición variable humedad	123
Figura 82: Rango de medición variable temperatura.....	124
Figura 83: Características del Motor a pasos 28BYJ-48	125
Figura 84: Dimensiones del Motor a pasos 28BYJ-48.....	126
Figura 85: Excitando 2 bobinas motor a pasos.....	127
Figura 86: Excitando 1 bobina motor a pasos	128
Figura 87: Excitando medios pasos al motor a pasos	128
Figura 88: Acople motor a potenciómetro vista isométrica.....	129
Figura 89: Acople motor a potenciómetro vista lateral	129
Figura 90: Acople motor a potenciómetro vista frontal.....	130
Figura 91: Acople motor a potenciómetro vista sección	130
Figura 92: Esquema Acople motor a potenciómetro	131
Figura 93: Pantalla principal.....	134
Figura 94: Pantalla de Proceso	135
Figura 95: Pantalla de Configuración	135
Figura 96: Dobles y corte en tapa frontal del equipo.....	136
Figura 97: Colocación tapa izquierda del equipo	137
Figura 98: Colocación tapa derecha del equipo.....	137
Figura 99: Soldadura de Tapas del equipo	137
Figura 100: Soldadura de Tapas del equipo	138
Figura 101: Soldadura de Tapas del equipo	138

Figura 102: Soldadura de Tapas del equipo	138
Figura 103: Colocación de elementos de mando y control.....	139
Figura 104: Colocación de elementos de mando y control.....	139
Figura 105: Colocación de sensor de humedad temperatura	139
Figura 106: Electrodo de semiesféricos de bronce.....	140
Figura 107: Electrodo de disco plano de bronce	140
Figura 108: Base conexión soporte electrodo	141
Figura 109: Aislante Base conexión soporte electrodo	141
Figura 110: Ensamble aislante con base conexión soporte electrodo	142
Figura 111: Brazo y aislante de conexión soporte electrodo vista frontal y lateral derecha	142
Figura 112: Punta cónica de conexión soporte electrodo.....	143
Figura 113: Ensamble de soportes porta electrodo de prueba.....	143
Figura 114: Pcb Dimmer Electrónico	144
Figura 115: Soldadura componentes Dimmer Electrónico.....	144
Figura 116: Dimmer Electrónico Empaquetado	145
Figura 117: Pcb Detector de chispa.....	145
Figura 118: Pcb Reinicio Sistema fin de carrera	146
Figura 119: Pcb Placa Control Chispometro Vista superior.....	146
Figura 120: Pcb Placa Control Chispometro Vista posterior.....	147
Figura 121: Base de conexiones	148
Figura 122: Armado de tablero del Sistema de Control	148
Figura 123: Tablero del Sistema de Control.....	149
Figura 124: Compilador de Controladores	150
Figura 125: Programador de Pantallas Táctil Delta Electronic	151
Figura 126: Pruebas de comunicación modulo Ethernet	152
Figura 127: Pruebas de funcionamiento del dimmer y motor a pasos.....	153
Figura 128: Pruebas de funcionamiento placa control chispometro.....	153
Figura 129: Funcionamiento sistema de control led Precondiciones Activado.....	154
Figura 130: Funcionamiento sistema de control led Start Activado.....	154
Figura 131: Funcionamiento sistema de control led Stop Activado	155
Figura 132: Conexionado interno sistema mecatrónico del equipo.....	156
Figura 133: Sistema mecatrónico del equipo.....	156
Figura 134: Configuración de Precondiciones Temperatura y Humedad desde HMI.....	157
Figura 135: Configuración de tipo de electrodo a utilizar	158
Figura 136: Activación del Agitador de Aceite	158
Figura 137: Activación Equipo botonera Manual Pulsador Start y Stop.....	159
Figura 138: Activación Equipo desde HMI.....	159

RESUMEN

Las empresas de generación eléctrica y las Industrias en general, utilizan a los transformadores de potencia húmedos, los cuales poseen en su interior aceite con características dieléctricas, el cual debe ser monitoreado a través de diferentes análisis establecidos como cromatografía de gases, análisis de furanos, pruebas físico - químicas, que ejecutadas en los respectivos planes de mantenimiento, permitan verificar las condiciones físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del transformador y de sus componentes internos, es así, que el presente proyecto, se encamino en el desarrollo de un prototipo de equipo denominado Chispometro, que permita medir a uno de los componentes básicos del transformador como es el aceite aislante, en el que es importante determinar cuál es el voltaje de ruptura para la cual el aceite dieléctrico pierde sus propiedades de aislante. Es así que la rigidez dieléctrica es uno de los factores críticos en la vida del transformador, ya que permite medir la capacidad que un aceite de transformadores tiene para resistir las sollicitaciones eléctricas que se permiten en servicio, por lo tanto, es necesario realizar ensayos de medición de la resistencia dieléctrica del aceite del transformador, para determinar las condiciones de uso para su reutilización o cambio. El chispometro diseñado permite alcanzar voltajes de ruptura de 60KV, el cual consta de una estructura rígida que contiene a los componentes eléctricos y electrónicos, y cuenta con elementos de mando y control y una pantalla HMI para la manipulación del operador que ejecute el testeado de una manera sencilla.

PALABRA CLAVE:

- **RIGIDEZ DIELECTRICA**
- **CHISPOMETROS**
- **TRANSFORMADOR**

ABSTRACT

Electric power companies and Industries in general, use the wet power transformers, which have oil with dielectric characteristics inside, which must be monitored through different established analyzes such as gas chromatography, furan analysis, physical - chemical tests, that executed in the respective maintenance plans, allow to verify the physical, chemical, electrical and mechanical conditions of the transformer and its internal components, it is thus, that the present project, is directed in the development of a prototype of equipment denominated dielectric testing equipment , that allows to measure to one of the basic components of the transformer as it is the insulating oil, in which it is important to determine which is the rupture voltage for which the dielectric oil loses its insulating properties. This is why dielectric strength is one of the critical factors in the life of the transformer, since it allows to measure the capacity that a transformer oil has to resist the electrical loads that are allowed in service, therefore, it is necessary to carry out tests of Measurement of the dielectric strength of the transformer oil, to determine the conditions of use for its reuse or change. The designed dielectric testing equipment allows to reach breaking voltages of 60KV, which consists of a rigid structure that contains the electrical and electronic components, and has control and control elements and an HMI screen for the manipulation of the operator that executes the testing of a simple way.

KEY WORDS:

- **DIELECTRIC STRENGTH**
- **DIELECTRIC TESTING EQUIPMENT**
- **TRANSFORMER**

Capítulo 1: Generalidades

1. Introducción al Proyecto

1.1 Definición del problema

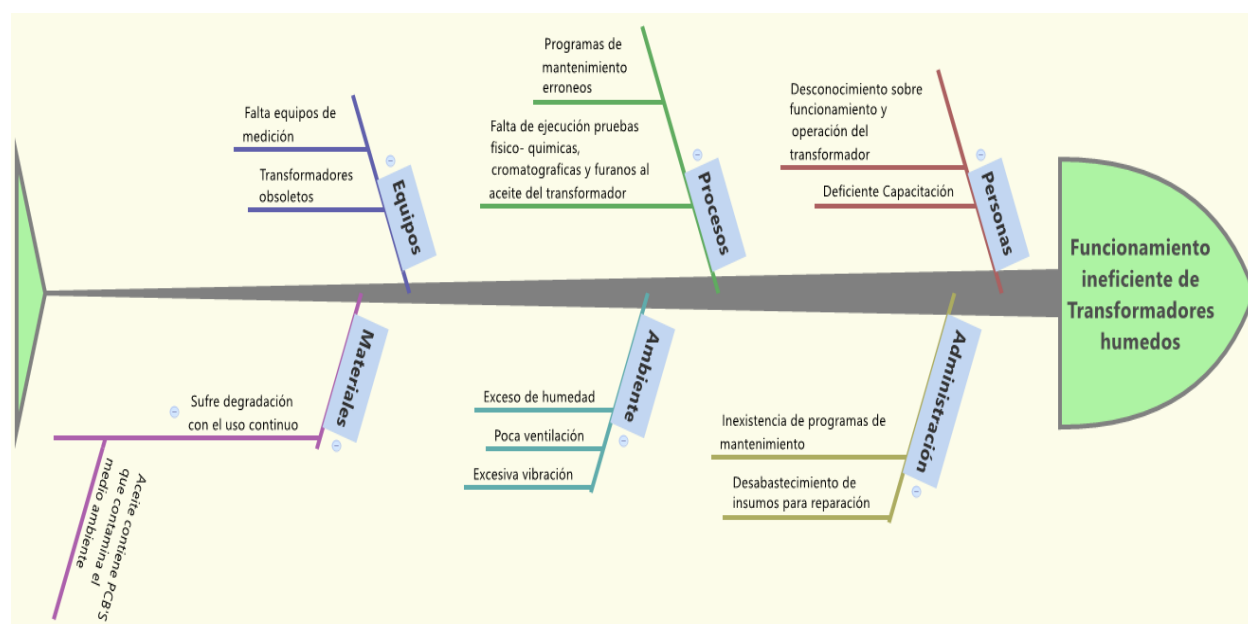


Figura 1: Planteamiento del Problema

1.2 Planteamiento del problema

El área del Mantenimiento es de primordial importancia en el ámbito de la ejecución de las operaciones de toda industria en la actividad productiva que ejecute, es así, que de un buen mantenimiento depende, no sólo un funcionamiento eficiente de las instalaciones, equipos, etc,

sino que, además, es preciso llevarlo a cabo con rigor para conseguir objetivos como el control del ciclo de vida de las instalaciones, equipos, procesos productivos, pasando de un mantenimiento correctivo cuya estrategia era la de reparar cuando se produzca la avería, que ya no sirve actualmente, para enfocarse a un mantenimiento preventivo, que busca mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno. Por ello las empresas industriales se plantearon llevar a cabo procesos de prevención de estas averías mediante un adecuado programa de mantenimiento.

Tradicionalmente se ha definido al transformador como una máquina estática y como tal, se piensa que no tiene partes en movimiento, lo cual es erróneo, pues es claro que el transformador es una máquina eléctrica, que se mueve 120 veces por segundo mientras esta energizada, y por tanto todos sus componentes están sometidos a altas vibraciones, que implican, que desde el diseño se debe concebir un equipo con un buen comportamiento mecánico, térmico, químico y eléctrico, pues son muchas las variables que entran en juego en su desempeño a través de su vida útil. Este desempeño unido a las características de los componentes del sistema total de aislamiento, el papel aislante o celulosa, y el fluido aislante, requieren un juicioso análisis con base en diagnósticos apropiados y en la continua revisión de las condiciones de operación del transformador por parte del personal técnico, en la actualidad, en países extranjeros, se cuenta con tecnologías que permiten evaluar dichos desempeños.

Las empresas de generación eléctrica y las Industrias en general, utilizan a los transformadores de potencia húmedos, los cuales poseen en su interior aceite con características dieléctricas, el cual debe ser monitoreado a través de diferentes análisis como cromatografía,

furanos, pruebas físico - químicas, que ejecutadas en sus respectivos planes de mantenimiento periódicos, permiten verificar las condiciones físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del transformador y de sus componentes internos.

Es así, que el funcionamiento ineficiente de los transformadores húmedos que se genere en la industria, debido a que los materiales de los cuales están constituidos los transformadores como es el aceite, el papel aislante del núcleo, se van degradado física y químicamente con el uso, haciendo que en el caso del aceite, que al contener PCB'S, es un alto contaminante para el ambiente y para las personas, el cual al convertirse en desecho, requiere un adecuado tratamiento para su recuperación; ocasionando que junto con el desconocimiento del personal en el manejo y operación adecuado de los transformadores, ha llevado a que no se ejecuten los procesos necesarios para efectuar las pruebas físicos químicas, cromatografías y furanos para el análisis y determinación de las condiciones operativas de los transformadores y la falta de tecnología local, que permita disponer de los equipos necesarios y adecuados para este fin.

Por lo que es importante determinar las condiciones operativas dieléctricas, térmicas, mecánicas y eléctricas en que se encuentre el transformador en cada aplicación que se le dé en la Industria, con el fin de garantizar su funcionamiento adecuado, maximizar su ciclo de vida útil y disminuir el impacto ambiental que se pueda producir, al desechar el aceite y otros componentes del transformador.

1.3 Justificación e Importancia

El presente proyecto busca encaminarse y alinearse dentro del cambio de la matriz productiva incentivado por el Gobierno Nacional, en los cuales se busca el desarrollo e implementación de tecnología propia para el País. Es así, que contar con un equipo que permita efectuar la medición de la rigidez dieléctrica de los aceites de los transformadores de potencia, es importante para la Industria y su actividad productiva.

El equipo construido para este objetivo, se lo consigue en países como España, China, Alemania, etc, por un costo aproximado de \$4000, por lo que este proyecto busca generar una tecnología similar con un valor monetario aproximadamente un 50% menos que las importadas y con iguales o mejores prestaciones de servicio y calidad.

Sabiendo que para tensiones media y alta superiores a 36 KV tanto para generación y distribución se requiere necesariamente de transformadores húmedos que utilicen aceite libre de PCB, tal como lo manda la normativa nacional vigente, se hace necesario la medición de la resistencia dieléctrica de los mismos y con ello, garantizar el óptimo funcionamiento de los transformadores, así como su vida útil.

En el país, según el inventario que presentan en un trabajo realizado por Coaldes (2003) sobre el inventario de PCB en el Ecuador, se observa que se tiene alrededor de 2'639891 litros de aceite de transformador en circulación que poseen PCB, y que cumpliendo con la normativa local vigente debe eliminarse su uso y almacenamiento, se hace necesario quedando en vigencia un

aproximado de 305598 transformadores, los mismos que requerirán dentro de sus programas de mantenimiento, determinar la resistencia dieléctrica de su aceite de manera periódica, maximizando su vida útil, logrando con esto evitar la contaminación del medio ambiente por el desecho anticipado del aceite antes de que haya cumplido su vida útil.

La rigidez dieléctrica permite medir la capacidad de un aceite de transformadores para resistir las sollicitaciones eléctricas que se permiten en servicio, es así, que es de importancia realizar ensayos de medición y determinación de la resistencia dieléctrica del aceite del transformador, para determinar las condiciones de uso para su reutilización o cambio.

Los sistemas de energía y los transformadores son equipos esenciales, por tanto, su fiabilidad y el funcionamiento seguro es importante para determinar sus condiciones de operación. Es así como, el empleo de medidores de rigidez dieléctrica o chispómetros es fundamental.

Es así, que nosotros, nos vamos a enfocar, en atacar a uno de los ramales de la espina de pescado causa efecto planteada, referente a los Equipos, en la cual buscamos solventar la falta de equipos de medición, al generar un equipo de medición de resistencia dieléctrica con el uso de tecnología nacional.

1.4 Objetivos del Estudio

1.4.1 Objetivo General.

Diseñar y construir un prototipo de un equipo de hasta 60 KV para la medición de resistencia dieléctrica de aceites de transformadores mediante la implementación de componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y software de control en un plazo de seis meses.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Estudiar los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos necesarios para la implementación del medidor de resistencia dieléctrica.
- Diseñar y construir la estructura mecánica de la máquina con su respectivo sistema de mando y control e interfaz humana – máquina (HMI) que permita al usuario el accionamiento del sistema.
- Testear el pulso eléctrico en KV para la prueba de rigidez dieléctrica incorporado en el equipo.
- Costear la construcción del prototipo

1.5 Hipótesis del Estudio

1.5.1 Hipótesis General.

El equipo construido permite la medición de la resistencia dieléctrica de aceites de transformadores, generando hasta un voltaje de 60 KV para la ejecución de las pruebas

respectivas en las muestras de aceite, permitiendo conocer las condiciones en que se encuentra el aceite del transformador, para garantizar su funcionamiento eficiente en la industria.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- Se implementó la estructura física del equipo, sus circuitos eléctricos y electrónicos adecuados para la medición de la resistencia dieléctrica del aceite de transformadores en base a la normativa vigente.
- La HMI implementada es adecuada y amigable con el usuario permitiendo el accionamiento del sistema.
- El pulso eléctrico incorporado en el equipo alcanza valores de KV.
- El costo de construcción del equipo es inferior a equipos similares de procedencia extranjera hasta en un 50%.

1.6 Marco de Referencia

1.6.1 Marco conceptual.

Rigidez Dieléctrica. - En un aceite aislante es el mínimo voltaje en el que un arco eléctrico ocurre entre dos electrodos metálicos. Indica la habilidad del aceite para soportar tensiones eléctricas sin falla. Una baja resistencia dieléctrica indica contaminación con agua, carbón u

otra materia extraña. Una alta resistencia dieléctrica es la mejor indicación de que el aceite no contiene contaminantes.

Los contaminantes que disminuyen la rigidez dieléctrica pueden usualmente ser removidos mediante un proceso de filtración (filtroprensa) o de centrifugación.

Transformador. - Un transformador es una máquina estática de corriente alterno, que permite variar alguna función de la corriente como el voltaje o la intensidad, manteniendo la frecuencia y la potencia, en el caso de un transformador ideal.

Pcb. - Sigla del inglés Printed Circuit Board, placa de circuito impreso. Es una tarjeta o placa utilizada para realizar el emplazamiento de los distintos elementos que conforman el circuito y las interconexiones eléctricas entre ellos.

Sistemas CAD. - Sigla del Diseño asistido por computadora, consiste en el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en segunda o tercera dimensión (2D o 3D). El software CAD puede ser especializado para usos y aplicaciones específicas.

Chispómetros. - Son equipos denominados medidores de rigidez dieléctrica

Dispositivos de mando y Control. - Es el dispositivo o grupo de dispositivos que sirve para gobernar, de alguna manera predeterminada, la energía eléctrica suministrada a los aparatos a los cuales está conectado.

1.6.2 Metodología de la Investigación.

Para alcanzar los objetivos planteados del proyecto se empleará la metodología de diseño y evaluación de productos planteada por Ulrich K. y Eppinger S. (2013), la cual está basada en las etapas que se representan en la figura 2.

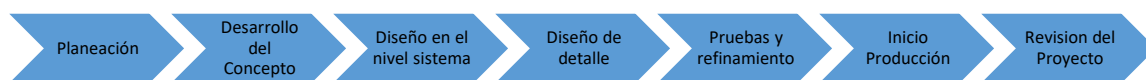


Figura 2: Proceso genérico de desarrollo del producto
Fuente: Ulrich K. y Eppinger S. (2013)

Este proceso genérico se puede reducir a 4 etapas como: Análisis, diseño, implementación y evaluación de tipo técnico.

En la primera etapa se analizará el estado de arte para el sistema, así como las normas establecidas, configuraciones, componentes y limitaciones de cada una, se escogerá la que mejor rendimiento y prestaciones ofrezca.

En la segunda etapa, la de diseño, se hará el respectivo dimensionamiento de todas las partes mecánicas, eléctricas y electrónicas que conformarán al sistema.

Una vez culminada la etapa de diseño, en la implementación, se ensamblarán los diferentes elementos que conforma el equipo, así como las diferentes instalaciones de los sistemas eléctricos, electrónicos y software.

Posteriormente, se realizarán pruebas de funcionamiento para poder evaluar el comportamiento del sistema en conjunto. Para finalizar se realizará la documentación de todo el proyecto realizado.

Capítulo 2:

Marco Teórico

2.1 El transformador

En el sector eléctrico, con el fin de transportar y distribuir la energía eléctrica se utilizan equipos que transforman tensiones y corrientes de entrada en otras de salida, de acuerdo a las necesidades, estos equipos se denominan transformadores eléctricos. Durante el funcionamiento de estos equipos se genera un aumento de temperatura, la misma que debe ser controlada por medio de un aislante, que generalmente es un aceite mineral.

2.1.1 Transformador Eléctrico

“Un transformador es un dispositivo que cambia potencia eléctrica alterna de un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna a otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético” (Chapman, 2012).

En su forma más simple, un transformador consiste en un núcleo de hierro dulce que lleva en dos regiones del mismo dos enrollados o devanados que constituyen los circuitos primario y secundario.

El núcleo consiste en una serie de placas de acero al silicio montadas en superposición, estas chapas de acero tienen un espesor variable, y se fabrican de acuerdo a estándares internacionales.

Los devanados están formados por la bobina primaria y secundaria, y en algunos casos por una tercera, los conductores generalmente son de cobre electrolítico aislados con esmalte y cubiertos con cintas de algodón o papel especial.

2.1.1.1 Principio de Funcionamiento

Los transformadores están constituidos por dos o más bobinas o devanados, que se encuentran aislados eléctricamente entre sí y son enrolladas generalmente en un mismo núcleo. El devanado primario se denomina a la bobina por donde entra la energía, y el secundario a la bobina por donde sale la energía.

El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario N_2 . El circuito magnético lo conforma un núcleo magnético de chapas de acero de silicio apiladas y aisladas entre sí, de esta manera disminuyen las pérdidas magnéticas en el transformador.

Al conectar una tensión V_1 en la bobina primaria genera un flujo magnético que induce en la bobina secundaria una fuerza electromotriz originando una tensión V_2 . Un transformador elevador es aquel que tiene la tensión baja en el bobinado primario y la tensión alta en el secundario,

siendo al contrario en un transformador reductor donde la bobina primaria tiene la tensión alta y la tensión baja en el secundario (Chapman, 2012).

2.1.1.2 Tipos de Transformadores

Los transformadores pueden ser clasificados de acuerdo al número de fases, uso y tipo de refrigerante.

❖ Por el número de fases: Monofásicos y Trifásicos

Transformadores monofásicos. - Está constituido de un núcleo de láminas de hierro y dos bobinados, denominados primario y secundario. Cuando los bobinados principal y secundario se encuentran en las ramas externas del núcleo se denomina transformador monofásico del tipo de núcleo, como se indica en la figura:

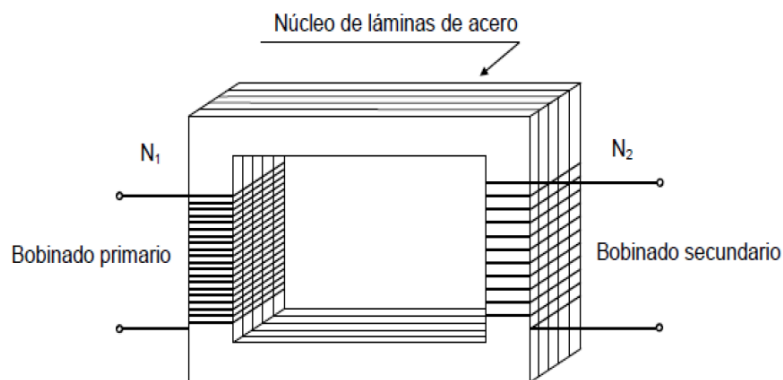


Figura 3: Transformador monofásico de tipo de núcleo
Fuente: (Pillaga, 2014)

y cuando los dos bobinados son colocados en la rama central del núcleo se denomina transformador monofásico tipo acorazado, como se indica en la figura:

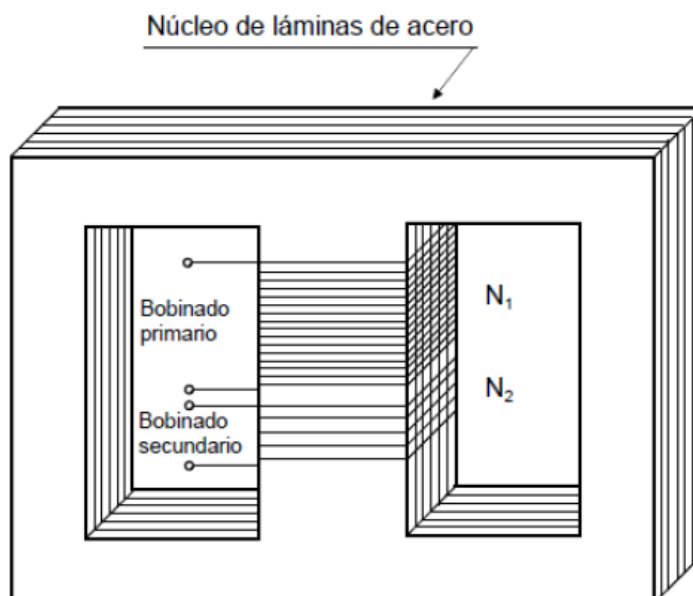


Figura 4: Transformador monofásico de tipo acorazado
Fuente: (Pillaga, 2014)

Transformadores trifásicos. - Se conforma de tres transformadores monofásicos, pudiendo unirse individualmente para constituir un “banco trifásico” o bien con el uso de un solo núcleo magnético y las bobinas necesarias para formar las tres fases, tal como se indica en la siguiente figura:

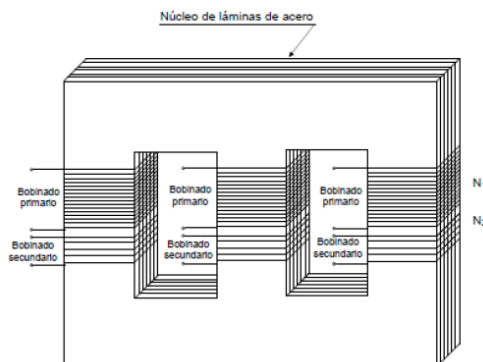


Figura 5: Transformador trifásico
Fuente: (Pillaga, 2014)

Presenta la ventaja de ser más ligero, pequeño, barato, y un poco más eficiente. (Chapman, 2012)

❖ Por su utilización: Potencia, distribución y medición.

Transformadores de potencia. - Se utilizan para subtransmisión y transmisión de energía eléctrica en alta y media tensión. Son de aplicación en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios (Pillaga, 2014).

Transformadores de distribución. - En cambio son empleados para cambiar la tensión primaria a un valor menor de tal manera que puedan ser empleados por los usuarios finales (granjas, residencias, centros comerciales, etc.) (Pillaga, 2014).

Transformadores de medición. - Son aquellos que permiten disminuir las magnitudes nominales a valores proporcionales menores a estas, en los que se pueda trabajar con instrumentos de medición o de protección de bajo alcance (Pillaga, 2014).

❖ Tipo de refrigerante: Secos y sumergidos en aceite dieléctricos

El calor generado en estas máquinas eléctricas debe ser evacuado al exterior, y se lo realiza a través de un medio adecuado denominado refrigerante.

Transformadores secos. - Los devanados de alta tensión están encapsulados en una masa de resina epoxi, estos tipos de transformadores son seguros ya que no propagan la llama y son auto extingüibles.

Transformadores embebidos en aceite. - Tienen su parte activa sumergida en una cuba que contiene aceite. Este aceite cumple la función de aislante y refrigerante, ya que transmite el calor

generado hacia el ambiente a través de la superficie externa de la cuba. En algunos tipos de transformadores el aceite es enfriado con agua por medio de un intercambiador de calor.

2.1.2 Componentes del Transformador¹

El transformador con cuba de aceite y depósito de expansión es el más utilizado en las estaciones y subestaciones transformadoras. En el transformador se incorporan una serie de elementos de control, protección, etc., que lo hacen práctico y seguro. Las partes constructivas que forman parte del transformador se indican en la siguiente figura:

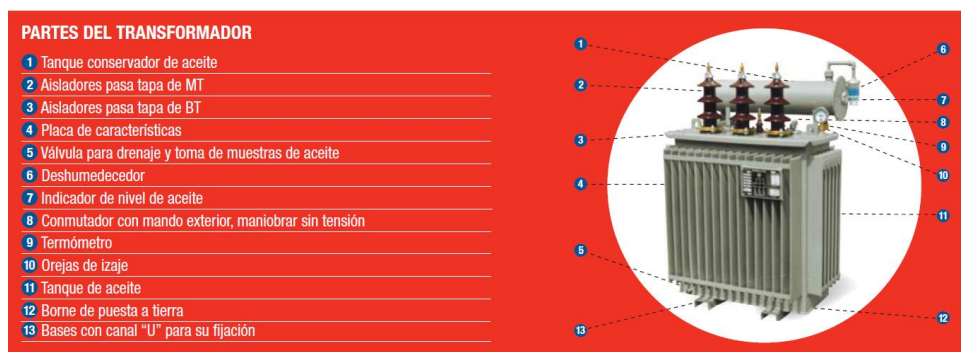
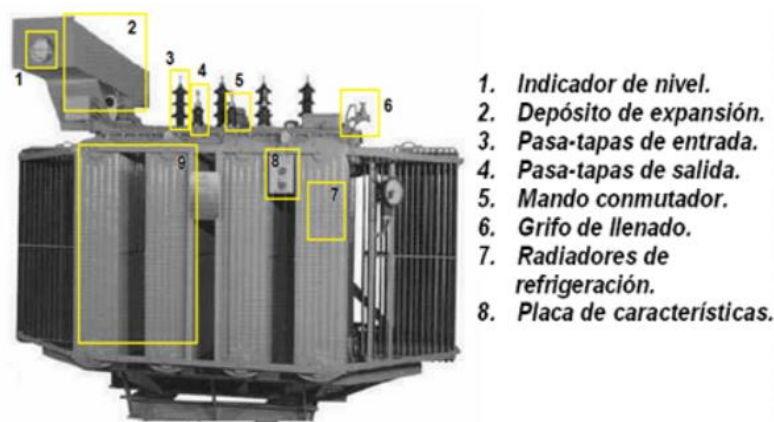


Figura 6: Componentes del Transformador sumergido en aceite
 Fuente: (Tosatado, 2008)

¹ (Tosatado, 2008)

Pasatapas: La función de los pasatapas en un transformador es la de llevar o transportar los conductores de los devanados a través del tanque y hacia el exterior de una manera segura. Los pasatapas están diseñados para soportar las tensiones de operación normal y anormal, mantener la humedad fuera del transformador y resistir los esfuerzos mecánicos debido al peso y tensión de los conductores conectados a ellos.

Para cumplir con lo anterior, existen diferentes tipos de pasatapas a utilizar, dependiendo del nivel de voltaje a utilizar, así tenemos los siguientes:

- Porcelana (hasta 25 KV)
- Porcelana-Aceite (25-69 KV)
- Porcelana-Compuesto epóxico
- Porcelana-Resina sintética (34.5-115KV)
- Porcelana-Papel impregnado de aceite (mayores a 275 KV)

Los pasatapas son de forma cilíndrica, cubiertos con un esmalte especial para evitar la adherencia de humedad y contaminantes, los mismos que se indican en la siguiente figura:



Figura 7: Pasatapas
Fuente: (Corona, 2016)

Están provistos de “faldas” con el objeto de aumentar la distancia de fuga (distancia entre el terminal del pasatapa y su base acoplada al tanque) y así reducir la posibilidad de un arco debido a sobre voltajes:

- Pasa-tapas de entrada: conectan el bobinado primario del transformador con la red eléctrica de entrada a la estación o subestación transformadora.
- Pasa-tapas de salida: conectan el bobinado secundario del transformador con la red eléctrica de salida a la estación o subestación transformadora.

Cuba o Tanque: Es un depósito que contiene el líquido refrigerante (aceite), y en el cual se sumergen los bobinados y el núcleo metálico del transformador. El tanque de un transformador, generalmente hecho de acero, desempeña las siguientes funciones:

- a) Provee protección mecánica al conjunto núcleo-bobinas.
- b) Ayuda a contener al líquido refrigerante/aislante, en el caso de que se lo utilice.
- c) Protege al aceite del aire, humedad y contaminación externa.
- d) Permite que el transformador “respire”.

Dentro de los tipos de tanques existentes y más comunes se encuentran los Tipo Respiración libre, los Tipo Tanque conservador y los Tipo Sellado.

Depósito de expansión: Sirve de cámara de expansión del aceite, ante las variaciones de volumen que sufre ésta debido a la temperatura, el cual se indica en la siguiente figura:



Figura 8: Depósito de Expansión
Fuente: (Promelsa, 2014)

Indicador del nivel de aceite: Permite observar desde el exterior el nivel de aceite del transformador, el mismo que indicamos en la siguiente figura:



Figura 9: Medidor de nivel de aceite tipo universal
Fuente: (Promelsa, 2014)

El indicador de nivel de aceite señala el nivel del líquido aislante contenido en el tanque principal del transformador o en compartimentos asociados.

Relé Buchholz: La protección que presta este dispositivo es simple y eficaz. El Relé Buchholz es empleado en transformadores que poseen tanque de conservación. Este relé de protección reacciona cuando ocurre una anomalía interna en el transformador, mandándole una señal de apertura a los dispositivos de protección.

El Relé Buchholz es un dispositivo que posee dos cámaras llenas de aceite con flotadores dispuestos verticalmente uno encima del otro, tal como se observa en la siguiente figura:



Figura 10: Relé de Buchholz
Fuente: (Promelsa, 2014)

Si existiesen corrientes parásitas, sobrecalentamiento o descargas parciales dentro del transformador, se producirán burbujas de gas, las cuales se dirigirán hacia el tanque de conservación. En su camino hacia dicho tanque, las burbujas de gas pasan por la tubería que conecta el tanque principal con el tanque de conservación, ingresando al Relé Buchholz y localizándose en la cámara superior del mismo.

A medida que la cantidad de gas aumenta en la cámara, el aceite es desplazado y por ende el nivel de aceite en el relé disminuye. Al ser desplazado el aceite, el flotador superior desciende hasta que se cierra el switch magnético que activa una alarma.

Desecador: Su misión es secar el aire que entra en el transformador como consecuencia de la disminución del nivel de aceite.

Durante el funcionamiento del transformador, el aceite aislante sufre variaciones en su volumen debido al cambio de temperatura. Esto produce la aspiración o expulsión de aire por el tanque de expansión, con la consiguiente humidificación del aceite y sus consecuencias negativas para el aislamiento.

El filtro de silicagel es un accesorio que llevan todos los transformadores que cuentan con tanque de expansión. Debe estar cargado con silicagel cuyo color no sea rosado, el filtro se puede observar en la siguiente figura:

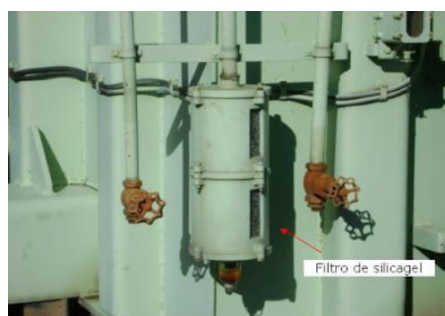


Figura 11: Filtro de Silicagel

Fuente: (Bruno, 2009)

Su función es la de asegurar que el aire que ingresa al interior de la máquina no contenga humedad, que es el principal agente que ataca al líquido refrigerante.

Termostato: Mide la temperatura interna del transformador y emite alarmas en caso de que ésta no sea la normal.

Regulador de tensión: Permite adaptar la tensión del transformador para adaptarla a las necesidades del consumo. Esta acción solo es posible si el bobinado secundario está preparado.

Placa de características: En ella se recogen las características más importantes del transformador, para que se pueda disponer de ellas en caso de que fuera necesaria conocerlas.

Grifo de llenado: Permite introducir líquido refrigerante en la cuba del transformador.

Radiadores, bombas y ventiladores de refrigeración: Su misión es disipar el calor que se pueda producir en las carcasas del transformador y evitar así que el aceite se caliente en exceso.

Los transformadores en aceite poseen diferentes métodos de ventilación con el objeto de mantener sus temperaturas de operación dentro de valores normales (no excediendo los 55 o 65°C sobre la temperatura ambiente). Para el efecto, en cada método utiliza accesorios como radiadores, ventiladores, intercambiadores de calor, bombas de circulación, etc, los cuales se encuentran instalados generalmente en el tanque del transformador y son usados de forma individual o en conjunto.

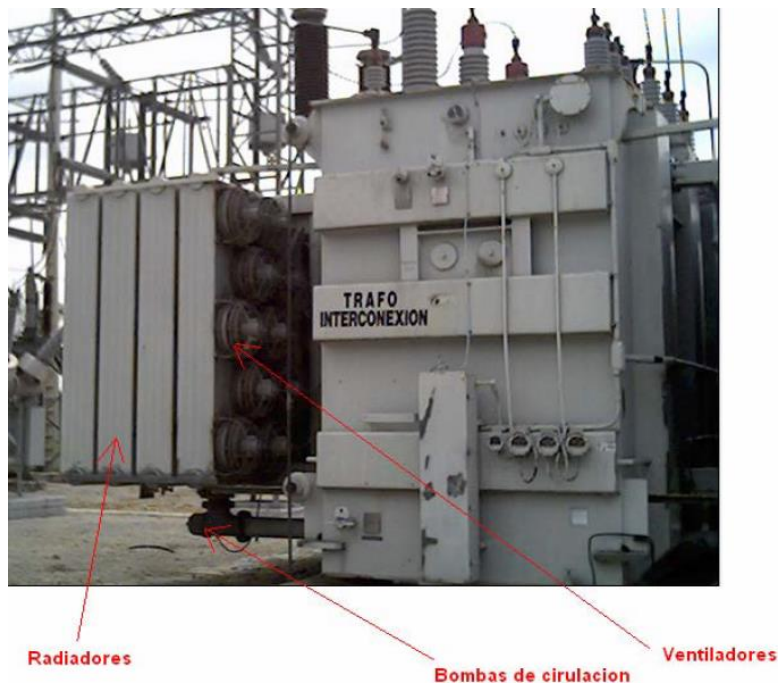


Figura 12: Radiadores, ventiladores y bombas de circulación
Fuente: (Bruno, 2009)

2.1.3 Sistema de Aislamiento en el Transformador

El sistema de aislamiento del transformador está compuesto de aislamiento líquido (Aceite mineral aislante), y aislamiento sólido (papel a base de celulosa obtenido mediante el proceso de kraft que es cocción al sulfato).

Se debe considerar la interacción dinámica entre los dos medios (Aceite aislante y el Papel Aislante) tanto en lo relacionado con la degradación química, la despolimerización del papel aislante y la poliesterización del aceite aislante, así también de manera opuesta con respecto al nocivo agente que es el agua presente en ambos componentes del aislamiento, que son, los que principalmente deben ser diagnosticados apropiadamente y que constituyen la base de los

diferentes procedimientos de mantenimiento preventivo que se pueden y deben ejecutar a un transformador seleccionando el procedimiento que sea el requerido para cada caso en particular.

Cada transformador tiene unas condiciones particulares de diseño, como régimen de carga, condiciones ambientales, condiciones de instalación, etc., que lo hacen único y, por tanto, las decisiones de mantenimiento no pueden ser genéricas, sino más bien específicas para cada caso.

Si se considera cada uno de los componentes de un transformador eléctrico inmerso en aceite mineral aislante que se han descrito anteriormente, es evidente que el componente más débil que tiene el transformador definitivamente es el papel aislante. Toda acción de mantenimiento debe por tanto estar enfocada en primer lugar, hacia garantizar la vida útil del componente vital más débil que posea el equipo, y en el caso del transformador pues es sin ninguna duda el papel aislante.

Analizando los diferentes componentes del transformador es fácil concluir lo anteriormente expuesto, así tenemos que:

- El hierro de la cuba, el cobre de los devanados y el hierro del núcleo, tiene larga vida y pueden ser reemplazados, pero a un alto costo.
- Los herrajes, los aisladores y los instrumentos, tienen también larga vida, pero se pueden reemplazar a un bajo costo relativo al valor del transformador.
- El aceite aislante, si está degradado, puede ser regenerado a un costo razonable.

- El papel aislante por su parte, una vez degradado (despolimerizado), es imposible revertir su degradación o proceso de deterioro estructural de su composición química. Y su reemplazo tiene un alto costo con respecto al costo de un transformador nuevo.

2.1.3.1 El Aceite Aislante de propiedades dieléctricas

Los aceites aislantes son fluidos con características y comportamientos específicos necesarios para impartir las propiedades aislantes y proteger los componentes del transformador durante su almacenamiento y funcionamiento, los cuales se pueden clasificar según su origen en:

- Aceites minerales o Hidrocarburos (Derivados del petróleo)
- Aceites minerales sintéticos y semisintéticos
- Aceites vegetales
- Aceites Siliconados

El aceite empleado en transformadores y algunos otros equipos eléctricos es del tipo mineral, dicho aceite se encuentra formado por compuestos de hidrocarburos y no-hidrocarburos. Por definición, los hidrocarburos son compuestos químicos que contienen solo hidrógeno y carbono.

Los compuestos de hidrocarburos son el mayor constituyente del aceite mineral y pueden ser divididos en tres grandes grupos: Parafínicos, Nafténicos, Compuestos aromáticos. Por otra parte, el petróleo, del cual se deriva el aceite usado en transformadores, también contiene compuestos que no son hidrocarburos, dichos compuestos presentan una estructura semejante a la

de los hidrocarburos, con la salvedad de que los átomos de carbono son reemplazados por uno, dos, tres o más átomos de azufre, oxígeno o nitrógeno. Los compuestos no-hidrocarburos en el aceite mineral pueden ser ácidos nafténicos, esterres, alcoholes, entre otros.

La gran mayoría de los transformadores eléctricos tienen como fluido aislante el aceite mineral de bases naturales por razones económicas, por desempeño dieléctrico y térmico fundamentalmente.

El aceite dieléctrico cumple múltiples funciones en los transformadores eléctricos, ya que mantiene el aislamiento entre componentes del transformador, homogenización de la temperatura interna, y refrigeración.

Es así, que podemos mencionar que el aceite dieléctrico en el transformador cumple tres funciones principales, tales como (Brettis, 2014):

- Refrigeración: El aceite cumple la función de enfriamiento y disipación del calor generado durante la operación del transformador. El aceite debe tener ciertas características importantes como: Estabilidad térmica y a la oxidación, buena fluidez y baja viscosidad cuidadosamente refinado para evitar la formación de lodos.
- Aislamiento: La función eléctrica del aceite en el transformador es prevenir la formación de arco entre dos conductores con una diferencia de potencial grande. Solamente con un aceite que esté esencialmente libre de contaminantes y que permanezca así a través de todo

el periodo de su vida de servicio pueden cumplirse totalmente los requisitos de aislamiento eléctrico. Para ser un excelente aislante el aceite debe tener baja viscosidad, buenas propiedades dieléctricas y buena capacidad de disipar el calor.

- Lubricación: El aceite debe formar una película para protección de las partes metálicas y de los otros componentes del transformador sin reaccionar con ellos. Esta película tiene que ser químicamente inerte y de característica apolar.

Debido a varios agentes y catalizadores que acompañan al aceite aislante dentro del transformador, se desarrolla un proceso químico de oxidación o acidificación. Estos agentes (hierro, cobre, celulosa, oxígeno, barnices, lacas, pinturas, agua, temperatura, sobretensiones eléctricas, sobrecargas, rayos solares, etc.) algunos se comportan como catalizadores y otros como aceleradores del proceso, contribuyendo al desarrollo de reacciones químicas en cadena (Martínez, 2010).

Estas reacciones químicas forman, en principio, distintos productos intermedios de oxidación, altamente contaminantes, siendo los alcoholes y aldehídos las primeras sustancias polares que aparecen, para a su vez entre ellos lateralmente generar cetonas y posteriormente en el proceso obtener ácidos orgánicos que también reaccionan entre sí, formando ésteres; éstos a su vez se activan y polimerizan aglomerándose para formar complejos moleculares de alto peso en forma de lodos, que se depositan en los intersticios de las fibras de la celulosa, los devanados, el núcleo y radiadores del transformador (Martínez, 2010).

El lodo formado, va a causar en el transformador los siguientes efectos:

- Disminuye el aislamiento
- El transformador pierde capacidad de sobrecarga
- Depósitos entre 1/8" y 1/4" de espesor, pueden aumentar la temperatura de operación del transformador entre 10 y 15 grados centígrados, causando la depotenciación del transformador.

2.1.4 El Papel Aislante

Los devanados y el núcleo están unidos en una estructura llamada “parte activa” (Brettis, 2014), la que hace referencia al conjunto formado por los dos circuitos eléctricos y el circuito magnético del transformador; este conjunto se encuentra inmovilizado dentro del tanque del transformador evitando que las vibraciones producidas durante el transporte lo afecten y también, que, en el caso de un cortocircuito, no se presenten.

El papel aislante es la parte más importante del sistema de aislamiento del transformador, ya que separa los devanados en la parte activa, si éste sufre degradación se reduce considerablemente la vida útil del transformador.

Es así que el papel Kraft (papel a base de celulosa) usado como aislamiento en un transformador debe desempeñar mayormente cuatro funciones:

- Resistencia eléctrica: Debe soportar los esfuerzos eléctricos producidos por los voltajes en condiciones normales y anormales (Altos voltajes incluidos esfuerzos de impulsos y transientes de sobre corriente y/o sobretensiones) durante la operación del transformador.
- Resistencia mecánica a la Tracción: Debe soportar adecuadamente los esfuerzos axiales originados en cortos circuitos.
- Resistencia térmica: Debe soportar los esfuerzos térmicos que acompañan a un cortocircuito, tener buena transferencia de calor para prevenir una acumulación excesiva de calor.
- Capacidad de mantener sus características deseables: Tener un periodo de vida útil de duración razonable, contando con un apropiado mantenimiento.

Los materiales de celulosa usados para el papel aislante son normalmente manufacturados de pulpas de madera mediante el proceso kraft. Este proceso consiste en la cocción de madera con una solución alcalina de sulfato de sodio e hidróxido de sodio, usando el primero como solución catalizadora de la cual el proceso toma su nombre. Se le denomina también procedimiento de cocción al sulfato.

La palabra kraft viene del alemán y significa fuerza, y así también se denominaba al papel de envolver, de color oscuro y de alta resistencia.

El papel kraft tiene cuatro características:

- Tiene una aceptable resistencia a la tracción mecánica con un buen comportamiento en el tiempo, gracias al proceso de cocción al sulfato.
- El papel kraft es extremadamente poroso, y por lo tanto se comporta como absorbente de los productos de degradación del aceite desde las etapas iniciales, constituyéndose en cierta forma en un regenerador de aceite.
- Tiene altísima afinidad con el agua, especialmente en la zona inferior de las bobinas donde se tienen las temperaturas más bajas, por lo tanto, en cierta forma el papel aislante dentro del transformador se comporta como un filtro prensado.
- El papel kraft se comporta como catalizador en el proceso de oxidación de los hidrocarburos del aceite aislante.

El proceso de envejecimiento del papel aislante se ilustra en la siguiente figura, no es razón suficiente para justificar la disciplina de efectuar diagnósticos periódicos al transformador:

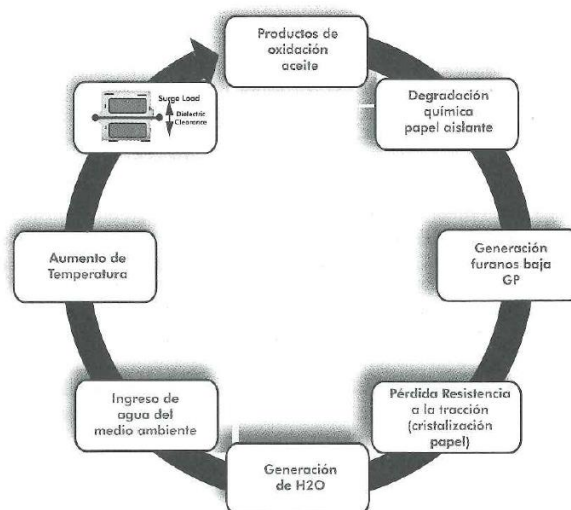


Figura 13: Proceso de envejecimiento del papel aislante y su efecto en el papel kraft
Fuente: (Martínez, 2010)

Por lo tanto, como lo menciona (Martínez, 2010):” La vida útil del transformador, es la vida útil del papel aislante.”

Es así, que dada la anterior premisa y puesto que la parte activa del transformador, bobinas y núcleo, incluido obviamente el papel, están inmersas en el aceite mineral aislante, es necesario, conocer la interrelación aislamiento líquido y aislamiento sólido en lo referente a los agentes que atacan a ambos medios, como son las degradaciones químicas respectivas y la presencia de agua en la medida en que afectan principalmente al papel aislante.

Por lo tanto, cualquier técnica de mantenimiento preventivo es acertada en la medida en que esté orientada primordialmente, hacia cuidar la vida del papel, y por lo tanto la del transformador.

2.1.5 Factores que deterioran el sistema de aislamiento²³

Principalmente, hay 2 agentes que inciden directamente en la reducción de la vida útil del papel, como son el agua y los productos de oxidación, los cuales afectan al papel, disminuyendo su resistencia mecánica a la tracción contaminando su estructura fibrosa, y afectando, por tanto, sus propiedades aislantes y dieléctricas.

Es así que un buen sistema de mantenimiento preventivo debe estar dirigido hacia extraer el agua y los productos de oxidación generados por el aceite dieléctrico y depositados

² (Forestieri, 2004)

³ (Martínez, 2010)

especialmente en el sistema de aislamiento sólido, impregnando los intersticios del tejido fibroso del que está constituido dicho papel.

Como le menciona (Asing, 2016), el transformador se deteriora como consecuencia de los cambios de carga, la temperatura del transformador, y la del aceite. Por ello varía el nivel del aceite en el depósito de expansión, saliendo y entrando aire. A pesar del silicagel, entra humedad y pasa al aceite.

Sólo unos veinte miligramos de agua por kilogramo de aceite, 20 ppm, pueden provocar la caída del cincuenta por ciento de la rigidez dieléctrica. Esto supone un evidente peligro para la seguridad de las personas y la instalación ya que es el aceite aislante el que soporta, casi él solo, el aislamiento a tierra.

Por otra parte, el aceite alcanza una temperatura lo suficientemente elevada como para reaccionar con el oxígeno que tiene disuelto. Los productos de descomposición son polares, a diferencia del aceite aislante que está formulado a base de compuestos apolares, y además se forman compuestos de polimerización que se depositan en el transformador (depósitos).

Los depósitos dificultan la refrigeración del transformador elevando su temperatura de funcionamiento. Esto produce una descomposición más rápida del aceite al elevarse la temperatura, algunos de los productos de descomposición del aceite son ácidos. Los compuestos polares contribuyen a aumentar las pérdidas dieléctricas del transformador, que como en el caso de los sedimentos, elevan la temperatura del aceite.

En forma general, el sistema de aislamiento de un transformador en aceite posee cuatro potenciales enemigos: la humedad, el calor, el oxígeno y la contaminación externa. La humedad y la contaminación externa están presentes desde el proceso de manufactura del equipo. Al oxígeno se lo deberá tener en cuenta cuando el transformador está con aceite y el calor se vuelve un factor a considerar durante la operación del equipo (Forestieri, 2004).

Es muy importante comprender el daño que causan éstos cuatro agentes al sistema de aislamiento de un transformador, de manera que una vez conocida la presencia de ellos con niveles superiores a los normales, se tomen las medidas necesarias para que dicho daño sea reducido al mínimo y se prolongue la vida útil del equipo.

El agua: Mucho más del 90% del agua se encuentra en el papel y solo menos del 10% se encuentra en el aceite, es por tanto inútil efectuar secamiento al aceite, salvo que se ejecute con el transformador energizado, donde se toma ventaja de la dinámica de intercambio de agua entre los medios en función de la temperatura, creando desequilibrio entre los dos contenidos de agua para lograr su migración desde el papel hacia el aceite.

El agua puede estar presente en el aceite de un transformador en las siguientes formas:

- a) De forma disuelta
- b) En forma de una emulsión agua/aceite
- c) En estado libre en el fondo del tanque

d) En forma de hielo en el fondo del tanque

Ya que el aislamiento sólido tiene mayor afinidad por el agua que el aceite, la distribución del agua en el transformador será desigual, es decir que en el aislamiento sólido habrá mucha más agua que en el aceite, como se indicó anteriormente.

La Humedad: La humedad especialmente en presencia del oxígeno es extremadamente peligrosa para el aislamiento de un transformador. Cada vez que la cantidad de humedad en el transformador aumenta el doble, la vida del aislamiento se reduce a la mitad.

La humedad puede ingresar al transformador cuando es construido, si el transformador es abierto para una inspección, la humedad puede ser absorbida de la atmósfera. La humedad también puede ingresar si existiese alguna fuga en el tanque o en las tuberías del sistema de ventilación. La presencia de empaques y sellos defectuosos es también una fuente de ingreso de humedad. La degradación del aislamiento del transformador debido al envejecimiento es otra fuente de generación de humedad.

El efecto de la humedad en las propiedades aislantes del aceite depende de la forma en que ésta exista. Una pequeña cantidad de agua en forma de emulsión agua/aceite tiene una marcada influencia al reducir la rigidez dieléctrica del aceite.

La cantidad de humedad que puede estar disuelta en el aceite se incrementa rápidamente con la temperatura, es decir, a medida que la temperatura del aceite se eleva, la cantidad de humedad que puede ser disuelta en él también se incrementa.

Es crítico para el alargamiento de la vida útil de un transformador mantenerlo lo más seco y libre de oxígeno como sea posible, ya que la humedad y el oxígeno causan una degradación más rápida del aislamiento sólido, dando como resultado la formación de ácidos, lodo y más humedad.

El Oxígeno: El oxígeno es otro de los potenciales enemigos del aislamiento de un transformador, ya que éste reacciona con el aceite para formar ácidos orgánicos, agua y lodo. El oxígeno proviene de la atmósfera o es liberado por la celulosa como resultado de aplicarle calor, además no es posible eliminar todo el oxígeno existente en un transformador inclusive si el llenado del mismo se lo realiza con vacío. Se dice que un aceite dieléctrico se encuentra deteriorado si presenta oxidación.

De acuerdo a la “American Society for Testing and Materials” la oxidación del aceite comienza cuando el oxígeno presente en el transformador se combina con las impurezas de hidrocarburos inestables existentes en el aceite bajo el efecto catalítico de los otros materiales presentes en el transformador.

Dentro de los catalizadores tenemos a la humedad y al cobre; dentro de los aceleradores tenemos al calor, la vibración, los sobre voltajes y a los elevados esfuerzos eléctricos debidos a fallas eléctricas internas. Es necesario recalcar que la oxidación del aceite se debe a la oxidación de las impurezas contenidas en él, mas no a la oxidación de los hidrocarburos puros. La etapa final

de la oxidación es la formación de lodos en el interior del transformador, es decir, la presencia de lodo en un transformador es una muestra de que el proceso de oxidación lleva mucho tiempo existiendo.

El lodo proviene del ataque de ácidos al hierro, cobre, barniz, pintura, etc, del transformador y los residuos de dicho ataque se combinan y forman soluciones, el lodo se precipita de éstas soluciones.

El lodo se adhiere al aislamiento, a las paredes del tanque, a los ductos de ventilación, etc. Depósitos de 1/8" a 1/4" en el núcleo y devanados pueden incrementar la temperatura de operación de 10 a 15°C.

Se sabe ahora que la oxidación deteriora el aceite, pero también la oxidación del aceite provoca efectos sobre el papel aislante, ya que la oxidación ataca a las moléculas del papel en uno o más de sus enlaces, el resultado de éste cambio químico es la formación de contaminantes polares y agua. La oxidación le resta al papel rigidez mecánica, dureza, capacidad de encorvarse y dilatarse, capacidad de resistir shocks de carga y, por último, como resultado de la oxidación se generan productos volátiles que se evaporan y decrecen el espesor o volumen del papel.

Productos de Oxidación: Se depositan en bobinas, núcleos, radiadores y lógicamente de manera especial en las capas internas de los devanados y por tanto en los intersticios de las fibras de la celulosa afectando la vida útil del papel, desmejorando sus propiedades mecánicas y dieléctricas. Los factores de oxidación del aceite mineral aislante, se esquematizan en la siguiente figura:

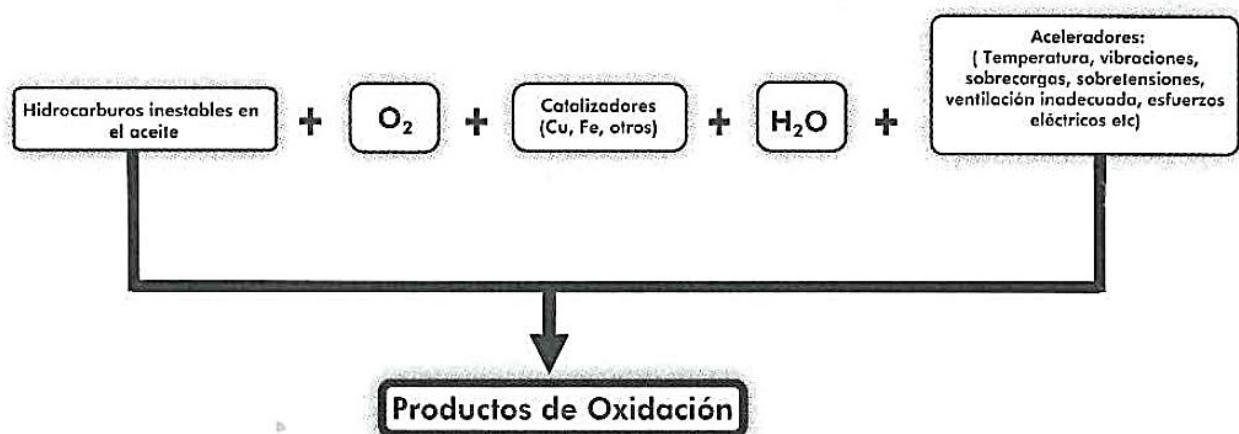


Figura 14: Factores de oxidación del aceite mineral aislante
Fuente: (Martínez, 2010)

El Calor: Se sabe que el 90% del deterioro de la celulosa es de origen térmico. La degradación térmica del aislamiento es función del tiempo, de la temperatura y de cuan seco está el aislamiento. Las elevadas temperaturas causan un envejecimiento acelerado de la celulosa empleada como aislamiento, reduciéndose la rigidez mecánica y eléctrica de la misma, produciéndose la despolimerización o destrucción del papel; otros efectos debidos a las elevadas temperaturas son la generación de agua, materiales ácidos y gases (CO₂, CO).

Existen evidencias que muestran que, si se sobrecarga un transformador con temperaturas superiores a los 140°C en el punto más caliente, se formaran burbujas de gas, las mismas que disminuyen la rigidez dieléctrica del aislamiento.

Las elevadas temperaturas también reducen la capacidad de la celulosa a ser tensionada, además, como se dijo anteriormente al aumentar la temperatura la tasa de oxidación del aislamiento se incrementa y la cantidad de humedad que puede absorber el aceite también se incrementa.

La Contaminación Externa: Los contaminantes externos pueden presentarse en forma de “casha”, provenientes del proceso de manufactura del transformador y que no han sido propiamente eliminados en el proceso de llenado del transformador con aceite.

Partículas diminutas pueden desprenderse de la celulosa cuando el transformador está en servicio. Otro contaminante es el policlorhidrato de bifenilo, el cual reduce la capacidad del aceite de soportar sobre voltajes (Forestieri, 2004).

Por lo tanto, es recomendable que antes de iniciar cualquier acción de mantenimiento en campo a un transformador se conozca el estado dieléctrico y físico químico del aceite aislante en operación mediante diagnósticos apropiados con base en resultados de laboratorio que cuenten con el respaldo de una acreditación por un ente autorizado, para determinar las condiciones operativas del aceite, del papel aislante y su condición como consecuencia de la presencia de los agentes adversos antes mencionados, con el fin de llevar el equipo a su máximo nivel de confiabilidad posible, técnica y económica.

2.2 Diagnóstico al Transformador

El diagnóstico periódico es una disciplina que garantiza confiabilidad y beneficio económico, ésta debe ser integral, al aceite, al papel aislante y al transformador en su conjunto. Actualmente se puede contar con las siguientes opciones:

- Pruebas ASTM degradación (ADFQ): Permiten determinar el porcentaje de agua en el papel, y el grado de impregnación de productos polares, ácidos y lodos en el papel.
- Pruebas de envejecimiento: CO, CO₂ furanos, grado de polimerización
- Pruebas eléctricas de campo (PEC): Permiten evaluar la calidad de los aislamientos y el comportamiento eléctrico del transformador.
- Cromatografía de gases: Permite diagnóstico predictivo de fallas internas en el transformador.
- Técnicas complementarias: Barrido de frecuencia, emisiones acústicas, vibraciones, ultrasonido.
- Inspecciones oculares, termografía.

2.2.1 Pruebas ASTM para aceites aislantes en Operación ⁴

La norma ASTM D-117 (5) indican 33 propiedades de los aceites aislantes minerales con base en hidrocarburos, y 55 métodos de prueba; pero en base a la experiencia de muchas empresas dedicadas al mantenimiento de transformadores inmersos en aceites, en la práctica, se priorizan en ejecutar 6 de los 55 métodos de pruebas, para medir la degradación y contaminación de los aceites.

Es así, que con relación a las 6 pruebas que se indican en la siguiente tabla, éstas establecen unos criterios prácticos con base en la experiencia para tomar decisiones acertadas desde el punto

⁴ (Martínez, 2010)

de vista de la necesidad de efectuar el mantenimiento preventivo que exactamente necesita el transformador.

Tabla 1

Pruebas más importantes para aceites aislantes en operación

Método de prueba ASTM	Parámetro de evaluación	Criterio para evaluar condición
1. Rigidez dieléctrica D-877 (Kv)	Acceptable ≥ 30 Cuestionable = 25-30 Inaceptable < 25	Contaminantes, conductores, impurezas, agua
2. Número de Neutralización	Acceptable ≤ 0.05 Cuestionable = 0.06 – 0.1 Inaceptable > 0.10	Ácidos presentes lodos
3. Tensión Interfacial D-971 (dinas/cm)	Acceptable ≥ 32 Cuestionable = 28 – 31.9 Inaceptable < 27.9	Compuestos hidrofílicos o contaminantes polares ácidos
4. Color D-1500A	Acceptable ≤ 3.5 Inaceptable > 3.5	Un marcado cambio en un año indica anomalía
5. Contenido de agua D-1533 (ppm)	Acceptable < 30 Cuestionable = 30 – 34.9 Inaceptable ≥ 35	Indica contenido total de agua en el aceite
6. Gravedad específica D-1293	Acceptable = 0.84 – 0.91 Cuestionable < 0.84 Inaceptable > 0.91	Se requiere para ajustar el valor leído de tensión interfacial. Indicativo del tipo de aceite nafténico o parafínico. También como un primer indicador de presencia de PCBs.

Fuente: (Martínez, 2010)

Estas pruebas son útiles como monitoras para aceites en operación, con una ventaja muy grande, que permiten determinar el porcentaje de agua en el papel, y el estado de degradación del aceite, estimando por tanto el grado de impregnación de productos ácidos también en el papel aislante, siendo la parte crítica del transformador.

Resistencia Dieléctrica

La rigidez dieléctrica es la capacidad de un aceite de soportar tensión eléctrica sin fallar. Para efectuar la prueba de medición de resistencia dieléctrica, se la debe realizar según los

procedimientos establecidos por las normas ASTM y VDE. La norma ASTM tiene establecida dos métodos, la D-877 y la D-1816.

- ASTM D-877, utiliza electrodos de disco de caras planas, sin agitador, rampa 3000 V/s, distancia 2.54 mm
- ASTM D-1816, utiliza electrodos semiesféricos, requiere agitación, rampa 500 V/s, distancia de electrodos 2.03 mm o 1.02mm.

Número de Neutralización Norma ASTM D-974

El número de neutralización se define como el peso en miligramos de KOH (base), que se requiere para neutralizar el ácido de un grano de muestra de aceite (mgKOH/g).

El aceite en operación dentro de un transformador, sufre un proceso de degradación química que se va desarrollando por efecto del trabajo, la temperatura y las tensiones eléctricas a que es sometido.

Esta degradación química es sensiblemente acelerada si hay presencia de agua, oxígeno y de otros catalizadores como el hierro, cobre, la celulosa, etc.

El aceite aislante sufre un proceso de degradación que es importante monitorear periódicamente, y el número de neutralización es una prueba fundamental para lograr este objetivo.

El comportamiento de este parámetro depende de gran parte del contenido de inhibidores, naturales (compuestos aromáticos) y sintéticos, y por lo tanto tiene un comportamiento de pendiente muy plana en los primeros años de trabajo del aceite dentro del transformador, y es precisamente durante el periodo de inducción, razón por la cual se hace indispensable acompañar ésta prueba, con la prueba de la tensión interfacial.

Tensión Interfacial Norma ASTM D-971

Es la fuerza necesaria para separar un anillo plano de platino – iridio de la superficie de un fluido de mayor tensión superficial, se mide en dinas/cm.

Cuando en el aceite dieléctrico, que es una sustancia apolar se encuentran disueltos productos polares, el aceite aumenta su afinidad con el agua que también es una sustancia polar, y la solubilidad de un aceite en el agua va a aumentar cuando crece la presencia de dichas sustancias polares. Este fenómeno se puede medir mediante la prueba de tensión interfacial, que permite medir la afinidad del aceite con el agua debido a la presencia de sustancias polares.

La tensión interfacial es una prueba muy sensible a la aparición de los primeros compuestos hidrofílicos o contaminantes polares solubles, productos del proceso de oxidación que se está desarrollando en el aceite y compuestos ácidos pesados que se generan en etapas avanzadas de degradación.

Dichos compuestos hidrofílicos y ácidos tienen afinidad con el agua, el aceite y por tanto su presencia hace bajar la tensión interfacial desde las reacciones iniciales, por lo que ésta prueba es el complemento indispensable para la prueba del número de neutralización.

También es útil para detectar la presencia de productos intermedios de oxidación tales como alcoholes y aldehídos, los cuales no se detectan con la prueba del número de neutralización. Por lo tanto, mediante la prueba de tensión interfacial, se puede detectar el inicio del proceso de oxidación y su avance antes de llegar a niveles de degradación críticos. Además, permite obtener el Índice de Calidad, criterio que es muy útil para la toma de decisiones de mantenimiento.

Índice de Calidad (IC): Es la relación entre la tensión interfacial (TIF) y el número de neutralización (NN), se lo conoce como el Índice de Myers, siendo el valor absoluto del índice de calidad el más alto posible.

- Condición Buena (TIF = 40, NN = 0.01, $IC=40/0.01=4000$)
- Condición Mala (TIF = 20, NN = 0.2, $IC=20/0.2=100$)

El índice de calidad es una relación importante para clasificar los aceites en operación, determinar la necesidad del mantenimiento, para realizar la limpieza del papel de productos polares, ácidos del aceite y lodos impregnados en él, y también establecer la severidad del proceso que debe aplicarse, como se describe en la siguiente tabla:

Tabla 2
Clasificación de los aceites según el Índice de Calidad

Valores de NN - TIF	Color	Índice de Calidad	Calificación
1. NN 0.00 a 0.10 TIF 30.0 a 45.0	Amarillo claro	300 a 1500 o más	Aceite Bueno
2. NN 0.05 a 0.10 TIF 27.0 a 29.0	Amarillo	271 a 600	Aceite a ser tenido en observación
3. NN 0.11 a 0.15 TIF 24.0 a 27.0	Amarillo oscuro	160 a 318	Aceite marginal
4. NN 0.16 a 0.40 TIF 18 a 23.9	Ámbar	45 a 159	Aceite Malo
5. NN 0.41 a 0.65 TIF 14.0 a 17.9	Café	2 a 44	Aceite muy malo
6. NN 0.66 a 1.50 TIF 9.0 a 13.9	Café oscuro	6 a 21	Aceite extremadamente malo
7. NN > 1.51 TIF < 9	Más negro		Aceite en condición pésima

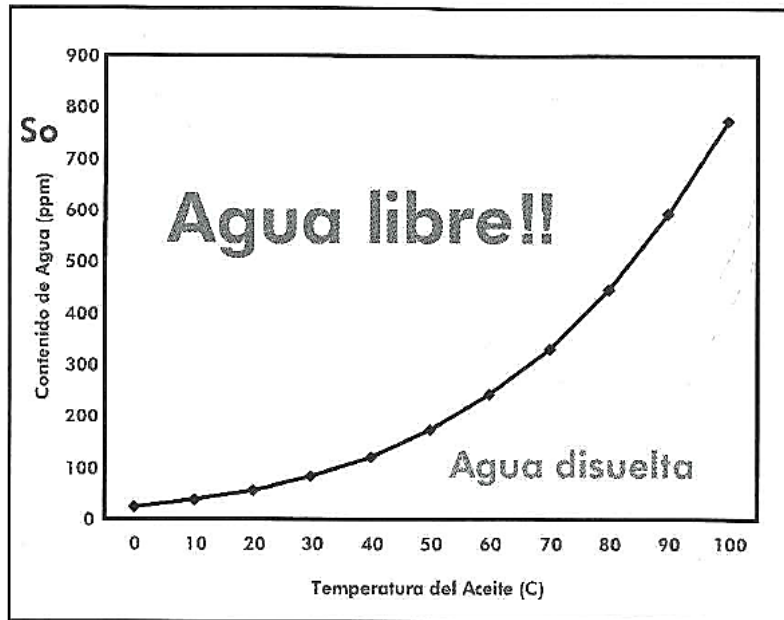
Fuente: (Martínez, 2010)

Color Norma ASTM D-1500

Consiste en clasificar el color del aceite – muestra de acuerdo a los patrones de la ASTM mediante la comparación de colores. Es una ayuda muy importante sobre todo cuando se observan cambios significativos en el término de un año o menos; sin embargo, el color por sí solo, no corresponde en todos los casos a un determinado nivel de degradación del aceite.

Contenido de agua Norma ASTM D-1533

El agua en el aceite se ajusta al comportamiento de la curva que se indica en la siguiente figura, en la cual, con ésta curva se puede calcular el porcentaje de saturación de agua en el aceite y por tanto establecer el margen de seguridad en relación con la formación de agua libre en caso de enfriamiento del aceite.



$$\text{Log } S_o = -1567/K + 7.0895$$

Figura 15: Curva de saturación de agua en el aceite mineral

Fuente: (Martínez, 2010)

El agua tiene las siguientes características que afectan al aislamiento:

- Es el solvente universal
- Está presente siempre en los aislamientos
- Es fuertemente electropositiva
- Aumenta su conductividad en presencia de sales y ácidos
- Actúa directamente en el proceso de oxidación
- Tiene gran afinidad con el papel aislante, y poca con el aceite
- Los productos de oxidación tienen gran poder de adsorción de agua
- El agua y sustancias polares ácidas inducen a la ionización bajo esfuerzo eléctrico
- Reduce la resistencia dieléctrica
- El agua libre va al fondo del transformador

Agua en forma Libre: Sobresaturada, pero en alta concentración suficiente para formar gotículas y separada totalmente del aceite. En esta condición baja sensiblemente la resistencia dieléctrica y transfiere humedad a la celulosa.

Agua en emulsión: Interactúa más fácilmente con los productos de oxidación con preferencia en las partes más frías del transformador. Afecta de manera directa a la rigidez dieléctrica.

Agua disuelta o en suspensión: Unida por el hidrogeno a las moléculas de hidrocarburos del aceite, puede o no afectar a la resistencia dieléctrica, pero acelera la formación de compuestos polares que van a intervenir en la oxidación del aceite.

La Solubilidad (S_o): Es la cantidad total de agua en ppm que puede disolver un aceite a determinada temperatura.

Saturación Relativa (R_s): La cantidad de agua actual (ppm) medida en el aceite con relación a la saturación (S_o) a una temperatura dada.

Dado lo anterior se debe tener en cuenta que:

- La R_s se relaciona más con la rigidez dieléctrica.
- El agua está continuamente migrando del aceite al papel y viceversa, dependiendo de las variaciones de temperatura, dinámica que se utiliza para secamiento en caliente.

- A bajos contenidos de agua (<20 ppm) la R_s (ppm/ S_o) se mantiene casi constante, al subir la temperatura, aumenta las ppm en el aceite, pero también sube S_o .
- Para mantener una relativa buena rigidez es necesario que R_s se mantenga por debajo del 50% a cualquier temperatura.
- La IEEE recomienda que las muestras sean tomadas cuando las cargas y las temperaturas han estado relativamente constantes por 48 horas para que el contenido de agua esté cerca al equilibrio.

Es por tanto claro que el estado del agua en el transformador varía con la temperatura de operación de la unidad, debido a la termodinámica que se desarrolla permanentemente dentro del equipo.

- Si la Temperatura sube, el sistema transfiere agua del papel hacia el aceite
- Si la Temperatura baja, el sistema transfiere agua del aceite al papel
- Condición de equilibrio, cuando la presión de vapor de agua es igual en el papel y el aceite, y por tanto no hay transferencia de agua.

Gravedad específica Norma ASTM D-1298

Es la razón entre la masa de un volumen dado de aceite y la masa de agua para ese mismo volumen. Es un examen rápido para detectar la presencia de contaminantes; se requiere tener la medición de la gravedad específica para corregir el valor de la tensión interfacial.

También permite determinar el origen del aceite (nafténico o parafínico), ya que un aceite de base parafínica tiene una gravedad específica de por debajo de 0.84, de igual manera una medida cercana a 1.0 indica la posible presencia de ascarel (PCBs).

Las seis pruebas mencionadas anteriormente (rigidez dieléctrica, contenido de agua, número de neutralización, tensión interfacial, gravedad específica y color), según consenso internacional, constituyen el grupo de pruebas ASTM de degradación, y la principal ventaja que ofrecen, es que permiten determinar el tipo de mantenimiento que requiere el transformador, en cuanto a la necesidad de secado de la parte activa, una regeneración de aislamiento, o incluso una desludificación.

A continuación, profundizaremos respecto a la prueba de Resistencia dieléctrica, ya que nos establece los parámetros guía para el funcionamiento del chispómetro a diseñar y construir, y también se sintetizan otras pruebas para diagnóstico complementarias, como son cromatografía de gases y análisis de furanos, como cultura general.

2.2.2 Resistencia Dieléctrica Norma ASTM D877, D1816, VDE 370

Se define como Rigidez Dieléctrica a la capacidad de un aislante para soportar tensión eléctrica a determinada rampa de incremento de la misma sin fallar. Es así, que se mide en el aceite aislante su capacidad de soportar los elevados esfuerzos eléctricos que existen en el interior de un transformador sin que se produzca la falla del equipo.

La prueba se realiza aplicando progresivamente tensión a dos electrodos de bronce, de geometría y separación según la norma que se esté aplicando, sumergidos en el aceite a probar y el conjunto aceite electrodos contenidos en un vaso apropiado.

La tensión se aplica a una rampa específica para cada tipo de norma, la geometría de los electrodos y su separación varían de acuerdo con la norma que se esté aplicando en cada caso, de aquí la importancia de definir muy bien a que norma se está haciendo referencia, cuando se compare resultados.

La Rigidez Dieléctrica es útil como un primer indicio de la presencia de contaminantes tales como agua, impurezas, fibras de celulosa o partículas conductoras, pero su valor más relevante es como concepto de seguridad de operación actual del equipo.

Sin embargo, un alto valor de rigidez dieléctrica no indica que haya ausencia total de todo tipo de contaminantes, ni mucho menos, ser el parámetro clave para determinar el tipo de mantenimiento preventivo que requiere el transformador.

Es importante como parte del paquete de pruebas de degradación internacionalmente reconocidas, y no nos exime por tanto de la necesidad de ejecutar las demás pruebas para tomar una acertada decisión.

La resistencia dieléctrica del papel aislante impregnado de aceite puede ser unas tres a cuatro veces superior a la del aceite solo.

En la siguiente tabla, se describe brevemente las normas ASTM D-877 y D-1816 en sus aspectos relevantes:

Tabla 3

Características para prueba de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816

Parámetro	ASTM D-877	ASTM D-1816
1. Geometría de los electrodos	Discos planos de 25 mm	Semiesféricos de 36 mm
2. Separación	0.1" (2.5mm)	0.04" (1mm), 0.081" (2mm)
3. Rampa	3000 V/seg	500 V/seg
4. Alcance en Kv	Por debajo de 69 Kv	35 – 50 Kv separación: 1mm 80 – 90 Kv separación: 2 mm
5. Sensibilidad a la humedad	En el rango de 30 a 80 ppm o agua libre	Por debajo de 30 ppm
6. Aplicación recomendada según ASTM	Aceptación aceite nuevo a granel o en tambores	Aceites filtrados, desgasificados y deshidratados antes y después de tratamiento
7. Sensibilidad a fibras de celulosa	Menos sensible	Más sensible

Fuente: (Martínez, 2010)

Por años se ha tomado a la Prueba de Rigidez dieléctrica como la más importante a la hora de emitir un diagnóstico del estado del aceite de un transformador.

Se han encontrado casos de transformadores en los que la rigidez dieléctrica de su aceite estaba por encima de los 30 KV (rigidez dieléctrica buena), sin embargo, dichos aceites presentaban un considerable contenido de humedad y un elevado grado de acidez, mientras que en el interior del transformador la presencia de lodo era apreciable.

Es conocido en la actualidad que pruebas como Tensión Interfacial, Número de Neutralización, Factor de Potencia y Contenido de Humedad constituyen un complemento

necesario a la prueba de Rigidez Dieléctrica a la hora de emitir un diagnóstico más confiable del estado del aceite y del transformador.

La Prueba de Rigidez dieléctrica ayuda a detectar la presencia de herrumbre u otras partículas metálicas, suciedad, fibras de celulosa y agua en estado libre en el aceite (los anteriores contaminantes producen una marcada reducción en la rigidez dieléctrica del aceite).

Por otra parte, la Prueba de Rigidez dieléctrica no dice nada sobre el estado del aislamiento sólido, el grado de acidez del aceite, la presencia de lodo en el transformador y la presencia de agua en forma disuelta en el aceite sino a partir del 80% de saturación.

Para esta prueba se utiliza un equipo denominado Medidor de Rigidez Dieléctrica, en el cual, se aplica un voltaje AC con una tasa de crecimiento controlada, a dos electrodos que pueden tener dos formas diferentes según la norma que se aplique y que están inmersos en el fluido aislante a ser probado.

El “entrehierro” o la separación entre electrodos es calibrada a una distancia especificada (de acuerdo a la norma que se va aplicar). Cuando aparece un arco entre los electrodos, el voltaje registrado en ese instante es la Rigidez Dieléctrica de la muestra sometida a prueba.

Los métodos más conocidos para la medición de la Rigidez Dieléctrica de los aceites aislantes de origen mineral son:

- ASTM D-877
- ASTM D-1816
- VDE – 370

Norma ASTM D-877

Este método utiliza una cuba con electrodos con caras planas, separados una distancia de 0.1”, con una tasa de crecimiento de tensión de 3 Kv/seg.

La norma D-877 es recomendada para probar aceites en servicio o aceites nuevos sin tratamiento previo a la energización del equipo.

Norma ASTM D-1816

En éste método se utiliza una cuba con electrodos de caras semiesféricas. La separación de dichos electrodos puede ser de 0.04” o 0.08” y la tasa de crecimiento de tensión tiene un valor de 0.5 Kv/seg.

La norma D-1816 es recomendada para probar aceites contenidos en equipos nuevos o para aceites que están siendo procesados previo a la energización del equipo. La aceptación de éste método en la evaluación de aceites en servicio está siendo estudiada.

Norma VDE – 370

En este método se utiliza una cuba con electrodos de caras semiesféricas espaciados entre si 0.1” y con una tasa de crecimiento de tensión de 2 Kv/seg.

2.2.3 Diagnóstico predictivo por cromatografía de gases

La técnica de la Cromatografía de Gases se ha basado en el estudio de casos implicando correlación entre el tipo de falla incipiente o avanzada que se ha presentado en transformadores similares y los gases asociados a dicha falla.

La detección de una condición anormal requiere una evaluación de la cantidad de gases generados y su rata de generación para poder hacer una primera evaluación. Alguna indicación de la fuente de gases generados y la clase de aislamiento involucrado se puede obtener determinando la composición de los gases.

La utilización del análisis de gases disueltos se basa en el rompimiento de las moléculas de hidrocarburos tanto en el aceite como en la celulosa debido a la presencia de alguna falla de tipo térmico o eléctrico.

Los gases producidos por este rompimiento pueden ser fácilmente colectados en una muestra de aceite tomada apropiadamente, y ser analizados respectivamente, de esta manera, dichas fallas como ionización, calentamiento, arco y pirólisis de la celulosa pueden ser detectados con anticipación a otros síntomas.

Con base a lo mencionado, los objetivos del uso de la técnica de la cromatografía de gases son:

- Monitorear los transformadores en servicio y obtener un aviso anticipado de una falla

- Supervisar una unidad en operación que se presume tiene una falla incipiente hasta lograr poder sacarla de servicio para su recuperación o reemplazo
- Indicar la naturaleza y localización de la falla
- Asegurarse que un transformador nuevo no presente ningún tipo de falla durante el tiempo de garantía

Sabiendo que la rata de generación de gases, es posible predecir el tiempo para alcanzar el punto de saturación, más allá del cual se hace evidente la falla, y por tanto se activará la alarma acumuladora de gas (El relé bucholz).

Pero de lo que trata, la técnica de cromatografía de gases como criterio predictivo, es detectar el contenido de gas con anticipación a punto de saturación.

Puesto que el aceite está constituido de varias bases de hidrocarburos entre 16 y 22 átomos de carbono, y la celulosa es un hidrocarburo polimérico, ellos constituyen el sistema de aislamiento del transformador, los cuales son susceptibles a descomponerse, desprendiendo gases ante la presencia de una falla de tipo térmico o eléctrico.

Por lo tanto, cuando el aislamiento (aceite-papel) es sometido a condiciones anormales, tanto eléctricas como térmicas, por una parte, el aceite se descompone liberando pequeñas cantidades de gases de bajo peso molecular, principalmente hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, metano, etano, etileno y acetileno.

Adicionalmente, el aislamiento sólido, también se afecta liberando monóxido de carbono y dióxido de carbono, por lo tanto, los gases antes mencionados, son los denominados los gases de falla de un transformador.

2.2.4 Análisis de furanos

El análisis de furanos, es un método útil para la detección del deterioro térmico, hidrolítico y oxidativo del aislamiento sólido (papel) del transformador, siendo este método, un complemento para la cromatografía de gases.

Debido a diferentes procesos que suceden dentro del transformador, las cadenas glucosídicas del papel aislante se rompen formando anillos abiertos de glucosa, los cuales son inestables y con muy baja solubilidad en el aceite, que posteriormente se degradan, formando furanos, los cuales si son estables y solubles en el aceite.

Dichos furanos pueden ser medidos en el aceite aislante en ppb (partes por billón) mediante el uso de un cromatógrafo de alta presión de líquido.

Por lo tanto, mientras más información se tenga sobre un transformador, mediante las diferentes pruebas que se ejecuten, estas son compatibles y complementarias entre sí, con el fin, de lograr un adecuado diagnóstico del estado del transformador, y que permita tomar las decisiones acertadas para su mantenimiento.

2.3 Normativa vigente Ecuatoriana

La normativa vigente ecuatoriana es la NTE INEN 2133 (1998) que trata sobre Transformadores, Aceites aislantes para transformadores e interruptores y Requisitos, la misma que describimos a continuación:



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA**NTE INEN 2 133:98**

TRANSFORMADORES. ACEITES AISLANTES PARA TRANSFORMADORES E INTERRUPTORES. REQUISITOS.

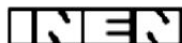
Primera Edición

TRANSFORMERS. INSULATING OILS FOR TRANSFORMERS AND SWITCHGEAR. SPECIFICATIONS.

First Edition

DESCRIPTORES: Ingeniería eléctrica, transformadores, aceites aislantes para transformadores e interruptores.
EL 04.02-414
CDU: 621.314.025
CIIU: 4101
ICS: 29.180

CDU: 621.314.025
ICS: 29.180



CIIU: 4101
EL 04.02.414

<p>Norma Técnica Ecuatoriana Obligatoria</p>	<p>TRANSFORMADORES. ACEITES AISLANTES PARA TRANSFORMADORES E INTERRUPTORES. REQUISITOS.</p>	<p>NTE INEN 2 133:98 1998-03</p>
<p style="text-align: center;">1. OBJETO</p> <p>1.1 Esta norma establece los requisitos que deben cumplir los aceites aislantes nuevos, a granel o envasados en tambores y utilizados para la inmersión o llenado de transformadores e interruptores, en los cuales se requiere el aceite, como aislante o como medio refrigerante o ambos.</p> <p>1.2 Esta norma no se aplica a aceites de alta viscosidad, ni a aquellos que se utilizan en cables o condensadores, ni a los que se emplean con propósitos especiales de impregnación.</p> <p style="text-align: center;">2. DEFINICIONES</p> <p>2.1 Para los efectos de esta norma, se adoptan las definiciones contempladas en la NTE INEN 2 110 y las que a continuación se detallan:</p> <p>2.1.1 <i>Pruebas de lote.</i> Pruebas realizadas sobre una muestra representativa de un lote.</p> <p>2.1.2 <i>Pruebas de rutina.</i> Pruebas que deben realizarse sobre todas las unidades de un lote.</p> <p>2.1.3 <i>Prueba tipo.</i> Prueba realizada por el fabricante, con el fin de demostrar que el aceite cumple satisfactoriamente con el conjunto de especificaciones requeridas.</p> <p>2.1.3.1 La prueba tipo, en razón de su naturaleza, no requiere ser repetida, a menos que se introduzcan en su composición, modificaciones tales que alteren el producto terminado.</p> <p style="text-align: center;">3. CLASIFICACIÓN</p> <p>3.1 Los aceites, objeto de esta norma, se clasifican en las siguientes clases:</p> <p>3.1.1 <i>Clase de no inhibidos,</i> es decir, aceites sin aditivos antioxidantes.</p> <p>3.1.2 <i>Clase de inhibidos,</i> es decir, aceites con aditivos antioxidantes.</p> <p>3.2 Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la clase de aceite, se recomienda seguir el método indicado en la Norma IEC 296.</p> <p style="text-align: center;">4. DISPOSICIONES GENERALES</p> <p>4.1 Los aceites aislantes deben ser minerales derivados del petróleo.</p> <p>4.2 Por aditivos antioxidantes se entienden todas aquellas sustancias obtenidas a partir de un procedimiento de síntesis químico o petroquímico, las cuales se añaden deliberadamente a un aceite aislante, para mejorar sus características. No se consideran como aditivos antioxidantes, las sustancias presentes de forma natural en el petróleo o producidas durante cualquier proceso de refinado.</p> <p>4.2.1 Si el aceite contiene aditivos, se debe indicar su naturaleza y su cuantía.</p> <p>4.3 Los aceites aislantes nuevos deben estar exentos de materias extrañas en suspensión o sedimentadas.</p> <p style="text-align: right;"><i>(Continúa)</i></p> <hr/> <p>DESCRIPTORES: Ingeniería eléctrica, transformadores, aceites aislantes para transformadores e interruptores.</p>		

5. REQUISITOS

5.1 Los aceites aislantes, objeto de la presente norma, deben cumplir los requisitos establecidos en la tabla 1, cuando se prueben de acuerdo con los métodos descritos en el capítulo 7.

TABLA 1. Valores característicos de los aceites aislantes

Aceite Características	Unidad	Clase		Ensayo según Norma:
		No Inhibido	Inhibido	
FÍSICAS				
1. Color, máximo	-	0,5	0,5	NTE INEN 1 496
2. Punto de inflamación, mínimo	°C	140,0	140,0	NTE INEN 808
3. Punto de escurrimiento (fluidez), máximo	°C	-30,0	-30,0	NTE INEN 1 982
4. Densidad, máximo a 20°C*	g/cm ³	0,895	0,895	ASTM D-1298
5. Tensión interfacial, mínimo	Nm ⁻¹	40 x 10 ³	40 x 10 ³	ASTM D-971
6. Viscosidad cinemática, máximo	cSt**			
a) Para transformadores :				NTE INEN 810
a 100°C por extrapolación		2,8	2,8	
a 40°C		11,0	11,0	
a 0°C		70,0	70,0	
b) Para interruptores :				NTE INEN 810
a 100°C por extrapolación		3,2	3,2	
a 40°C		15,0	15,0	
a 0°C		120,0	120,0	
QUÍMICAS				
1. Azufre corrosivo combinado		No corrosivo	No corrosivo	ASTM D-1275
2. Acidez (Número de neutralización), máximo	mg de KOH/g	0,03	0,03	ASTM D-974
3. Estabilidad a la oxidación acelerada (72 h), máximo:	mg de KOH/g			
- Sedimentación	%	0,3	-	ASTM D-2440
- Acidez total	mg de KOH/g	2,4	-	
4. Contenido de agua, máximo ***	p.p.m	35,0	35,0	ASTM D-1533
5. Aditivos		No detectable	detectable	Ver numeral 4.2
ELECTRICAS				
1. Rigidez dieléctrica, mínimo****	kV	30,0	30,0	ASTM D-877 ASTM D-1816 IEC 158
2. Tangente del ángulo de pérdidas a 90°C, máximo	-	0,005	0,005	ASTM D-924

* Para una temperatura de 15°C el valor equivalente de la densidad será el establecido en la tabla 1

** 1 cSt = 10⁻⁶ m²/s

*** Para los aceites a granel, no se ha establecido valor

**** Para los aceites a granel, se establece un valor mínimo de 18 kV.

6. INSPECCIÓN

6.1 Muestreo

6.1.1 Toma de muestras y recepción del producto

6.1.1.1 *Lote*. Los productos se presentarán a inspección, como un conjunto unitario, en las cantidades especificadas, con características similares por haber sido fabricados bajo condiciones de producción uniforme.

(Continúa)

6.1.1.2 Tamaño de la muestra. Para verificar la conformidad del lote con los requisitos establecidos en la presente norma, se tomará al azar el número de muestras considerado en la tabla 2 y se someterá a las pruebas del Capítulo 7. En el caso de aceites a granel, se debe tomar una muestra de cada envase.

TABLA 2. Criterio de aceptación o rechazo

Tamaño del lote (Número de tambores)	Tamaño de la muestra	Número permitido de defectuosos
1	1	0
2 a 5	2	0
6 a 20	3	0
21 a 50	4	0
51 a 100	7	0
101 a 200	10	0
201 a 400	15	0
> 400	20	0

6.1.2 Cantidad de la muestra para ensayos. De cada muestra, se extraerán las siguientes cantidades mínimas (Ver nota 1):

6.1.2.1 Para el ensayo de oxidación, 100 ml

6.1.2.2 Para el ensayo de rigidez dieléctrica, 1 litro

6.1.2.3 Para los otros ensayos, 1 litro.

6.2 Aceptación o rechazo

6.2.1 Si todas las muestras sometidas a las pruebas establecidos en el numeral 7.2.1 cumplen con los requisitos, se aceptará el lote.

6.2.2 El fabricante debe suministrar el protocolo de pruebas de los ensayos de rutina, el cual debe cumplir con los requisitos establecidos en esta norma.

6.2.3 Si una de las muestras no cumple con todos y cada uno de los requisitos establecidos en esta norma, se rechazará el lote.

7. MÉTODOS DE ENSAYO

7.1 Preparación de la muestra. Se debe tener en cuenta las siguientes precauciones, cuando se realice la extracción de muestras para la realización de los ensayos:

7.1.1 Para evitar la contaminación de la muestra o del tambor, se debe tener el máximo cuidado con impurezas externas, tales como polvo y humedad.

7.1.2 Las manos del operario no deben entrar en contacto con la muestra.

7.1.3 Debe tenerse especial cuidado cuando se tomen muestras de aceite que se encuentren a temperatura más baja que la temperatura ambiente, para evitar contaminación por condensación. Los recipientes que contengan la muestra deben ser herméticamente cerrados y guardados, y los ensayos no deben llevarse a cabo sobre la muestra mientras su temperatura no sea igual a la temperatura ambiente.

NOTA 1: Para la realización de todas las pruebas es conveniente tomar una cantidad total de 2,5 litros por cada muestra.

(Continúa)

7.1.4 Únicamente deben utilizarse recipientes de vidrio para tomar las muestras, y preferiblemente con tapones de vidrio. Pueden utilizarse tapas o corchos, pero cubiertos con papel de estaño o de aluminio. En ningún caso podrán utilizarse tapones de caucho.

7.1.5 No deben utilizarse estopas de algodón ni materiales fibrosos para limpiar los envases o aparatos.

7.1.6 Cuando sea necesario extraer una muestra del fondo, el recipiente que contenga el aceite (tambor o tanque) debe permanecer en reposo en el sitio de muestreo, por lo menos durante 8 horas, pero preferiblemente 24 horas, antes de extraerse la muestra.

7.1.7 El recipiente para la toma de muestras debe enjuagarse con parte del producto por analizar y desocuparse completamente antes de llenarlo con la muestra definitiva.

7.1.8 Antes de que el tambor o tanque que contenga el aceite, vaya a ser abierto, deben limpiarse su tapa y sus alrededores, para evitar el polvo y la humedad.

7.1.9 Las muestras que se toman para determinar los requisitos de estabilidad con respecto a la oxidación, azufre corrosivo y tangente del ángulo de pérdidas, deben ser protegidos de la luz en frascos de color ámbar.

7.1.10 En el caso de los aceites a granel, la muestra se debe tomar luego de que se ha dejado correr por la válvula de salida del aceite una cantidad aproximada de 10 litros.

7.2 Ensayos

7.2.1 Pruebas de lote

7.2.1.1 *Color*: El color de los aceites aislantes, se determina según la NTE INEN 1 496.

7.2.1.2 *Rigidez dieléctrica*. Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la rigidez dieléctrica, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-877 y ASTM 1816, o el método especificado en la Norma Internacional IEC 156.

7.2.1.3 *Acidez (Número de neutralización)*. Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la acidez (número de neutralización), se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-974, o el método especificado en la Norma Internacional IEC 296.

7.2.2 Pruebas de rutina

7.2.2.1 *Densidad a 20°C*. Mientras se adopte la NTE INEN, para determinar la densidad del aceite aislante a 20°C, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-1298 (Ver tabla 3).

TABLA 3. Valor de la densidad a 15°C y 20°C

Temperatura	Densidad g/cm ³
15°C	0,8982
20°C	0,895

7.2.2.2 *Viscosidad cinemática*. La viscosidad cinemática, se determina según la NTE INEN 810.

7.2.2.3 *Punto de inflamación*. El punto de inflamación en aceites aislantes, se determina según la NTE INEN 808.

7.2.2.4 *Punto de escurrimiento (fluidéz)*. El punto de escurrimiento (fluidéz) en aceites aislantes, se determina según la NTE INEN 1 982.

(Continúa)

7.2.2.5 Azufre corrosivo combinado. Mientras se adopte la NTE INEN para la determinación de azufre corrosivo combinado, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-1275.

7.2.2.6 Acidez (Número de neutralización). Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la acidez (número de neutralización), se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-974, o el método especificado en la Norma Internacional IEC 296.

7.2.2.7 Rigidez dieléctrica. Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la rigidez dieléctrica, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-877 y ASTM 1816, o el método especificado en la Norma Internacional IEC 156.

7.2.2.8 Estabilidad a la oxidación acelerada (72 h). Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la estabilidad a la oxidación acelerada a las 72 horas, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-2440.

7.2.2.9 Contenido de agua. Mientras se adopte la NTE INEN para determinar el contenido de agua, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-1533.

7.2.2.10 Tensión interfacial. Mientras se adopte la NTE INEN para determinar la tensión interfacial, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-971.

7.2.2.11 Color. El color de los aceites aislantes, se determina según la NTE INEN 1 496.

7.2.2.12 Aditivos. Ver numeral 4.2.

7.2.3 Prueba tipo. Se establece, como prueba tipo, la prueba para la determinación de la tangente del ángulo de pérdidas a 90°C. Mientras se adopte la NTE INEN correspondiente, se recomienda seguir el método indicado en ASTM D-924.

8. ENVASADO Y EMBALADO

8.1 Mientras se adopte la NTE INEN correspondiente, los aceites aislantes, objeto de la presente norma, se envasarán en tambores metálicos que cumplan con los requisitos especificados en la norma ANSI MH2.

8.2 Antes de envasar el aceite, el tambor debe estar completamente limpio y libre de humedad, de materias en suspensión y de cualquier clase de partículas que vayan en detrimento de la calidad del producto o que desmejore sus propiedades durante el transporte y el almacenaje.

9. ROTULADO

9.1 Cada tambor debe llevar marcada en lugar visible, perfectamente legible y con caracteres indelebles, la siguiente información como mínimo :

9.1.1 El nombre o la razón social del fabricante

9.1.2 La leyenda "Aceite aislante para transformadores" o (interruptores), según el caso.

9.1.3 La clase

9.1.4 El contenido, en litros

9.1.5 La masa neta, en kg

9.1.6 El año y el mes de fabricación, según la NTE INEN 58

9.1.7 La identificación del lote.

9.1.8 El contenido de askarel o PCB (Bicenole Policlorinado).

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 58:1989	<i>Documentación. Escritura de las fechas en forma numérica</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 808:1987	<i>Productos del petróleo. Determinación de los puntos de inflamación y combustión en vaso abierto de Cleveland.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 810:1987	<i>Productos del petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 496:1987	<i>Productos del petróleo. Determinación del color.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 982:1994	<i>Productos derivados del petróleo. Determinación del punto de escurrimiento.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 110:1998	<i>Transformadores. Definiciones.</i>
ANSI MH2 1997	<i>American National Standard for material handling (Containers) - Steel drums and pails</i>
ASTM Designation: D 877-87	<i>Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating liquids using disk electrodes.</i>
ASTM Designation: D 924-92	<i>Standard test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids.</i>
ASTM Designation: D 971-91	<i>Standard test method for interfacial tension or oil against water by the ring method.</i>
ASTM Designation: D 974-93	<i>Standard test method for acid and base number by color - indicator titration.</i>
ASTM Designation: D 1275-93	<i>Standard test method for corrosive sulfur in electrical insulating oils.</i>
ASTM Designation: D 1298-85 (Reapproved 1990)	<i>Standard practice for density, relative density (Specific gravity), or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method.</i>
ASTM Designation: D 1533-88	<i>Standard test methods for water in insulating liquids (Karl Fisher reaction method).</i>
ASTM Designation: D 1816-84 a (Reapproved 1990)	<i>Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils of petroleum origin using VDE electrodes.</i>
ASTM Designation: D 2440-93	<i>Standard test method for oxidation stability of mineral insulating oil.</i>
IEC Publication 156:1963	<i>Method for the determination of the electric strength of insulating oils.</i>
IEC Publication 296:1982	<i>Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.</i>

Z.2 BASES DE ESTUDIO

British Standards BS 148:1984 (1992) *Specification for unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.* British Standards Institution. London, 1992.

Norma Técnica Colombiana ICONTEC 1 465:1990 Primera revisión: IEC 296 *Electrotecnia. Especificaciones para aceites minerales. Aislantes nuevos para transformadores, interruptores y equipos eléctricos.* Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, 1990.

2.4 Impacto Ambiental⁵

Los aceites a base de PCB's conocidos como askareles, de excelente desempeño pero que, por razones ambientales, por su alto nivel tóxico y su no biodegradabilidad, su utilización está prohibida por las autoridades ambientales, y aún más, los equipos que contengan éste fluido deben ser dispuestos ambientalmente a compañías especializadas en el tema para su descontaminación.

2.4.1 El PCB

El bifenilo poloriclorado (PCB) es un hidrocarburo sintético, cuyo compuesto químico está formado por cloro, carbón e hidrógeno, que fue desarrollado en la década de los 70, para transformadores en áreas cerradas o peligrosas debido a su alto punto de inflamación y estabilidad química, conocido comúnmente como ASKAREL o PCB.

El PCB es resistente al fuego, muy estable, no conduce electricidad y tiene baja volatilidad a temperaturas normales. Éstas y otras características lo han hecho ideal para la elaboración de una amplia gama de productos industriales y de consumo.

Las propiedades químicas y físicas más relevantes de los PCB's son:

Químicas:

⁵ (Martínez, 2010)

- Alta capacidad calorífica
- Baja conductividad eléctrica
- Inertes a todos los ácidos y bases
- Baja volatilidad
- Naturaleza no polar (Alta constante dieléctrica)
- Altamente solubles en lípidos (Acumulable en plantas y animales)

Físicas:

- Líquido viscoso, amarillizo, con fuerte olor a hidrocarburos
- Sustancias hidrofóbicas y con tendencia a la bioacumulación
- Reconocido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental) como sustancias peligrosas clases A, de alta toxicidad y persistencia ambiental por su riesgo inherente.

El PCB se utilizaba como refrigerante de transformadores, pero en 1976, luego de un accidente, fue prohibido en Estados Unidos y Europa. Hoy existen alternativas al PCB mucho más seguras como los aceites de silicón o ciertos tipos de aceite mineral dieléctricos. Hoy se utilizan transformadores secos para reemplazar a los que necesitaban refrigerantes líquidos.

Durante los años 70's, se determinó que los Bifenilos Policlorados tenían características tóxicas nocivas para el hombre, por lo que quedó prohibida su fabricación internacionalmente y se comenzó a establecer la normatividad necesaria para su control, manejo y disposición. A pesar de

la prohibición de fabricación de equipos con éste fluido dieléctrico emitido en 1979 en Norteamérica y en 1983 en Europa Occidental, muchos de los transformadores adquiridos antes de ésta fecha se encuentran aún en funcionamiento o almacenados luego de su retiro.

“Existen varios esfuerzos a nivel mundial para erradicar los PCB’s, debido a su alta toxicidad para la salud humana y el medio ambiente. El Ecuador, por ejemplo, es uno de los países que firmó el Convenio de Estocolmo, comprometiéndose a desarrollar el Plan Nacional para la gestión de los contaminantes persistentes, colocando como prioridad a los PCB’s” (Pillaga, 2014).

Como parte de los convenios internacionales (Estocolmo, Basilea y Rotterdam) con los que se comprometió el Ecuador, en Julio del 2012, el Ministerio del Ambiente conjuntamente con el CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) y el Subcomité Técnico para la Gestión de PCB’s presentaron el Manual de Procedimientos para el Manejo de los Bifenilos Policlorados (PCB’s), que tiene como objetivo general el establecimiento de los lineamientos y procedimientos para el manejo de los PCB’s y de aplicación obligatoria en el sector eléctrico ecuatoriano.

2.4.2 Historia⁶

Aunque fue sintetizado por primera vez en 1881, la producción comercial de PCB comenzó en los Estados Unidos en 1929 en respuesta a la necesidad de la industria eléctrica de un líquido refrigerante y aislante más seguro para los transformadores y condensadores industriales.

⁶ Fuente especificada no válida.

También fueron utilizados como líquidos hidráulicos, como capas superficiales para el papel copia sin carbono, como plastificantes en sellantes, resinas sintetizadas, cauchos, pinturas, ceras y asfaltos; y como retardadores de llamas en aceites lubricantes. Sin embargo, fue a partir de 1950 cuando comenzó su uso masivo.

Durante los primeros 25 años de aplicación, no generó preocupaciones hasta que, en 1968, en Japón, se contaminó aceite de arroz con estos compuestos. Los niños nacidos de madres que habían ingerido el aceite se caracterizaron por la pigmentación oscura de su piel, bajo peso al nacer, párpados hinchados e irrupción temprana de los dientes. Además, 1200 personas se envenenaron.

En el mismo país, otro incidente con PCB provocó niños hipotónicos y de bajo coeficiente intelectual. Algo semejante sucedió en Taiwán y en Estados Unidos, donde los bebés nacidos de madres que habían comido pescado de los lagos de Michigan, contaminado con bifenilos policlorinados, tenían mala memoria, un coeficiente intelectual bajo para su edad y la visión disminuida.

Estos acontecimientos pusieron la mirada sobre el PCB. En 1973, la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo impulsó a todos los países miembros a limitar el uso de PCB y a desarrollar mecanismos de control. Hacia 1977 su fabricación y aplicación fue prohibida en Canadá.

Un año antes, tanto en Europa como en Estados Unidos se prohibió la producción y comercialización de éstas sustancias. No así en el resto de los países

En 1985 se produjo un derrame de PCB que era transportado cerca de Kenora, Ontario, poniendo nuevamente a éste químico en análisis. A partir de allí se dispusieron normas estrictas para el transporte seguro de este material peligroso.

Estos incidentes llevaron a la Monsanto Company, único fabricante de PCB en Estados Unidos, a frenar su producción voluntariamente. En Estados Unidos y Canadá, el uso de PCB se permite solamente en sistemas eléctricos e hidráulicos cerrados existentes.

Estados Unidos emprendió un acelerado programa de eliminación de equipos que contengan PCB. Bajo la actual legislación canadiense, el sistema eléctrico existente que contiene PCB debe reemplazarse cuando complete su vida útil. En tanto, el mantenimiento, el control y la vigilancia de éstos productos es muy estricta. Los gobiernos provinciales y federales deben asegurar el uso correcto de estos equipos.

A nivel mundial se realizan reuniones para determinar los plazos para la eliminación total de éstas sustancias. El desconocimiento de su peligrosidad produjo un manejo sin ningún tipo de precauciones. Por esto, grandes volúmenes de PCB se han introducido en el ambiente a través de la incineración abierta o incompleta; por la vaporización de pinturas, de capas y de plásticos; por la entrada o salida directa en alcantarillas, vaciándolos en sitios no seguros; y por otras técnicas que no destruyeron el material.

A pesar de las regulaciones, algunos PCBs se siguen vaciando ilegalmente, con total ignorancia y negligencia.

2.4.3 Impacto a la salud y Medioambiente⁷

Las cualidades descritas anteriormente, hacen al PCB una sustancia peligrosa para el ambiente, especialmente su resistencia extrema a la ruptura química y biológica a través de procesos naturales.

Irónicamente, su estabilidad química, que ha contribuido a su uso industrial extenso, es también uno de los aspectos que causa la preocupación más grande. Esta resistencia inusual, más su tendencia a permanecer y acumularse en organismos vivos, genera la presencia de PCB en el ambiente y una amplia dispersión con sus consecuentes efectos.

Muchos experimentos de laboratorio y otros estudios han intentado determinar los efectos que producen los PCB's en la salud de los seres humanos. Los científicos convienen en que es poco probable que la baja exposición a los PCB's a corto plazo genere lesiones serias. Sin embargo, la mayoría coincide sobre los efectos adversos provocados por la exposición a largo plazo, incluso en concentraciones bajas.

Los PCB's pueden ingresar en el cuerpo a través del contacto de la piel, por la inhalación de vapores o por la ingestión de los alimentos que contengan residuos del compuesto.

⁷ (Martínez, 2010)

Investigaciones toxicológicas, comprobaron los grandes efectos nocivos originados por la contaminación de los PCB's los cuales pueden causar irritación a los ojos, problemas neurológicos, el efecto más común es el "cloracné", una condición dolorosa que desfigura la piel, similar al acné adolescente. También pueden provocar daños en el hígado y la Organización Mundial de la Salud comprobó, además, que el PCB es cancerígeno.

Se pueden presentar dos fenómenos, el primero el de la bioacumulación, cuando los PCB's entran al cuerpo humano o animal a través de la piel, debido a que ésta sustancia no es eliminado y se concentran en el organismo, y el segundo, el de la bioampliación, cuando su concentración aumenta en la cadena alimenticia al ser consumidos de menor a mayor grado.

En Ecuador todavía se encuentran transformadores de baja y media tensión que contienen aceite refrigerante de PCB y que, en muchos casos, chorrean ese lubricante por falta de mantenimiento. La liberación del aditivo con PCB contamina el suelo, las napas y el agua. Pero el principal riesgo ocurre si los transformadores explotan o se prenden fuego, en ese caso, el PCB se transforma en un producto químico denominado dioxina. Ésta se produce a través de la combustión.

Las dioxinas son las sustancias más dañinas que se conocen. Son cinco millones de veces más tóxicas que el cianuro y se ha comprobado que son cancerígenas. El PCB es considerado un contaminante orgánico persistente, es decir que permanece en el medio ambiente por largos períodos.

2.4.4 Gestión y tratamiento⁸

De acuerdo con el grado de contaminación de PCB's la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha clasificado los transformadores eléctricos de la siguiente manera:

- Transformadores libres de PCB: Aquellos que están contenidos en aceites minerales con un número máximo de 50 ppm.
- Transformadores contaminados con PCB: Aquellos cuyo aceite mineral tenga una concentración entre 50 y 500 ppm. Estos son susceptibles de descontaminar, extrayendo el aceite contaminado y disponiéndolo de manera ambientalmente apropiada, enjuagando el transformador con un solvente especial y luego colocando aceite mineral nuevo, procedimiento que debe garantizar una concentración no mayor al 10% de la inicial.
- Transformadores con PCB: Los que tenga más de 500 ppm de PCB, los cuales deben ser dispuestos de manera ambientalmente apropiada.

La manera como actualmente son destruidos los PCB's es mediante la incineración en tres etapas básicas:

- Primera Etapa: Combustión a 850 °C, aquí se incineran sólidos, lodos y líquidos contaminantes permitiendo volatilizar los PCB's contenidos en ellos, para luego ser enviados a la cámara de combustión secundaria.

⁸ (Martínez, 2010)

- Segunda Etapa: Combustión entre 1200 °C y 1600 °C, aquí se destruyen los gases que contienen PCB's volatilizados provenientes de la etapa anterior.
- Tercera Etapa: Sistema de limpieza de gases, en esta etapa los gases de combustión de la cámara secundaria de alta temperatura son enfriados y filtrados para remover las partículas y subproductos de cloro especialmente ácido clorhídrico, y los mismos son removidos con la ayuda de sosa cáustica para neutralizar su Ph y obtener sales precipitadas inofensivas desde el punto de vista ambiental.

Todo el proceso es controlado desde una sala de control sofisticada desde donde se ejerce un control estricto a los parámetros de temperatura, tiempo de retención, eficiencia de la combustión y control de emisiones. Las plantas para efectuar este proceso son de muy alta tecnología y de una inversión muy elevada.

Capítulo 3:

Diseño Mecatrónico

3.1 Diseño de componentes mecánicos

3.1.1 Diseño de electrodos

En cumplimiento a la normativa vigente, para la medición de la Rigidez Dieléctrica de los aceites aislantes de origen mineral se debe utilizar 2 tipos de electrodos de prueba, los cuales deben ser de material de bronce como se estipuló en la tabla #3 del capítulo 2, tenemos:

- ASTM D-877
- ASTM D-1816

La geometría del electrodo según la norma ASTM D-877 deben ser discos planos de 25 mm de diámetro. Y la separación para testeo entre caras planas de 2.5mm.

La geometría del electrodo según la norma ASTM D-1816 deben ser discos semiesféricos de 36 mm de diámetro. Y la separación para testeo entre caras semiesféricas de 2mm. Requiere agitador para muestra de aceite.

Para el diseño de la sección roscada del disco, se utilizó lo estipulado en el Libro de Dibujo Técnico de Giesecke 12 ed, en la que se especifica el paso, altura de cresta y el ángulo de abertura entre dientes de la rosca, para roscas Métricas, tal como se puede apreciar en la siguiente figura:

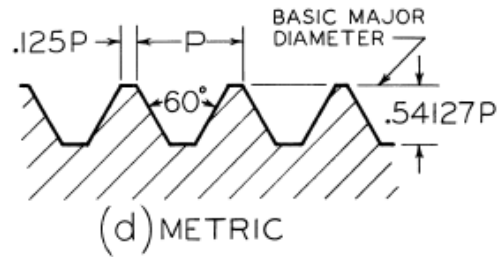


Figura 16: Rosca Métrica
Fuente: (Giesecke, 2003)

➤ Disco Caras planas 25mm Diámetro

El esquema del disco bronce de cara plana se puede observar en la siguiente figura:

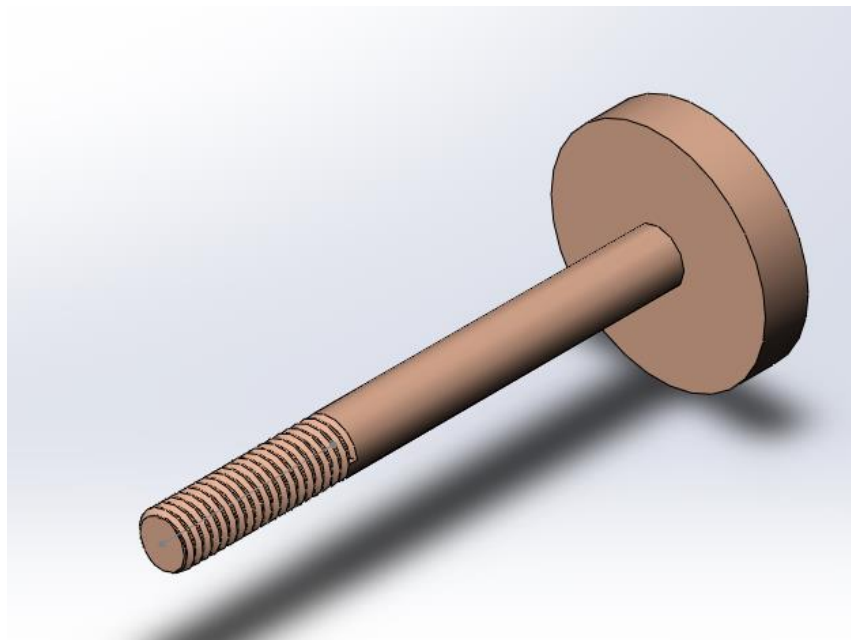


Figura 17: Electrodo Cara Plana 25mm

En la cual se usó una rosca M6x1. El esquema de diseño del electrodo de cara plana se puede apreciar en la siguiente figura, cumpliendo con un diámetro del disco de 25mm según lo establece norma ASTM D-877 en la Tabla 3:

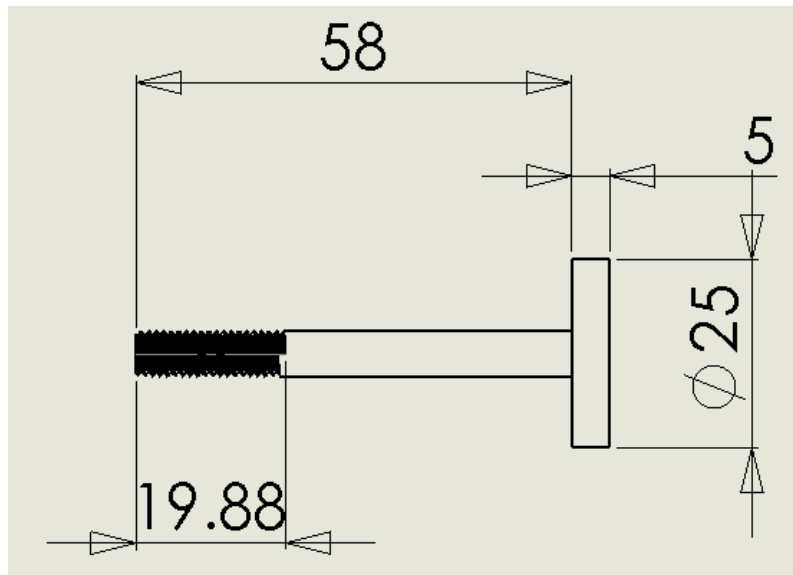


Figura 18: Electrodo Cara Plana vista lateral

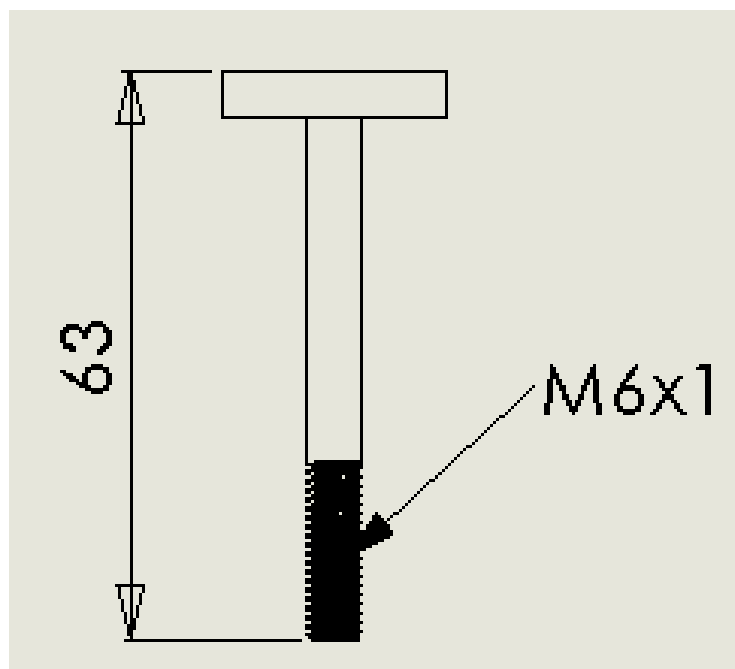


Figura 19: Electrodo Cara Plana vista Superior

➤ Disco Caras Semiesférica 36mm Diámetro

El esquema del disco bronce de cara semiesférica se puede observar en la siguiente figura:

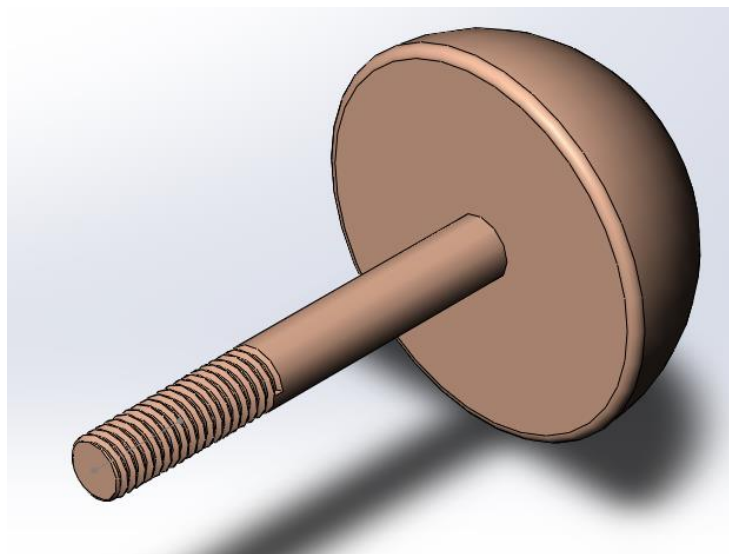


Figura 20: Electrodo Cara Semiesférica 36mm

En la cual se usó una rosca M6x1. El esquema de diseño del electrodo de cara semiesférica se puede apreciar en la siguiente figura, cumpliendo con un diámetro del disco de 25mm según lo establece norma ASTM D-1816 en la Tabla 3:

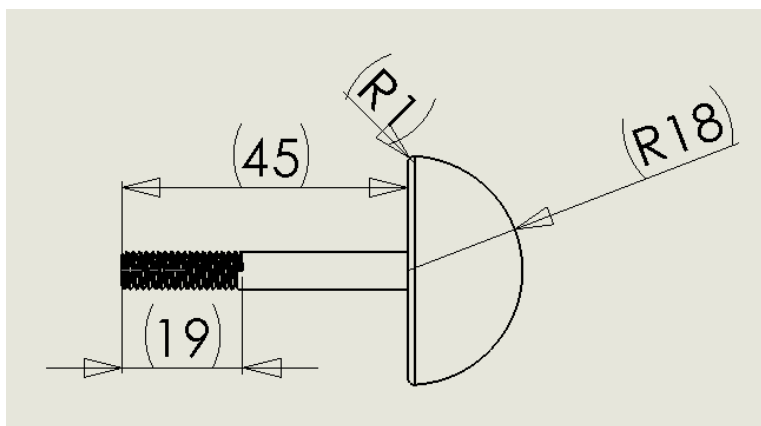


Figura 21: Electrodo Cara Semiesférica vista lateral

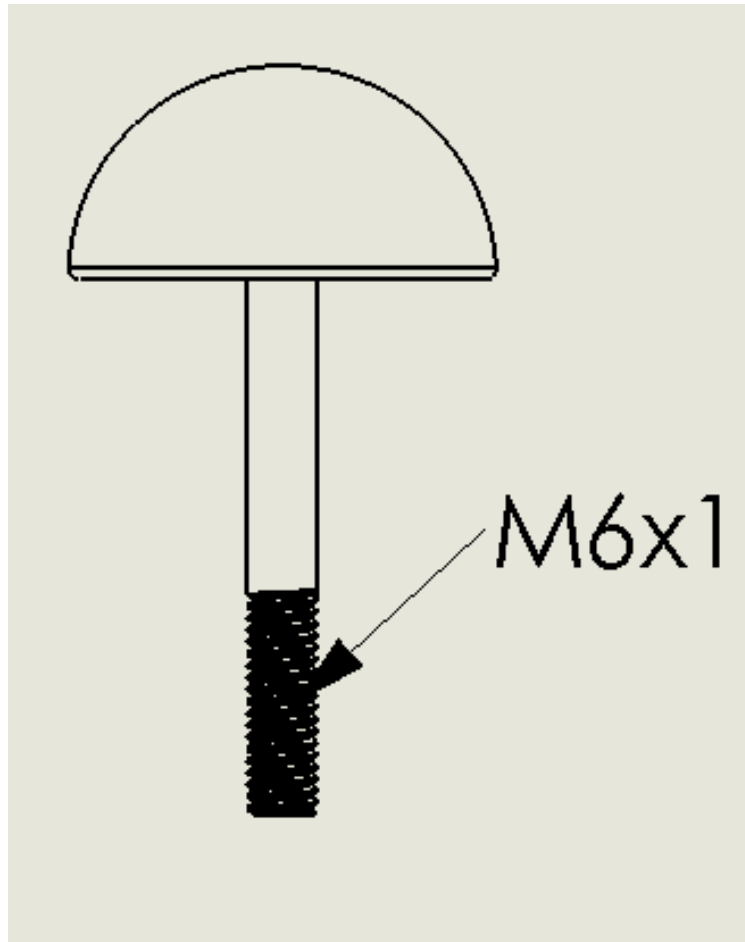


Figura 22: Electrodo Cara Semiesférica Vista Superior

3.1.2 Diseño recipiente contenedor muestra de aceite

El volumen de aceite a contener en el recipiente de vidrio, en base a otros equipos similares, se determina tomar una muestra de aceite de 400 ml, por lo tanto, las medidas mínimas del recipiente de aceite son:

$$1 \text{ ml} \rightarrow 1000\text{mm}^3$$

$$\therefore 400\text{ml} \rightarrow 400000\text{mm}^3$$

$$V_{\text{cubo}} = a^3$$

$$400000\text{mm}^3 = a^3$$

$a \cong 74 \text{ mm}$ Dimensión mínima cada lado del recipiente

Por lo tanto, las dimensiones mínimas del recipiente son: 74x74x74 mm; considerando un espesor de las paredes del recipiente de 5mm.

Para facilitar la manipulación por el usuario, para el ajuste de los electrodos de pruebas y calibración de la distancia mínima de separación entre caras de los electrodos, se consideró aumentar las medidas del recipiente de largo x ancho x altura respectivamente en 150x100x100 mm.

El recipiente se puede apreciar en la siguiente figura:

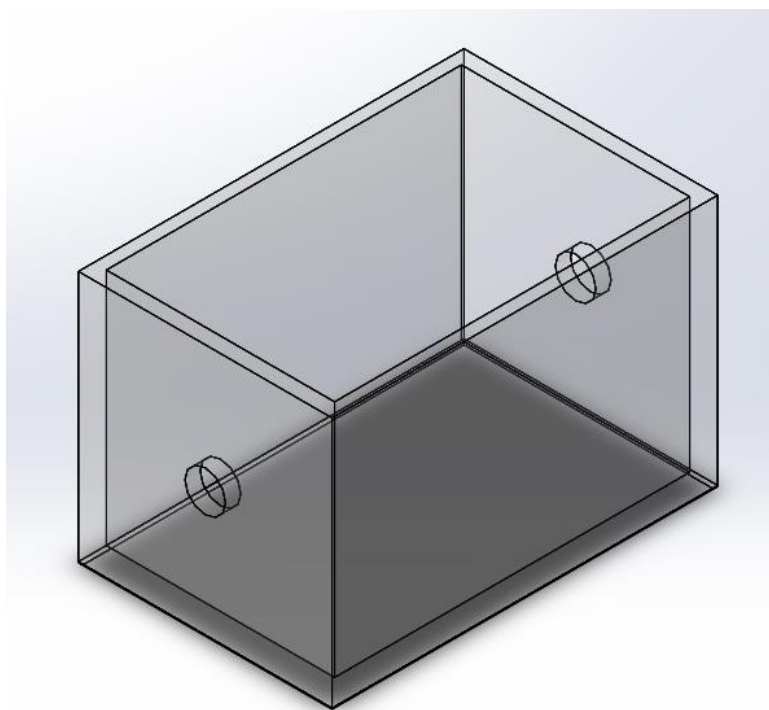


Figura 23: Diseño del Recipiente de aceite

La tapa del recipiente de aceite se puede apreciar en la siguiente figura:

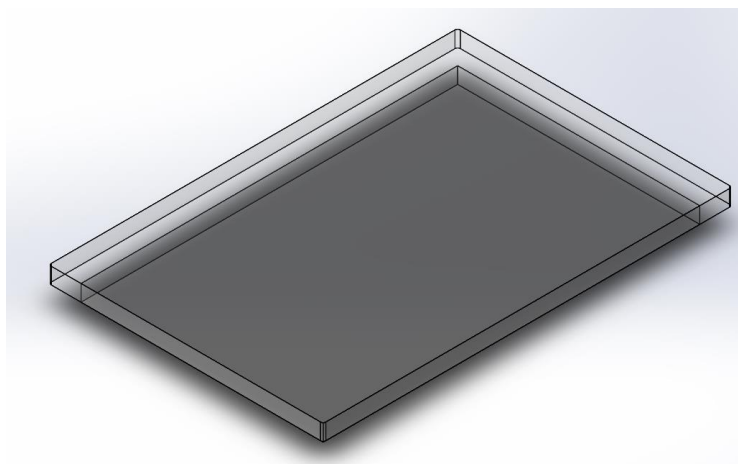


Figura 24: Diseño Tapa del Recipiente de aceite

El ensamble completo del recipiente de aceite, considerando los electrodos de prueba, los componentes de sujeción y de transmisión de energía eléctrica hacia el generador se representan en las siguientes figuras:

- Ensamble Recipiente Aceite con Electrodo Cara Plana

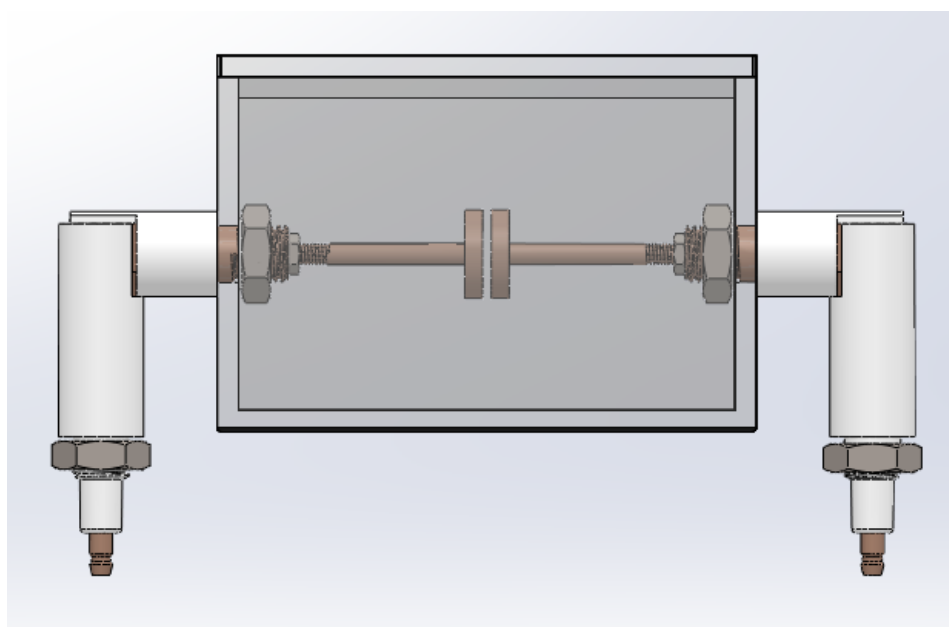


Figura 25: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista frontal

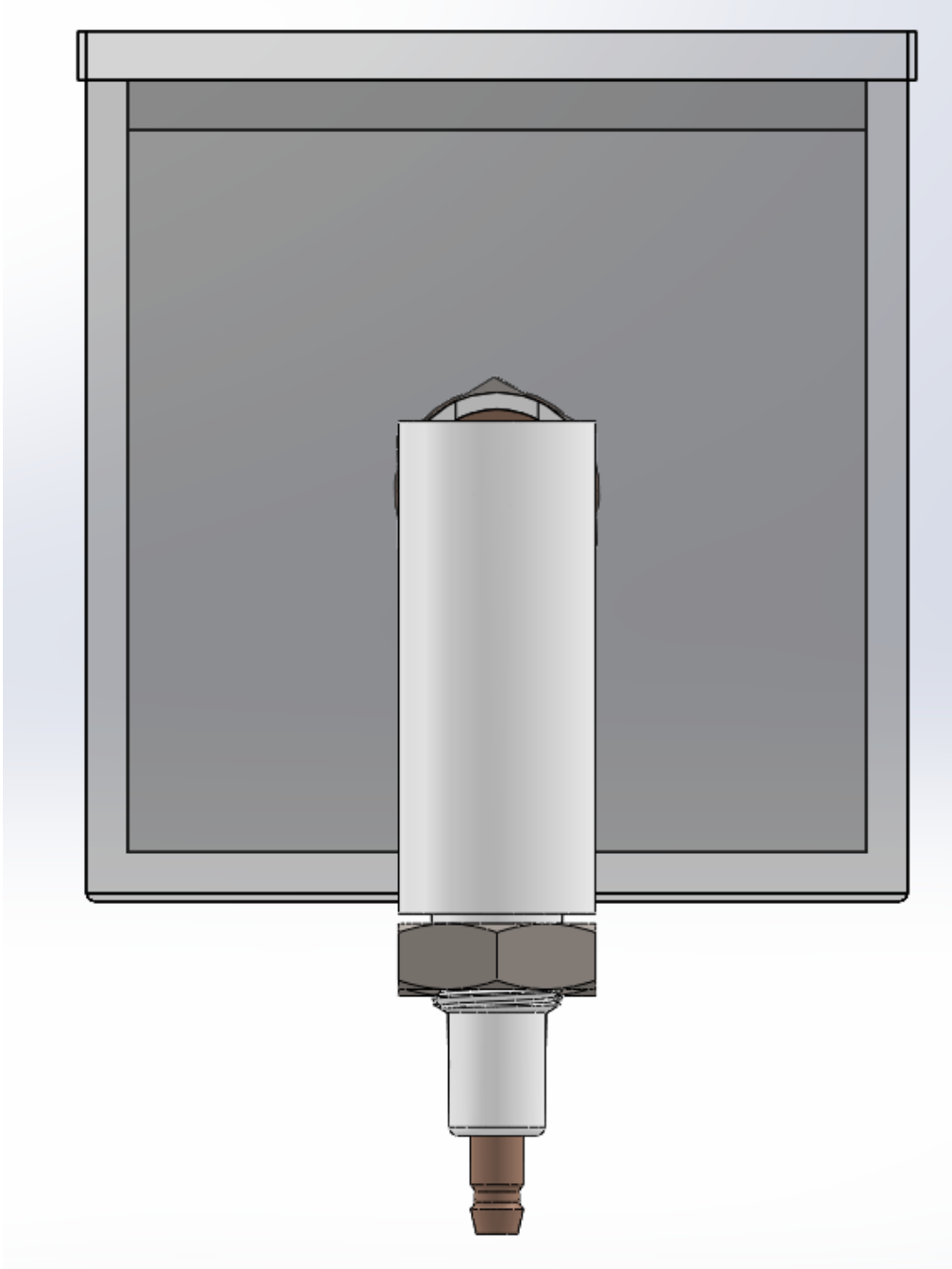


Figura 26: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista lateral

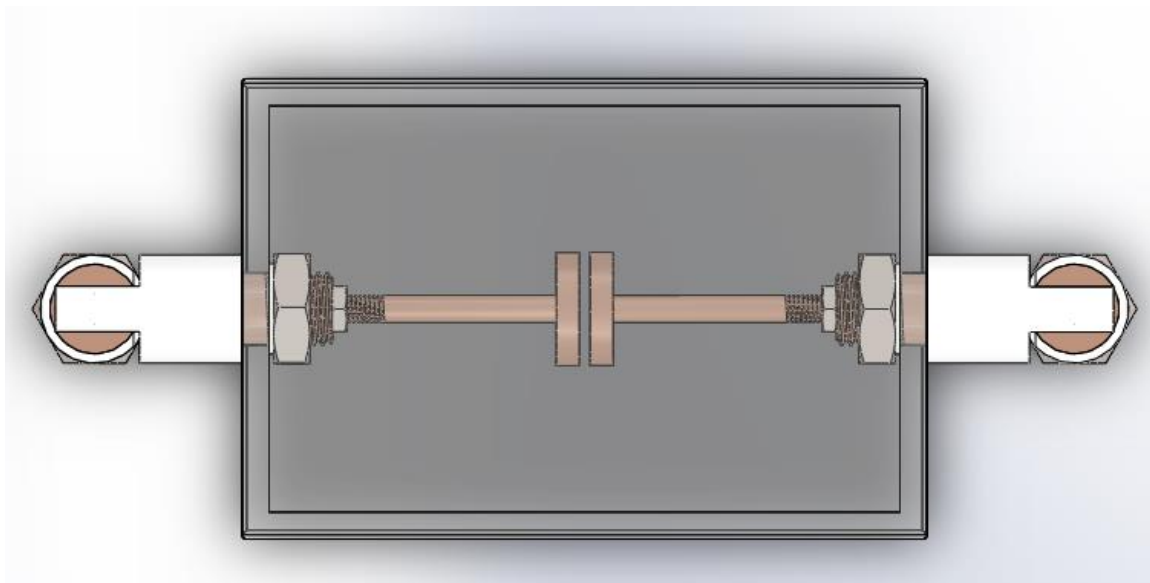


Figura 27: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Plana vista superior

➤ Ensamble Recipiente Aceite con Electrodo Cara Semiesférica

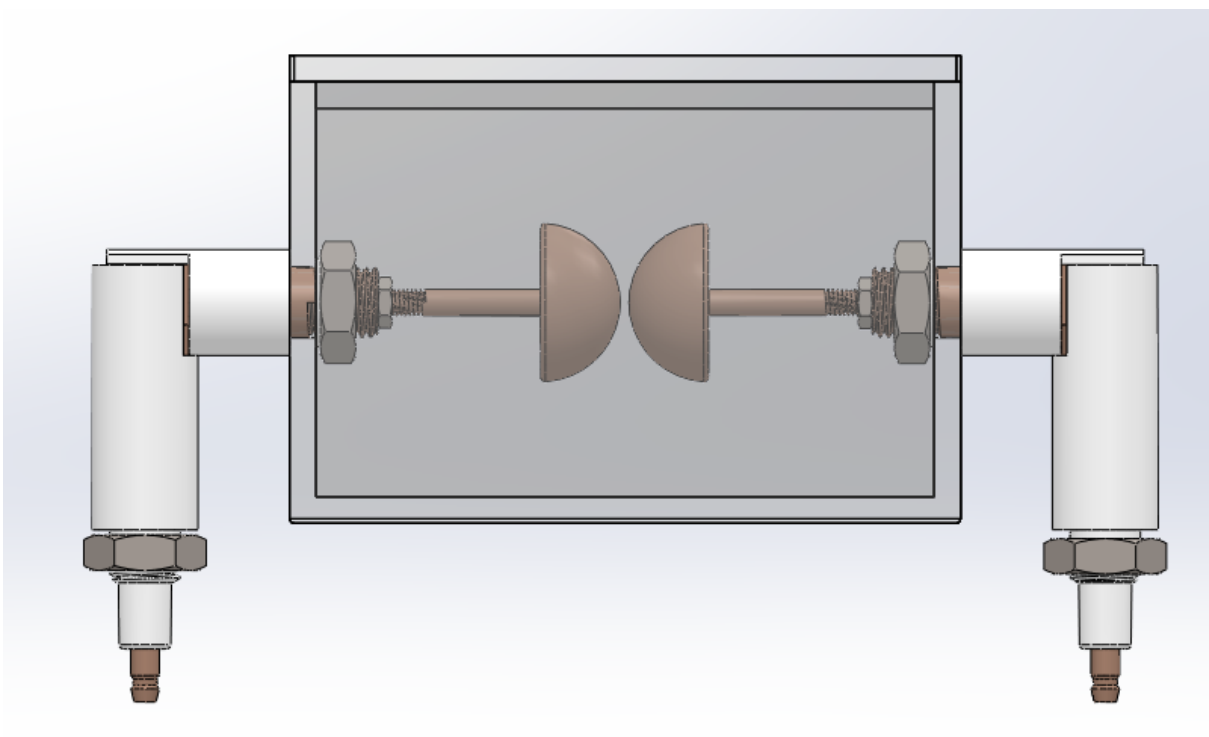


Figura 28: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista frontal

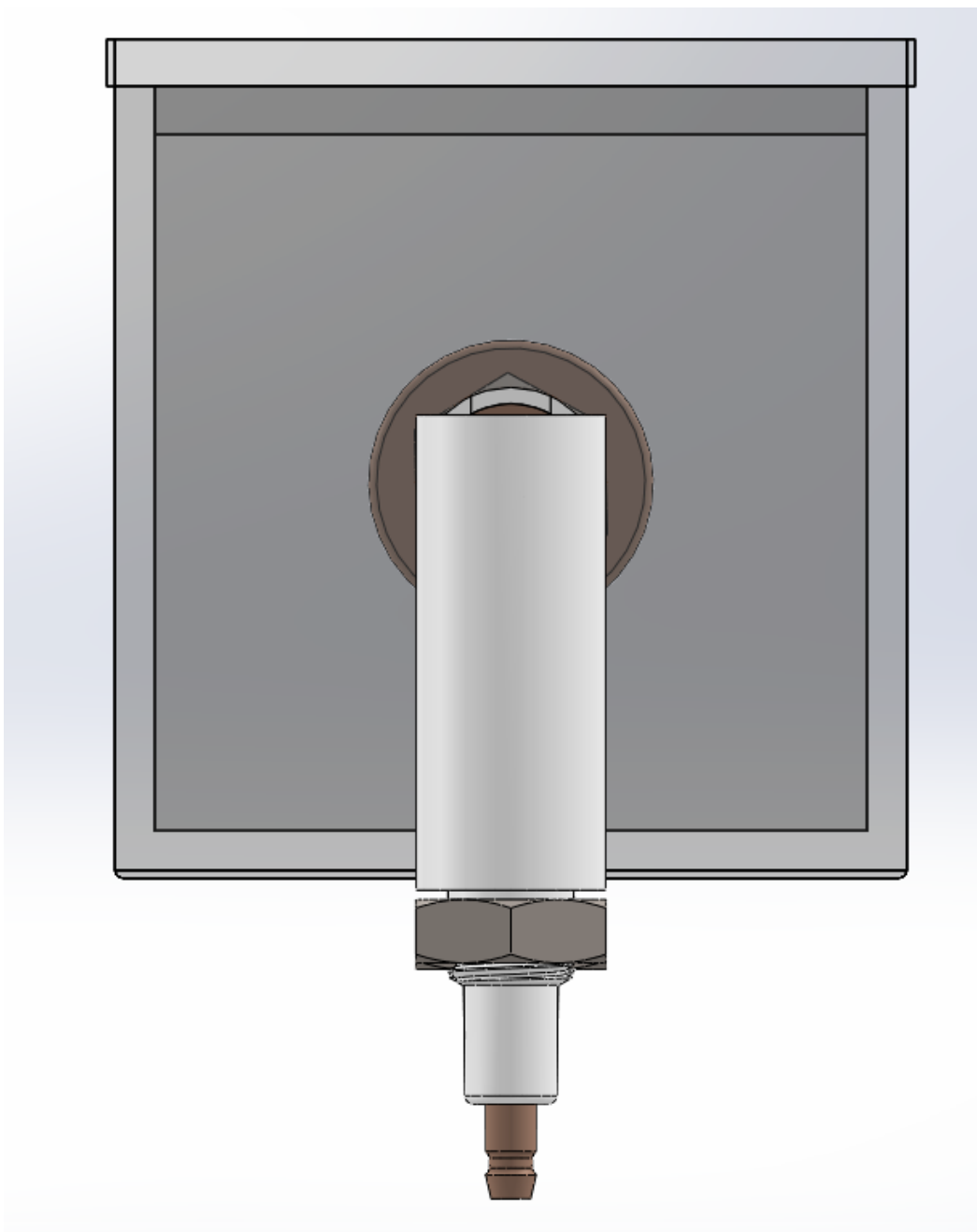


Figura 29: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista lateral

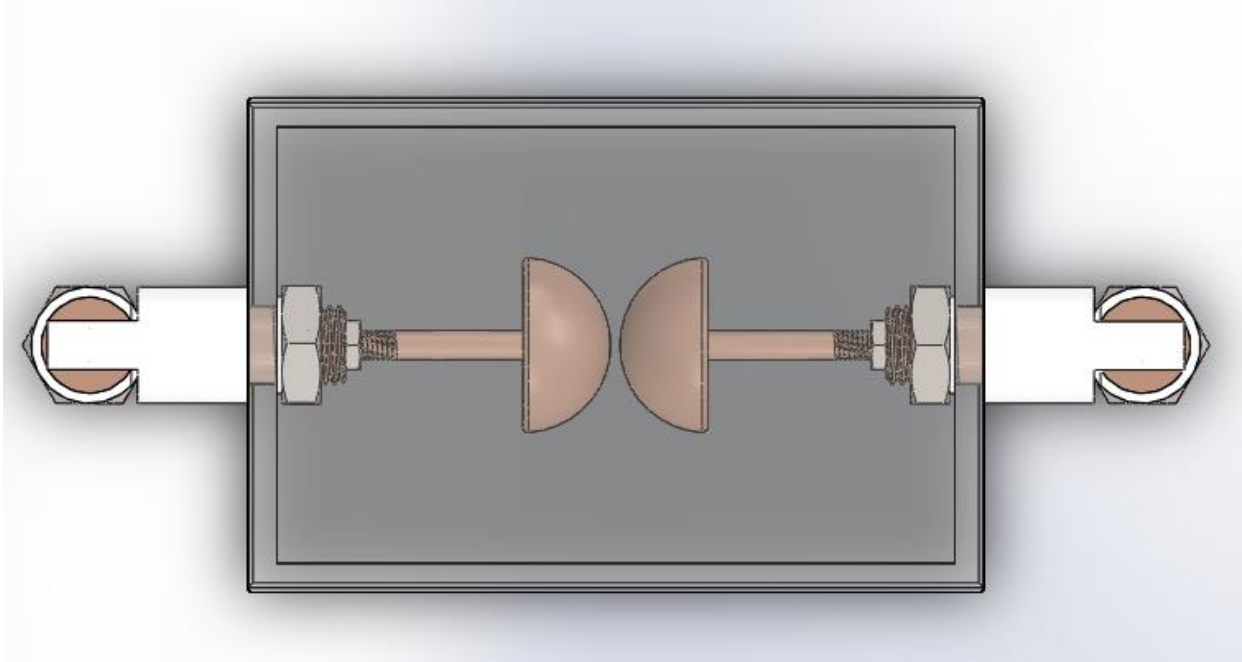


Figura 30: Ensamble Recipiente Aceite con Disco Cara Semiesférica vista superior

3.1.3 Diseño de la Estructura

Para el diseño de la forma de la estructura del equipo, se considera en primer lugar, equipos similares que se comercializan en el exterior, los cuales nos permiten tener una idea de la geometría a construir, en este prototipo de equipo. Es así que la forma de los equipos de medición de resistencia dieléctrica se puede apreciar en las siguientes figuras:



Figura 31: Ejemplo de Equipo de medición de Resistencia Dieléctrica Marca Amperis A-2
Fuente: (Amperis, 2017)



Figura 32: Ejemplo de Equipo de medición de Resistencia Dieléctrica Marca Baur
Fuente: (BAUR, 2016)

El material a utilizar en el diseño del prototipo de equipo de medición de resistencia dieléctrica será con tol de acero inoxidable de 1.2mm de espesor, para poder efectuar soldadura en las juntas y evitar el deterioro del equipo por efecto de la oxidación.

Diseño de las Tapas Lateral derecha e Izquierda:

El esquema de las tapas lateral izquierda y derecha se puede observar en la siguiente figura:

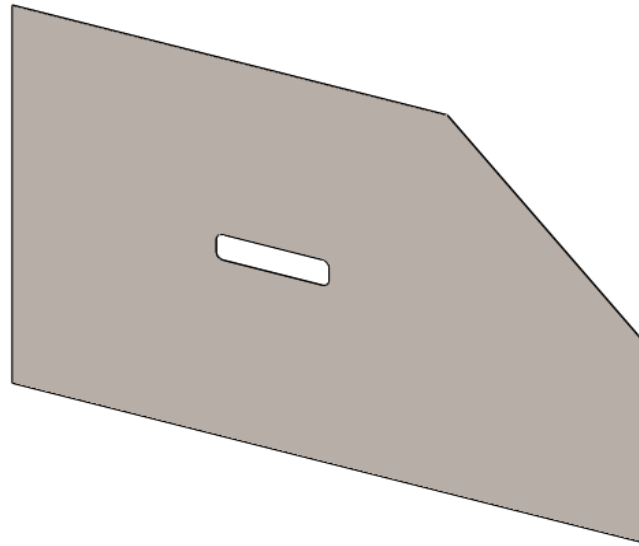


Figura 33: Esquema tapa lateral derecha e izquierda

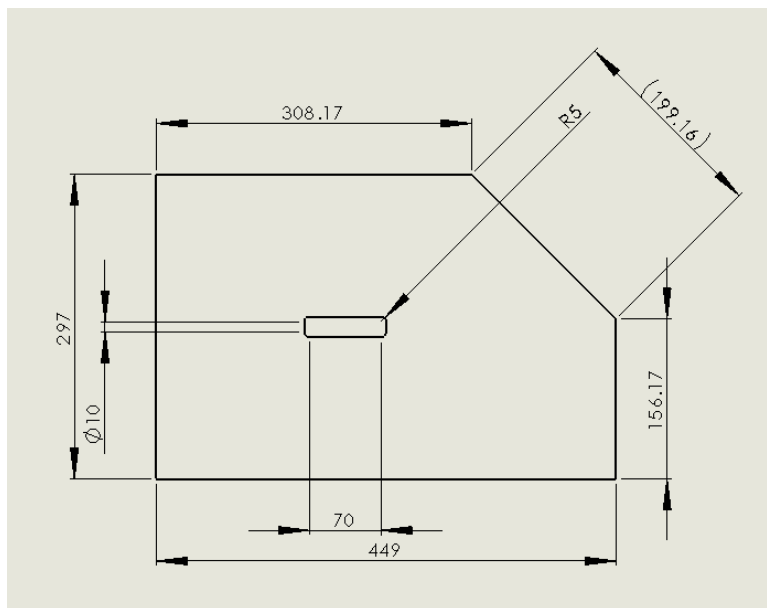


Figura 34: Esquema dimensional tapa lateral derecha e izquierda

Diseño de tapa Inferior:

El esquema de la tapa inferior se puede observar en la siguiente figura:

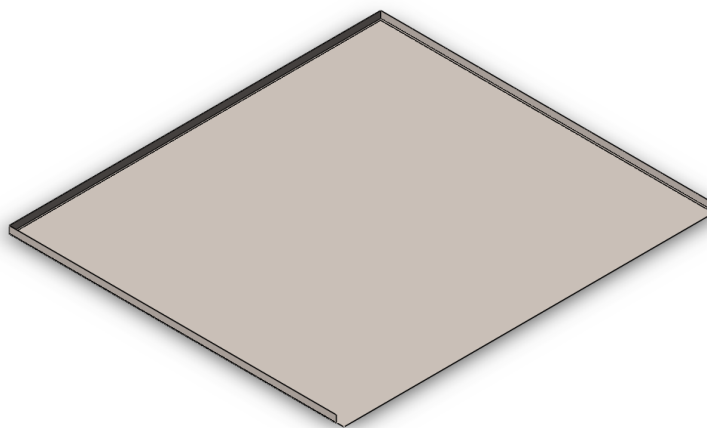


Figura 35: Esquema tapa inferior

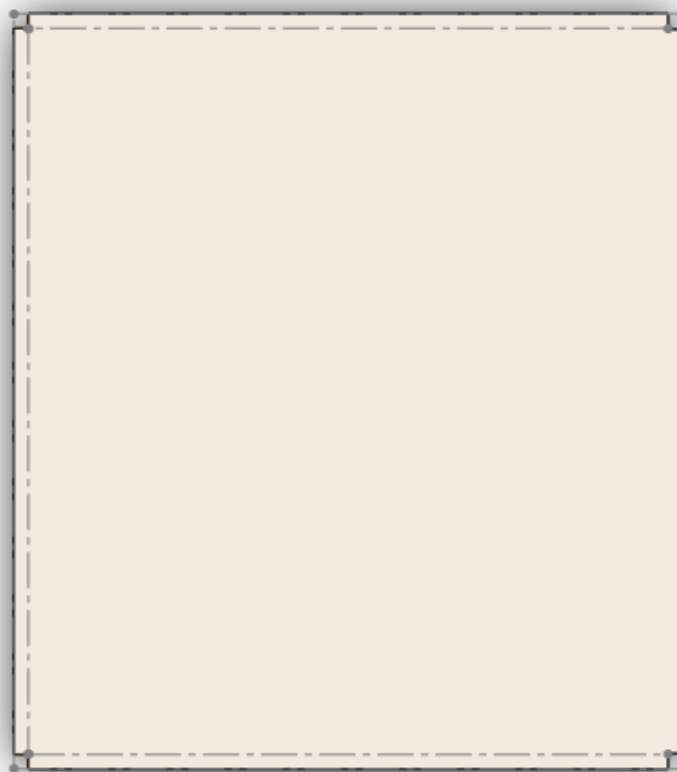


Figura 36: Esquema tapa inferior chapa metálica desplegada

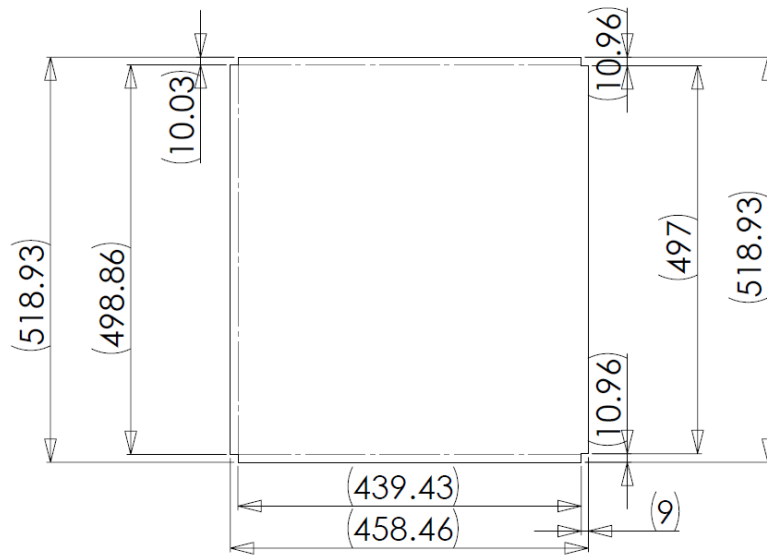


Figura 37: Esquema tapa inferior chapa metálica desplegada

Diseño de tapa Posterior:

El esquema de la tapa posterior se puede observar en la siguiente figura:

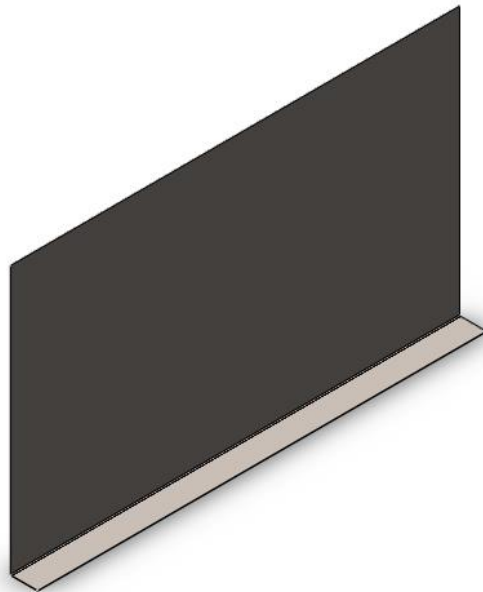


Figura 38: Esquema tapa posterior



Figura 39: Esquema tapa posterior chapa metálica desplegada

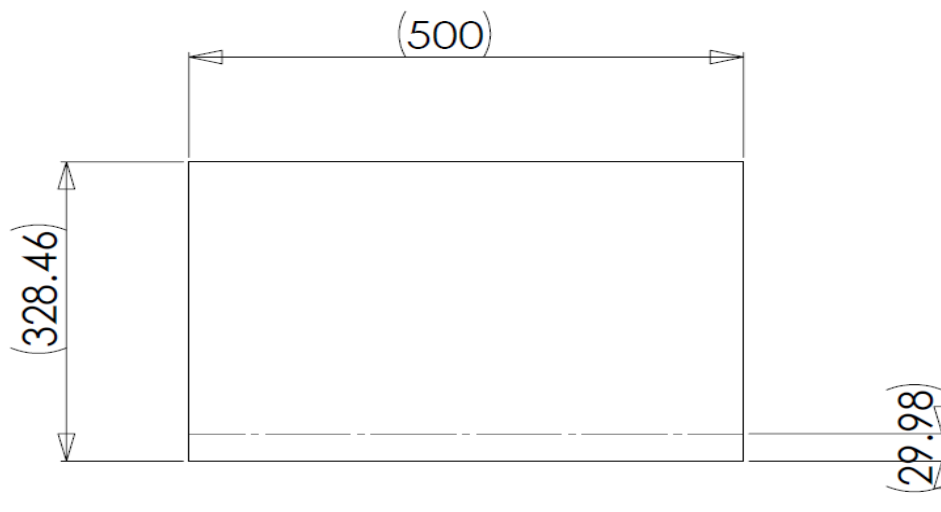


Figura 40: Esquema tapa posterior chapa metálica desplegada

Diseño de tapa Frontal:

La tapa frontal, será aquella en la cual se colocarán los componentes de accionamiento del sistema, como luces indicadoras, switch, paros de emergencia, pantalla hmi e impresora. El esquema de la tapa Frontal se puede observar en la siguiente figura:

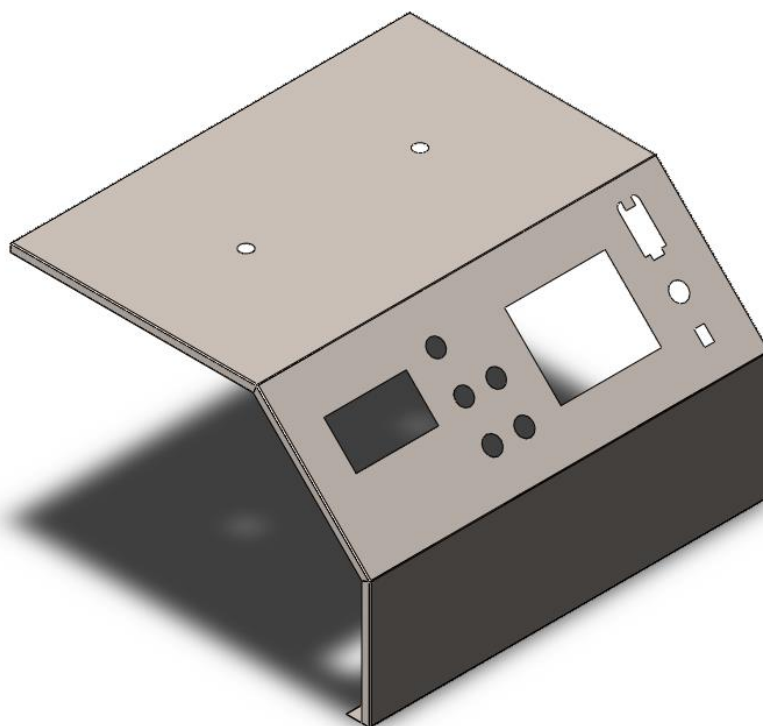


Figura 41: Esquema tapa frontal

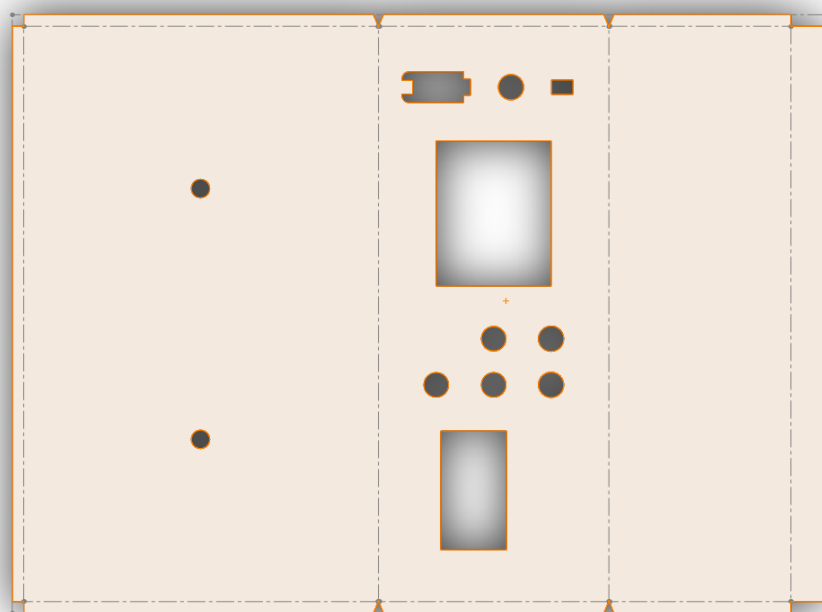


Figura 42: Esquema tapa frontal chapa metálica desplegada

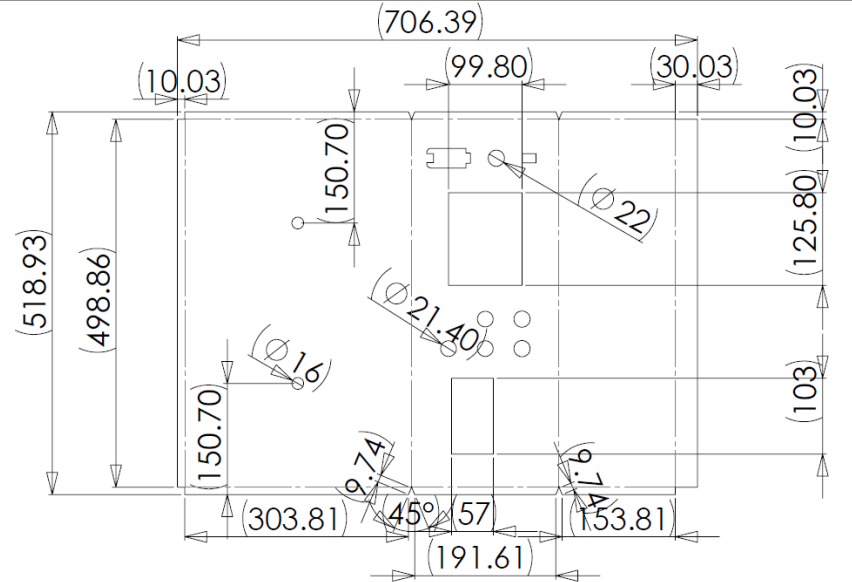


Figura 43: Esquema tapa frontal chapa metálica desplegada

Diseño de tapa Superior:

La tapa superior, será aquella en la cual proteja al recipiente contenedor de aceite. El esquema del ensamble de la tapa superior se puede observar en la siguiente figura:

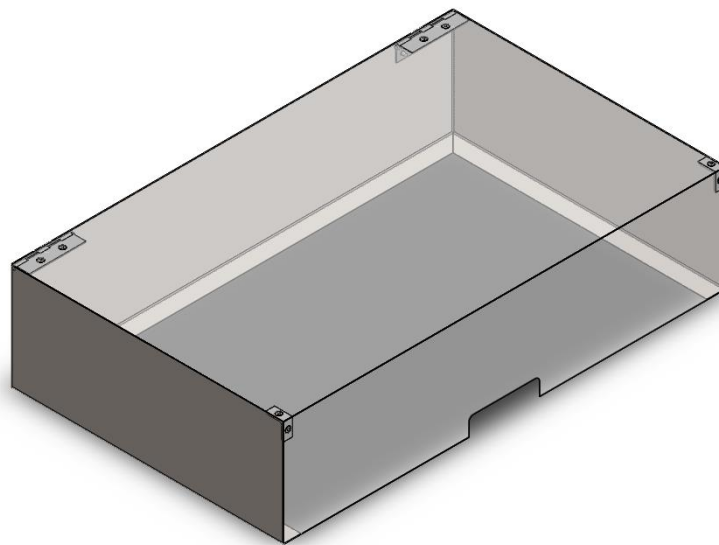


Figura 44: Esquema Ensamble tapa superior

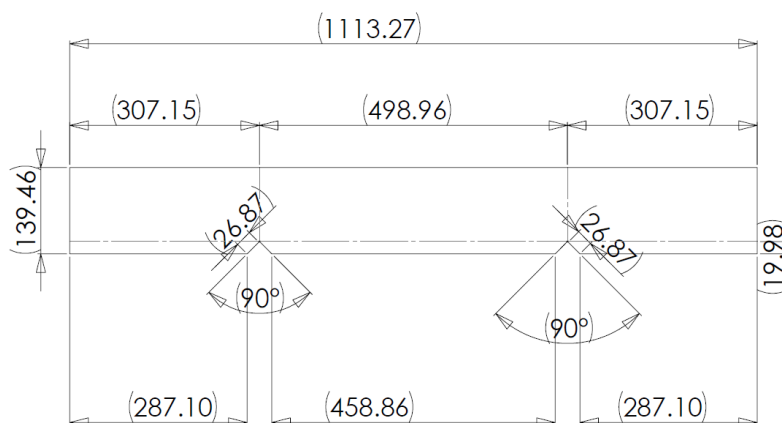


Figura 45: Esquema tapa superior chapa metálica desplegada

Ensamble total del Prototipo de Equipo Medición de resistencia dieléctrica

En la siguiente figura se puede observar el diseño CAD del equipo de medición de resistencia dieléctrica total, con todos sus componentes, así:

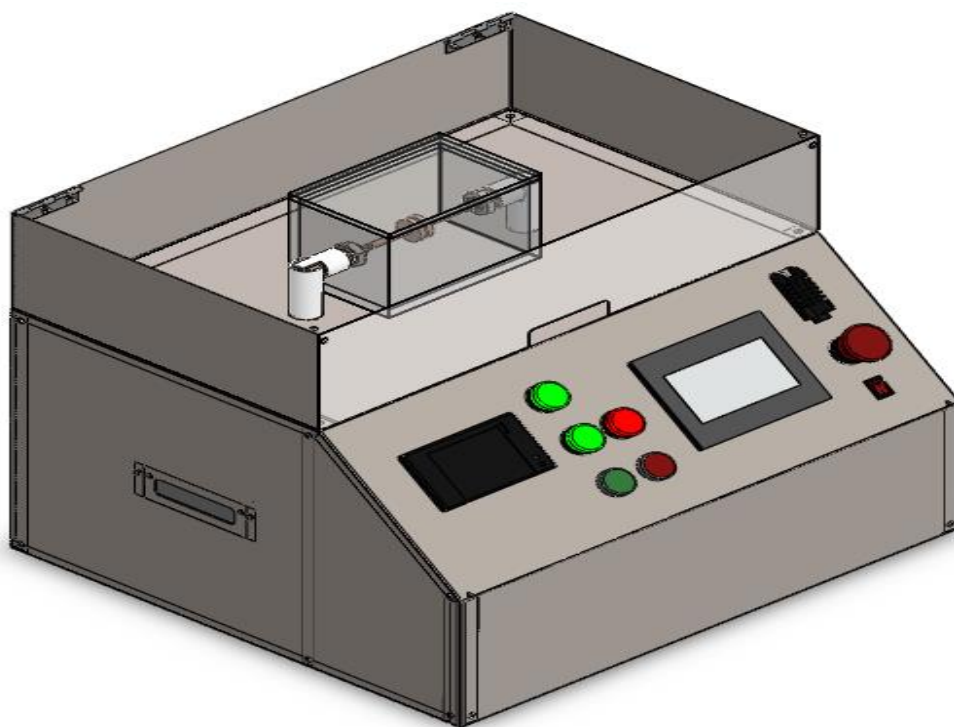


Figura 46: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista isométrica

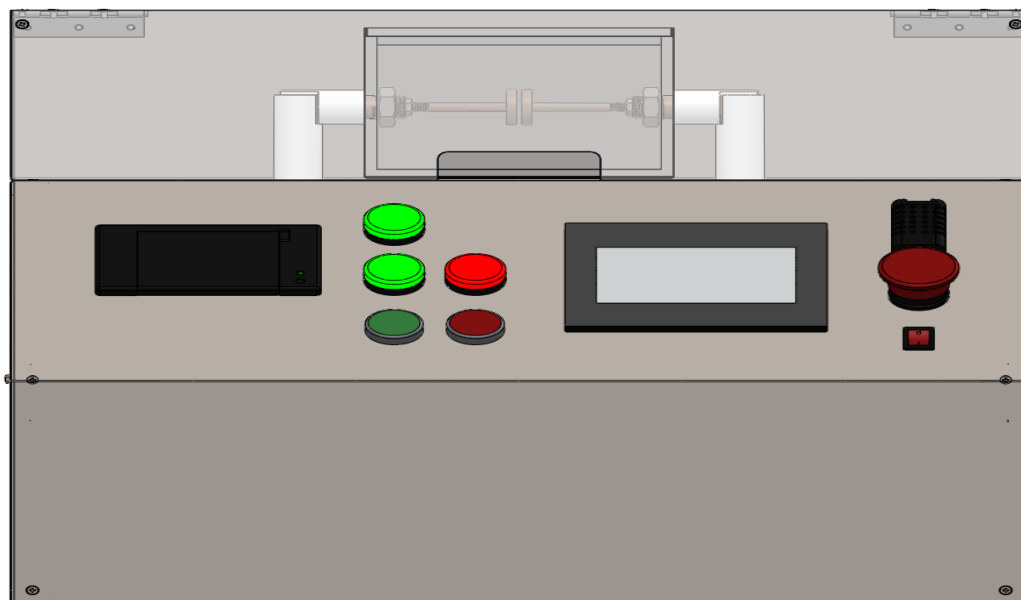


Figura 47: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista frontal

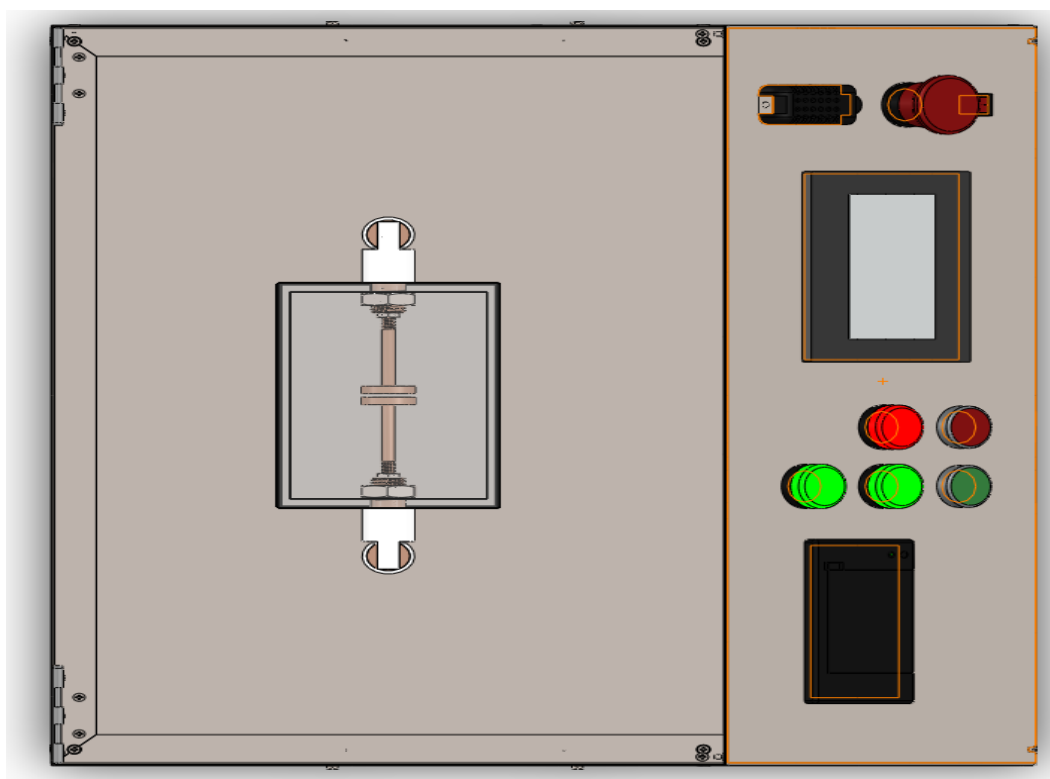


Figura 48: Ensamble total equipo medición resistencia dieléctrica vista superior

A continuación, en la siguiente figura se puede apreciar la distribución de los componentes constitutivos del equipo:

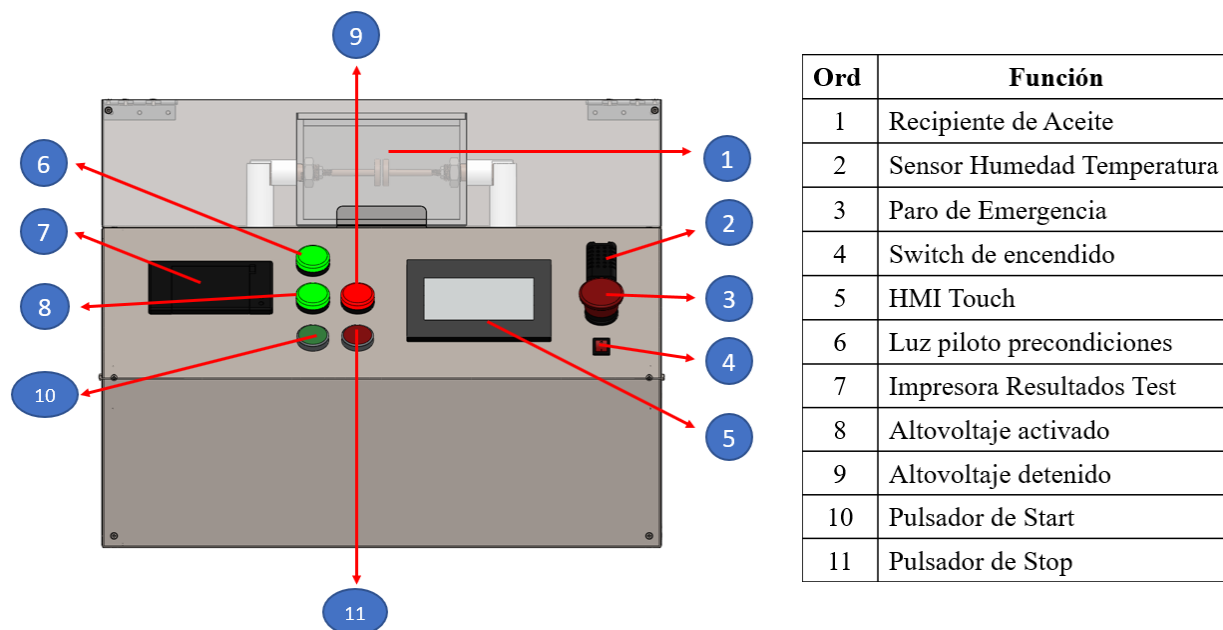


Figura 49: Distribución de Componentes del Equipo

3.2 Diseño de componentes eléctricos y electrónicos

3.2.1 Circuito generador de alto voltaje

Para la generación de alto voltaje se utilizará un transformador elevador con una relación de 1:1000, dado que el voltaje de entrada será regulado con un dimmer desde los 0-110 Voltios AC, el cual generará en el lado del transformador en su lado secundario un voltaje en el rango de los Kilovoltios.

El esquema de configuración del generador de alto voltaje se puede apreciar en la siguiente figura:

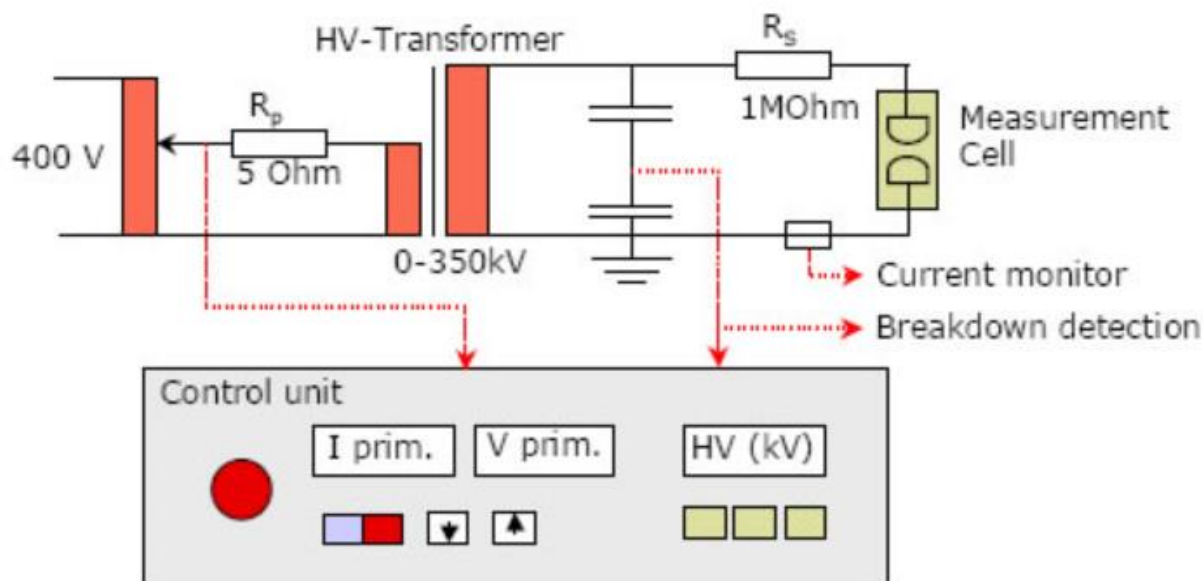


Figura 50: Esquema Generador de alto voltaje
Fuente: (Amperis, 2009)

Basándonos en el esquema planteado, el circuito del generador de alto voltaje es:

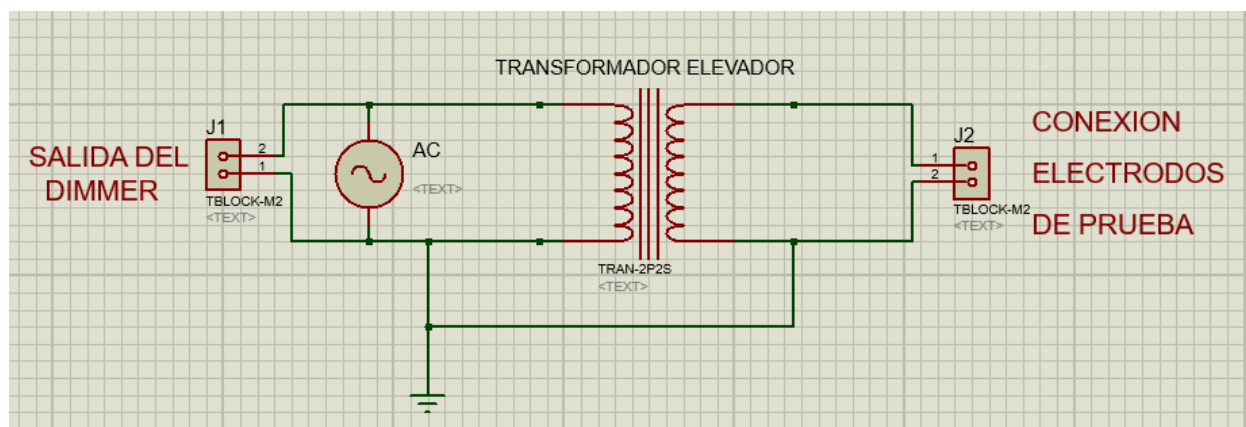


Figura 51: Circuito Eléctrico Generador de alto voltaje

Para el transformador de alto voltaje, se utilizará una bobina automotriz, las cuales tienen diferentes relaciones de transformación.

La bobina es un transformador de corriente eléctrica, al arrollamiento primario llega corriente alterna y salen al arrollamiento secundario miles de voltios. Consta de dos arrollamientos, primario y secundario, con una relación de espiras de 1 a 1000 aproximadamente, con grosores inversamente proporcionales a dichas longitudes, y un núcleo ferromagnético.

Para el sistema de control del accionamiento del test de prueba se utilizará el siguiente circuito, que permite detectar el salto de chispa en la cual se genera el voltaje de ruptura del aceite dieléctrico, así tenemos:

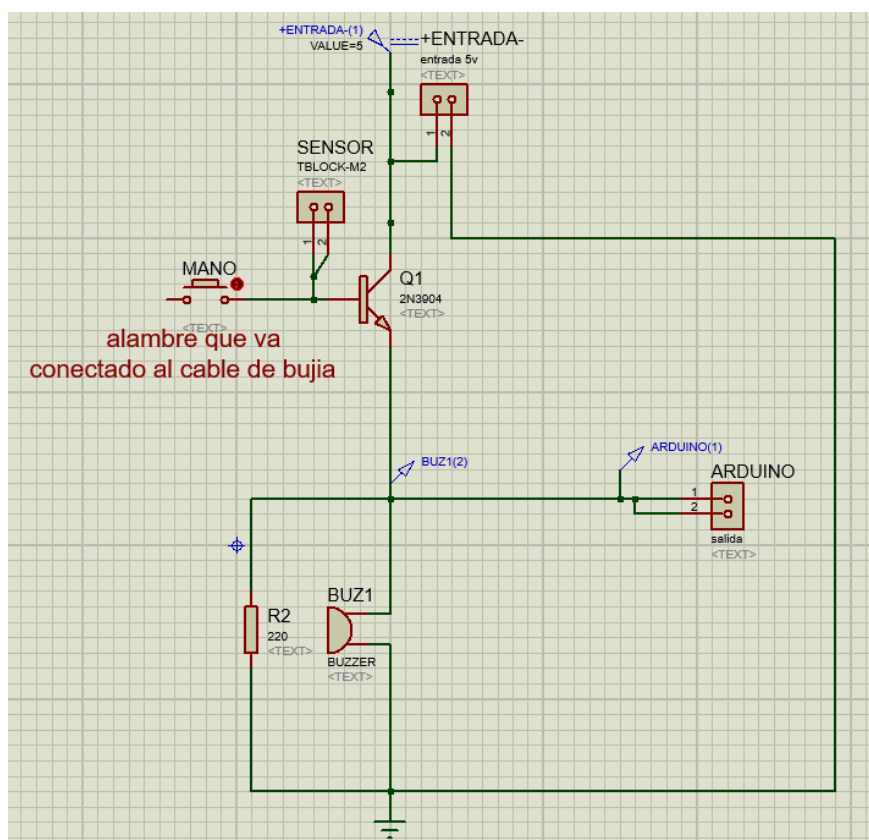


Figura 53: Circuito detector de Chispa

En el circuito 53 en el Tblock M2 se utilizará para conectar una bobina de cobre enrollada en el conductor de salida del generador de alto voltaje, en él se inducirá magnéticamente una

corriente eléctrica, el cual activará un transistor npn, permitiendo que el microcontrolador Arduino, dentro de su código de programación, detecte el instante en que se genera la ruptura del aceite dieléctrico entre los electrodos de prueba. Adicionalmente, para cuestiones de prueba del circuito detector de chispa, también se colocó un pulsador normalmente abierto, que permita simular la corriente sensada por el bobinado, facilitando las calibraciones y sentencias de programación del equipo.

3.2.2 Circuito del dimmer

Un dimmer, también conocido como regulador de intensidad, es un dispositivo de reducido tamaño cuya misión es la de regular y manipular la intensidad de luz que emite una bombilla, foco o un grupo de ellos, independientemente de su número.

El circuito del dimmer utilizado para regular el voltaje de entrada hacia la bobina para generar el alto voltaje se puede apreciar en la siguiente figura:

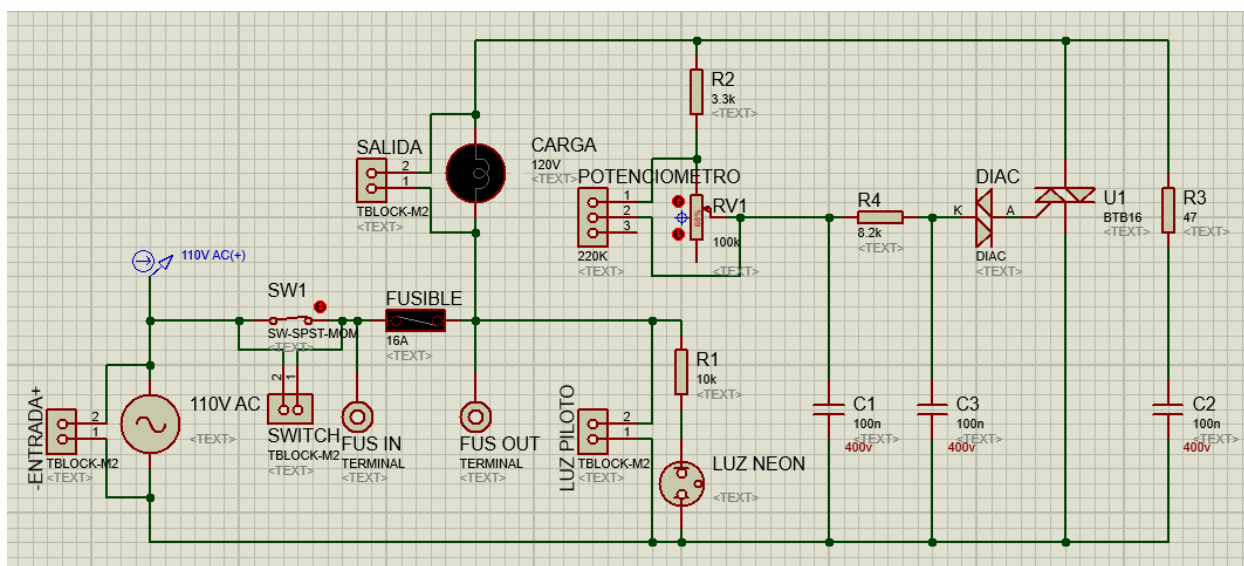


Figura 54: Circuito Electrónico del Dimmer

El circuito de la figura 54, básicamente permite realizar un control de fase de onda completa, en el cual el Diac gobierna la activación del Triac que alimenta en corriente alterna a la carga, la potencia que ésta recibe varía con el ángulo de conducción impuesto por la variación de la resistencia variable RV1.

Una vez que se aplica el voltaje de alimentación, en cuanto se presenta el primer semiciclo de la señal sinusoidal de la fuente alterna, el capacitor C1 empieza a cargarse a través de las resistencias en serie R2 + RV1.

Cuando en su carga alcanza el voltaje de ruptura del Diac (V_{B0} alrededor de 28 volts), este último entra en conducción y C1 se descarga sobre la puerta del Triac, que entonces se dispara y permite el flujo de corriente hacia la carga. Lo mismo ocurre en el semiciclo negativo de la señal alterna. La operación del circuito es idéntica en ambos sentidos, puesto que el Diac entra en conducción al mismo voltaje de ruptura en ambos sentidos de polarización.

La salida del dimmer se conecta al bobinado primario del transformador, cuyo valor medido en ohmios da 3.4Ω ; esquematizando el circuito eléctrico quedaría así:

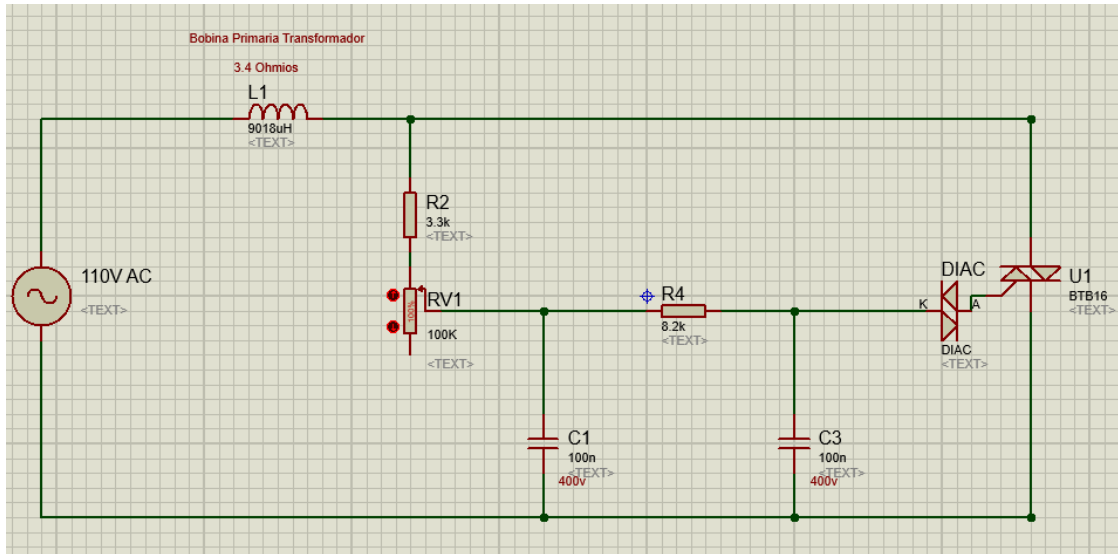


Figura 55: Esquema del Circuito Electrónico del Dimmer

Pasando al dominio fasorial los elementos tenemos:

$$110V_{ac} \cong 110 \sin(\omega t + \phi) \quad \text{donde } \omega = 2\pi f$$

$$\cong 110 \sin((2\pi f)t + 0)$$

$$\cong 110 \angle 0$$

$$C1 = 100nF \rightarrow \widehat{X}_{C1} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{(2\pi f) * 100 \times 10^{-9}}$$

$$\widehat{X}_{C1} = -j26.5 \text{ k}\Omega$$

$$L1 = 9.018 \times 10^{-3} H \rightarrow \widehat{X}_{L1} = j\omega L = j(2\pi f) * 9.018 \times 10^{-3}$$

$$\widehat{X}_{L1} = j3.4 \Omega$$

Quedando la primera malla así:

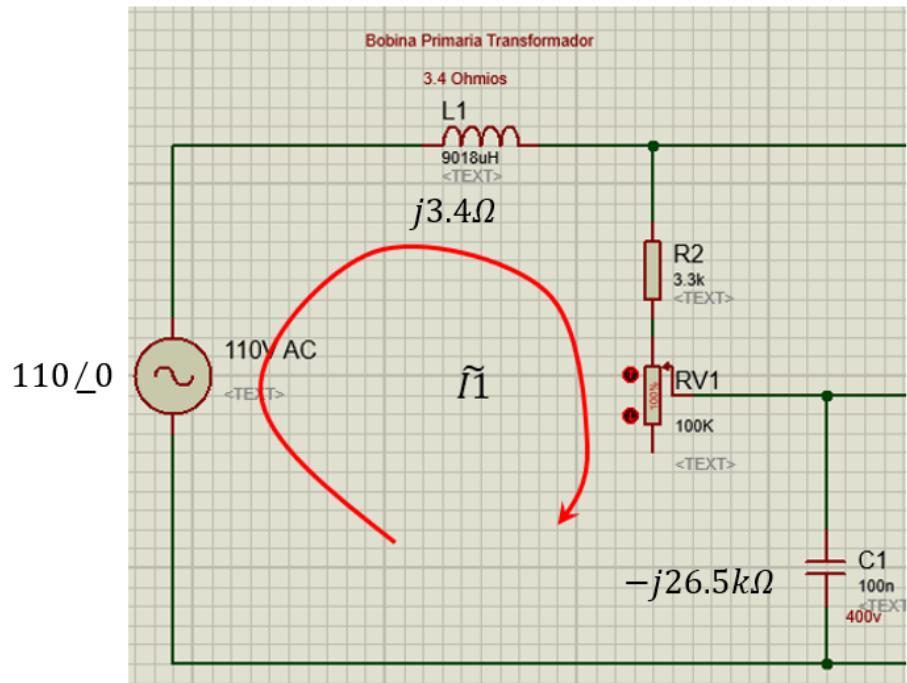


Figura 56: Malla 1 Circuito Dimmer

$$\tilde{I}_1 = \frac{110\angle 0}{j3.4 + 3.3k + 100k - j26.5k}$$

$$\tilde{I}_1 = \frac{110\angle 0}{103300 - j26500} = \frac{110\angle 0}{106644.92\angle -14.38}$$

$$\tilde{I}_1 = 1.03\angle 14.38 \text{ mA}$$

$$\tilde{V}_{c1} = \tilde{X}_{c1} * \tilde{I}_1$$

$$\tilde{V}_{c1} = 26500\angle -90 * 0.00103\angle 14.38$$

$$\tilde{V}_{c1} = 27.29\angle -75.62 \text{ V}$$

La segunda malla quedaría así:

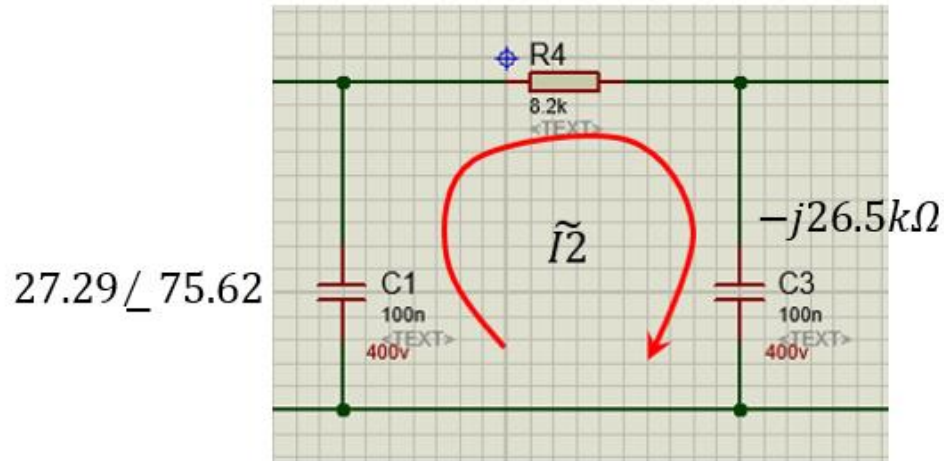


Figura 57: Malla 2 Circuito Dimmer

$$\tilde{V}_{c3} = \frac{\tilde{V}_{c1} * \tilde{X}_{c3}}{R_{eq}}$$

$$\tilde{V}_{c3} = \frac{27.29\angle - 75.62 * 26500\angle - 90}{8200 - j26500}$$

$$\tilde{V}_{c3} = \frac{723185\angle - 165.62}{27739.68\angle - 72.80}$$

$$\tilde{V}_{c3} = 26.07\angle - 92.82 \text{ V}$$

$$\tilde{I}_2 = \frac{27.29\angle - 75.62}{27739.68\angle - 72.80}$$

$$\tilde{I}_2 = 0.983\angle - 2.82 \text{ mA}$$

Las características del DIAC y del TRIAC son las siguientes:

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions		SMDB3	DB3	DB4	Unit
V_{BO}	Breakover voltage *	$C = 22\text{nF}^{**}$	MIN.	28	28	35	V
			TYP.	32	32	40	
			MAX.	36	36	45	
$ V_{BO1} - V_{BO2} $	Breakover voltage symmetry	$C = 22\text{nF}^{**}$	MAX.	3			V
ΔV	Dynamic breakover voltage *	V_{BO} and V_F at 10mA	MIN.	10	5		V
V_O	Output voltage *	see diagram 2 ($R=20\Omega$)	MIN.	10	5		V
I_{BO}	Breakover current *	$C = 22\text{nF}^{**}$	MAX.	10	50		μA
t_r	Rise time *	see diagram 3	MAX.	0.50	2		μs
I_R	Leakage current *	$V_R = 0.5 V_{BO}$ max	MAX.	1	10		μA
I_P	Peak current *	see diagram 2 (Gate)	MIN.	1	0.30		A

* Applicable to both forward and reverse directions.

** Connected in parallel to the device.

Figura 58: Características Eléctricas del DIAC DB3
Elaborado por: (STMicroelectronics, 2001)

■ STANDARD (4 Quadrants)

Symbol	Test Conditions	Quadrant		BTA/BTB16		Unit
				C	B	
$I_{GT}(1)$	$V_D = 12\text{V}$ $R_L = 33\Omega$	I - II - III IV	MAX.	25 50	50 100	mA
V_{GT}		ALL	MAX.	1.3		
V_{GD}	$V_D = V_{DRM}$ $R_L = 3.3\text{k}\Omega$ $T_J = 125^\circ\text{C}$	ALL	MIN.	0.2		V
$I_H(2)$	$I_T = 500\text{mA}$		MAX.	25	50	mA
I_L	$I_G = 1.2 I_{GT}$	I - III - IV	MAX.	40	80	
		II			80	120
$dV/dt(2)$	$V_D = 67\% V_{DRM}$ gate open $T_J = 125^\circ\text{C}$		MIN.	200	400	V/ μs
$(dI/dt)_c(2)$	$(dI/dt)_c = 7\text{A/ms}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$		MIN.	5	10	V/ μs

Figura 59: Características Eléctricas del TRIAC BTB16
Elaborado por: (STMicroelectronics, 2001)

Adicional, se determinará los ángulos de disparo máximo y mínimo determinado por el voltaje de ruptura del DIAC DB3.

El voltaje nominal de ruptura mínimo de del DIAC es:

$$V_{BO} = 28V$$

El voltaje de alimentación del circuito del dimmer está determinado por $V_{rms} = 110V$ cuyo voltaje pico en el dominio temporal:

$$V_{(t)} = V_p \sin(\omega t)$$

Donde

$$V_p = \sqrt{2}V_{rms}$$

$$V_p = \sqrt{2}(110)$$

$$V_p = 155.56 \text{ Vpico}$$

El mínimo ángulo de disparo del DIAC ocurre cuando el voltaje de alimentación iguala al voltaje de ruptura, esto ocurre, cuanto más baja sea la resistencia en serie con el capacitor ($RV1=0$) menor será la constante de tiempo ($R2C1$, cuando $RV1 =0$) y el voltaje en el capacitor alcanzará más rápidamente el valor de voltaje de ruptura del Diac (V_{B0}) y el TRIAC se disparará pronto en el semiciclo.

$$V_{(t)} = V_{BO}$$

$$V_p \sin(\omega t) = V_{BO}$$

$$\omega t = \sin^{-1}\left(\frac{28}{155.56}\right)$$

$$\omega t = 10.36^\circ$$

$\therefore \alpha_1 = 10.36^\circ$ ángulo mínimo de disparo

Inversamente cuanto mayor sea la resistencia en serie (RV1 máxima), la constante de tiempo será mayor $((R2 + RV1) C1)$; El capacitor C1 tardará más en cargarse al voltaje de ruptura del Diac, y el Triac se disparará más tarde entregando menos corriente.

Ahora, el máximo ángulo de disparo se producirá cuando el voltaje de alimentación caiga por debajo del voltaje de ruptura al pasar hacia su semiciclo negativo. Debido a que una onda senoidal es simétrica con respecto a un ángulo de 90° en que alcanza su máxima amplitud, entonces el máximo ángulo de disparo α_2 será:

$$\alpha_2 = 180 - \alpha_1$$

$$\alpha_2 = 180 - 10.36$$

$$\alpha_2 = 169.64^\circ \text{ ángulo máximo de disparo}$$

Considerando que se está utilizando un motor a pasos para el control del potenciómetro del dimmer, el cual gira 0.087890625 grados por paso, tenemos que para alcanzar un voltaje de 110Vac , el motor a pasos necesita 3413 pasos así:

$$1 \text{ pasos} \rightarrow 0.087890625^\circ$$

$$3413 \text{ pasos} \rightarrow x = 299.97^\circ$$

Es necesario determinar, cuantos pasos del motor se necesitan para alcanzar el ángulo máximo de disparo del TRIAC, ya que el potenciómetro RV1 inicia con su valor máximo de 100K .

$$299.97^\circ \rightarrow 3413 \text{ pasos}$$

$$169.64 \rightarrow x = ?$$

$$x = \frac{169.64 * 3413}{299.97}$$

$x = 1930.13$ *cantidad de pasos para alcanzar el ángulo máximo de disparo*

Como al alcanzar los 3413 pasos el potenciómetro mide 0 ohmios, y la posición inicial del circuito del dimmer empieza con RV1 con su valor máximo de 100K, entonces la cantidad de pasos que se necesita para la ruptura es:

$$\text{Pasos ruptura Triac} = 3413 - 1930.13$$

$$\text{Pasos ruptura Triac} = \mathbf{1482.87}$$

Es decir, una vez iniciado el testeado del aceite con el equipo, cuando el motor a pasos alcance los 1482.87 pasos, se producirá la ruptura del Triac, comenzando el incremento de voltaje en la salida del dimmer que se conectara al bobinado primario del transformador. Esto se lo puede corroborar con la Tabla 4: Toma de datos de voltajes de salida del dimmer según número de pasos del motor más adelante

Considerando las características del DIAC DB3 cuyo voltaje para alcanzar la ruptura min es de 28V y que requiere una corriente de 0.05 mA de ruptura, y considerando la corriente máxima que necesita del Gate del TRIAC BTB16 de 25 mA activarlo, con los valores obtenidos en los cálculos, se puede garantizar que bajo la configuración actual del circuito del dimmer, se podrá efectuar un control de fase para realizar el incremento del voltaje de salida que ingresará al bobinado primario del transformador elevador.

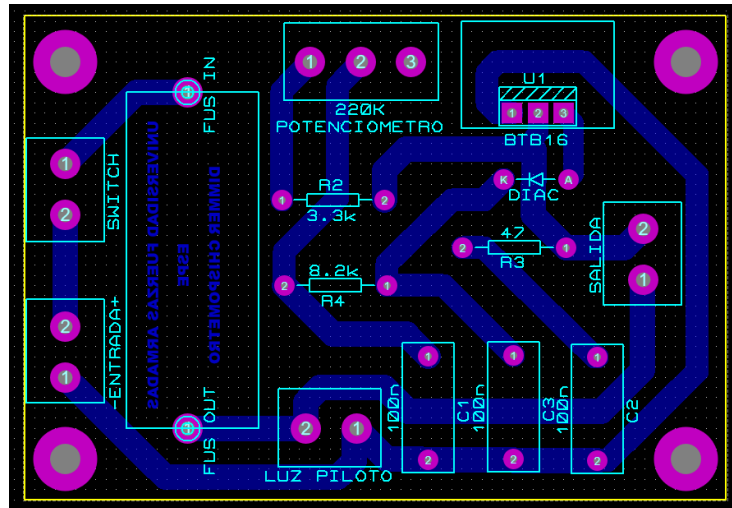


Figura 60: Pcb Circuito Electrónico del Dimmer

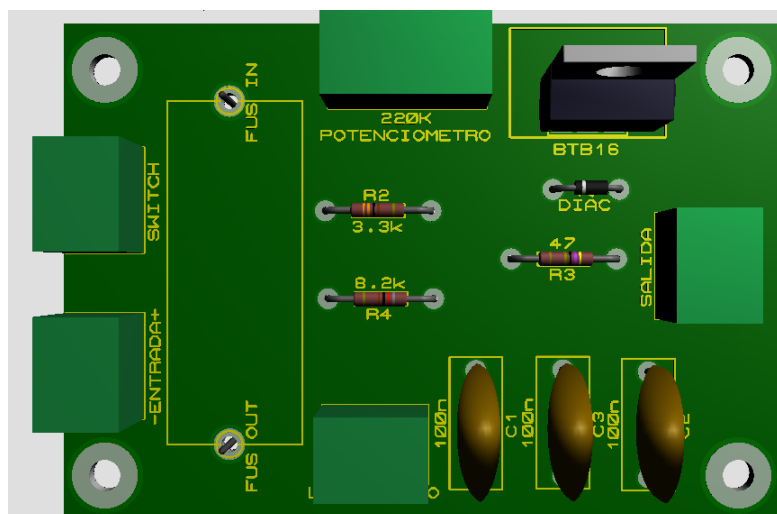


Figura 61: Circuito Electrónico del Dimmer en 3D

Debido a que el dimmer realizará la regulación continua del nivel de voltaje AC que ingrese al lado del bobinado primario del transformador de alto voltaje, es necesario determinar la curva característica del comportamiento del dimmer, mediante una función polinomial, función que permitirá interpretar a través del microcontrolador del arduino en su programación, cual es el voltaje inducido en la bobina del secundario mediante la relación de transformación de 1:1000

Toma de datos y Obtención de la curva característica

En la siguiente tabla, se indican los valores obtenidos del voltaje de salida del dimmer versus el número de pasos del motor a pasos, así:

Tabla 4

Toma de datos de voltajes de salida del dimmer según número de pasos del motor

Pasos Motor	Voltaje [V]	Pasos Motor	Voltaje [V]	Pasos Motor	Voltaje [V]
0	0	2000	42.4	2713	85.2
288	0.083	2017	43.5	2730	86.1
810	0.085	2033	44.8	2748	86.2
1045	0.086	2050	45.6	2768	86.4
1188	0.087	2075	47.3	2788	87.3
1422	0.1	2089	48.2	2802	88.1
1473	3.8	2106	49.02	2821	89.1
1478	12	2131	50.06	2838	89.9
1491	13	2149	51.7	2852	90.8
1505	14	2171	52.9	2869	91.4
1522	15	2193	54.4	2891	93.1
1536	15.83	2208	55.2	2910	93.7
1565	16.27	2231	55.3	2928	96.5
1580	17.14	2254	56.2	2951	97.6
1596	18.4	2278	57.8	2972	98.5
1611	18.8	2296	59.2	2988	99.3
1628	20.2	2315	60.6	3004	100.1
1640	22.79	2338	61.8	3017	100.8
1659	22.9	2356	62.8	3037	101.8
1676	23.26	2379	64.2	3055	102.7
1695	24.97	2398	65.4	3075	104.6
1711	26.3	2422	66.8	3093	105.3
1731	27.17	2442	68.1	3111	106.1
1747	27.8	2460	68.6	3130	106.8
1766	28.83	2483	72.1	3151	107.7
1784	29.3	2496	72.5	3171	108.5
1805	30.67	2513	73.2	3191	109.6
1823	31.1	2525	74.4	3211	110.1
1843	32.2	2545	75.1	3228	110.2
1862	33.16	2562	76.7	3251	110.3
1883	34.74	2578	77.7	3274	110.4
1906	36.17	2599	78.7	3298	110.6
1928	36.5	2620	79.8	3322	110.6
1947	38.08	2643	81.3	3345	110.6
1966	38.9	2664	83.2	3379	110.6
1984	39.7	2688	84.5	3413	110.7

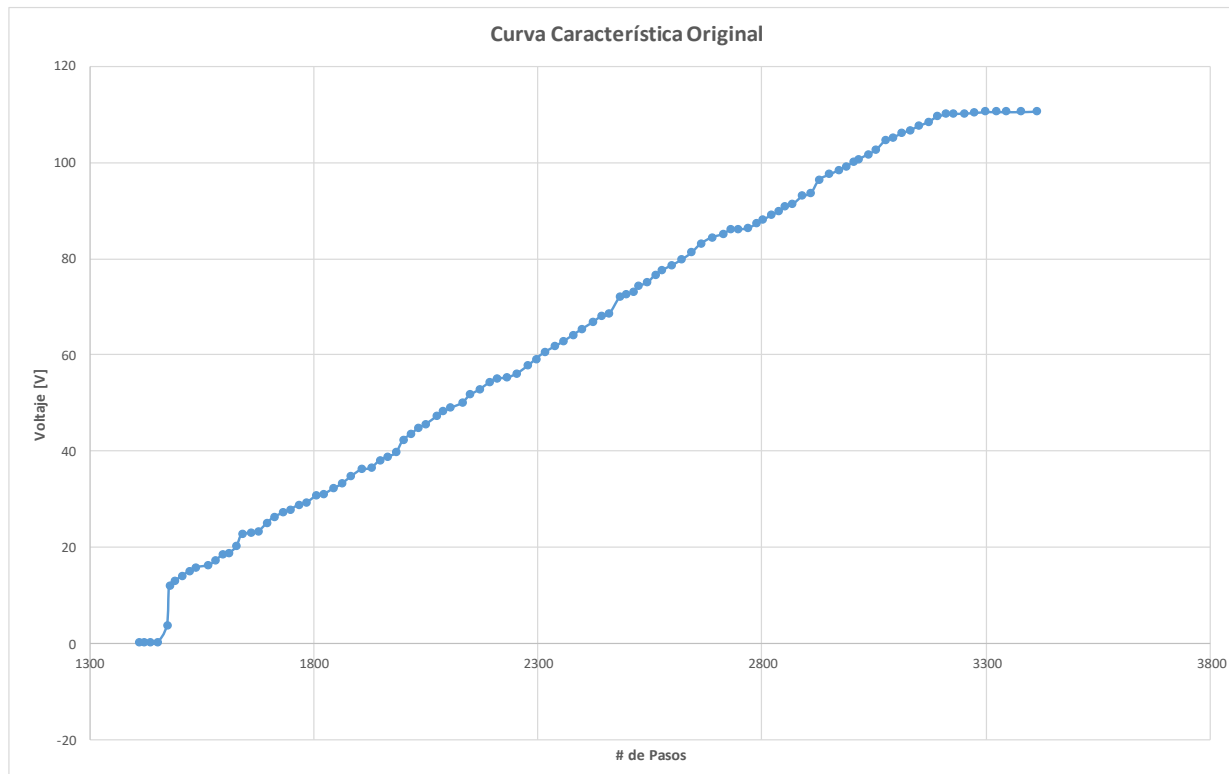


Figura 62: Curva Característica Original del Dimmer

Suavizando la Curva Característica

Mediante la utilización del programa de Matlab se procedió a suavizar la curva haciendo uso del comando `cftool` a partir de los datos obtenidos, observándose en la siguiente tabla a continuación:

Tabla 5

Datos de curva suavizada de voltaje de salida según pasos del motor

Pasos Motor	Voltaje [V]	Pasos Motor	Voltaje [V]	Pasos Motor	Voltaje [V]
0	0	2000	42.4	2713	85.2
288	0.083	2017	43.5	2730	86.1
810	0.085	2033	44.8	2748	86.2
1045	0.086	2050	45.6	2768	86.4
1188	0.087	2075	47.3	2788	87.3
1422	0.1	2089	48.2	2802	88.1
1473	3.8	2106	49.02	2821	89.1

CONTINÚA

1478	12	2131	50.06	2838	89.9
1491	13	2149	51.7	2852	90.8
1505	14	2171	52.9	2869	91.4
1522	15	2193	54.4	2891	93.1
1536	15.83	2208	55.2	2910	93.7
1565	16.27	2231	55.3	2928	96.5
1580	17.14	2254	56.2	2951	97.6
1596	18.4	2278	57.8	2972	98.5
1611	18.8	2296	59.2	2988	99.3
1628	20.2	2315	60.6	3004	100.1
1640	22.79	2338	61.8	3017	100.8
1659	22.9	2356	62.8	3037	101.8
1676	23.26	2379	64.2	3055	102.7
1695	24.97	2398	65.4	3075	104.6
1711	26.3	2422	66.8	3093	105.3
1731	27.17	2442	68.1	3111	106.1
1747	27.8	2460	68.6	3130	106.8
1766	28.83	2483	72.1	3151	107.7
1784	29.3	2496	72.5	3171	108.5
1805	30.67	2513	73.2	3191	109.6
1823	31.1	2525	74.4	3211	110.1
1843	32.2	2545	75.1	3228	110.2
1862	33.16	2562	76.7	3251	110.3
1883	34.74	2578	77.7	3274	110.4
1906	36.17	2599	78.7	3298	110.6
1928	36.5	2620	79.8	3322	110.6
1947	38.08	2643	81.3	3345	110.6
1966	38.9	2664	83.2	3379	110.6
1984	39.7	2688	84.5	3413	110.7

A partir de los datos obtenidos para el suavizado de la curva característica, se obtendrá la función polinomial de grado 5, como se aprecia en la siguiente figura:

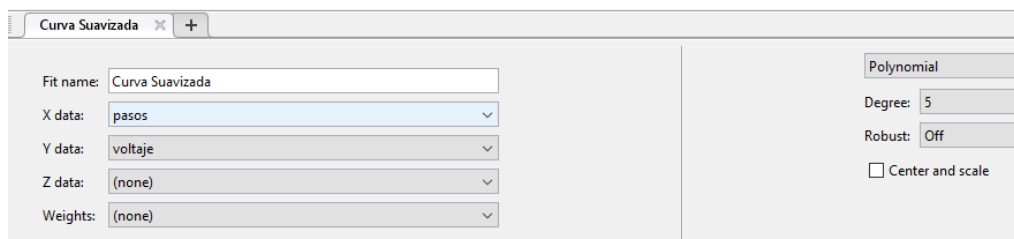


Figura 63: Ingreso datos matlab para obtener función polinomial grado 5

La función polinomial obtenida se puede apreciar en la siguiente figura:

Linear model Poly5:
 $f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6$
 Coefficients (with 95% confidence bounds):
 p1 = 3.239e-15 (-9.819e-16, 7.46e-15)
 p2 = -3.034e-11 (-6.888e-11, 8.204e-12)
 p3 = 9.513e-08 (-3.401e-08, 2.243e-07)
 p4 = -9.874e-05 (-0.0002898, 9.228e-05)
 p5 = 0.02906 (-0.08445, 0.1426)
 p6 = -0.5206 (-18.85, 17.81)

Goodness of fit:
 SSE: 9420
 R-square: 0.9274
 Adjusted R-square: 0.9239
 RMSE: 9.61

Figura 64: Función Polinomial de grado 5

Dando como resultado la siguiente Curva suavizada.

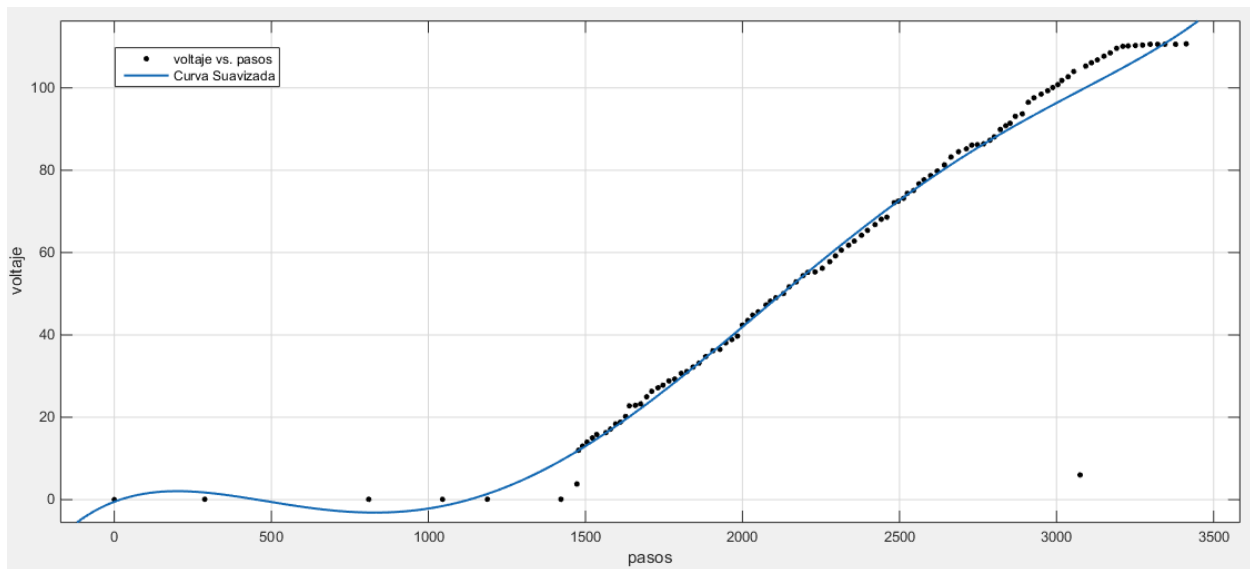


Figura 65: Curva Característica del Dimmer Suavizada

En base a la función polinomial de grado 5, se podrá determinar el voltaje de salida del circuito de potencia del dimmer en base a la posición del eje del motor a pasos, que alimentará al transformador elevador para alcanzar el voltaje de salida aproximadamente de 60Kv para efectuar el testeo en la muestra de aceite.

3.2.3 Circuito agitador de aceite

Esta determinado, que cuando se ejecute la prueba de rigidez dieléctrica con electrodos de caras semiesféricas, se debe proceder a realizar la agitación de la mezcla de aceite, para lo cual se utilizará una pastilla ferromagnética que girará en el recipiente de aceite, el cual será activado mediante un motor DC, que en cuyo eje poseerá un imán permanente descentrado, para generar un campo magnético y provocar el giro de la pastilla ferromagnética.



Figura 66: Circuito activación del agitador de aceite

Circuito de mando y control del conjunto

El circuito de control industrial del conjunto se puede apreciar en la siguiente figura:

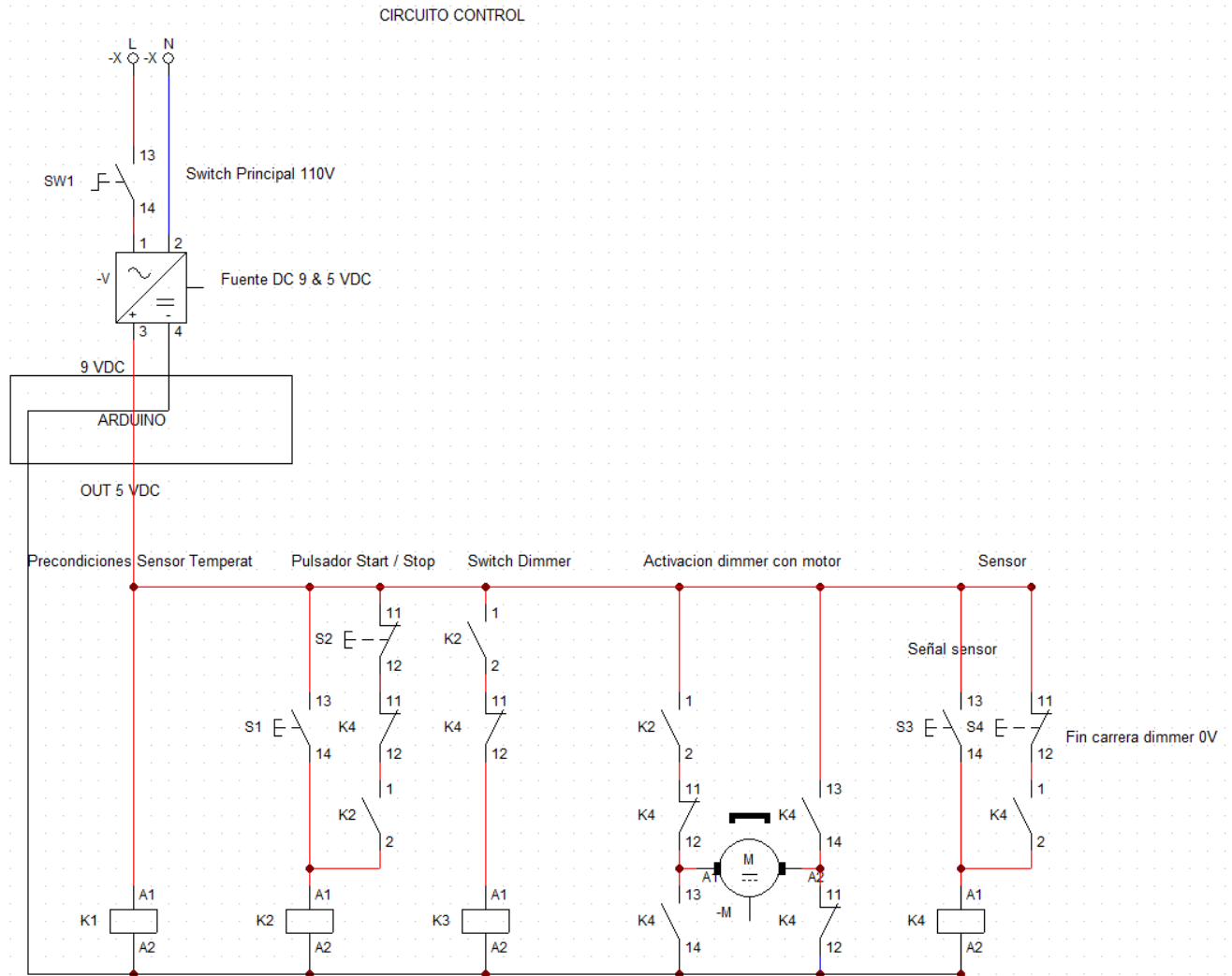


Figura 67: Circuito control industrial del chispometro

El circuito de control industrial de potencia del conjunto se puede apreciar en la siguiente figura:

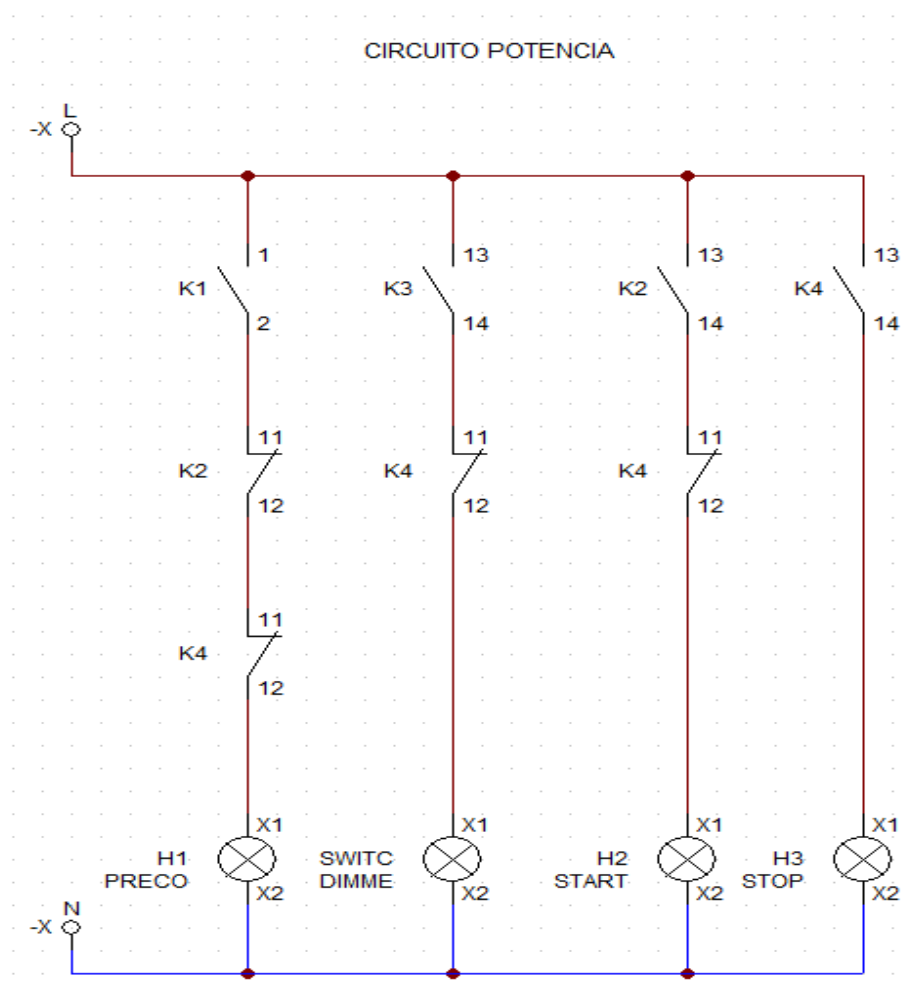


Figura 68: Circuito de Potencia del chispometro

3.2.4 Circuito electrónico de mando y control del conjunto

El circuito electrónico para la unificación del controlador Arduino Principal, y Arduino HMI y demás componentes de mando y control, se lo elaboro en el programa PROTEUS versión 8.6 así como también la respectiva placa PCB a doble capa.

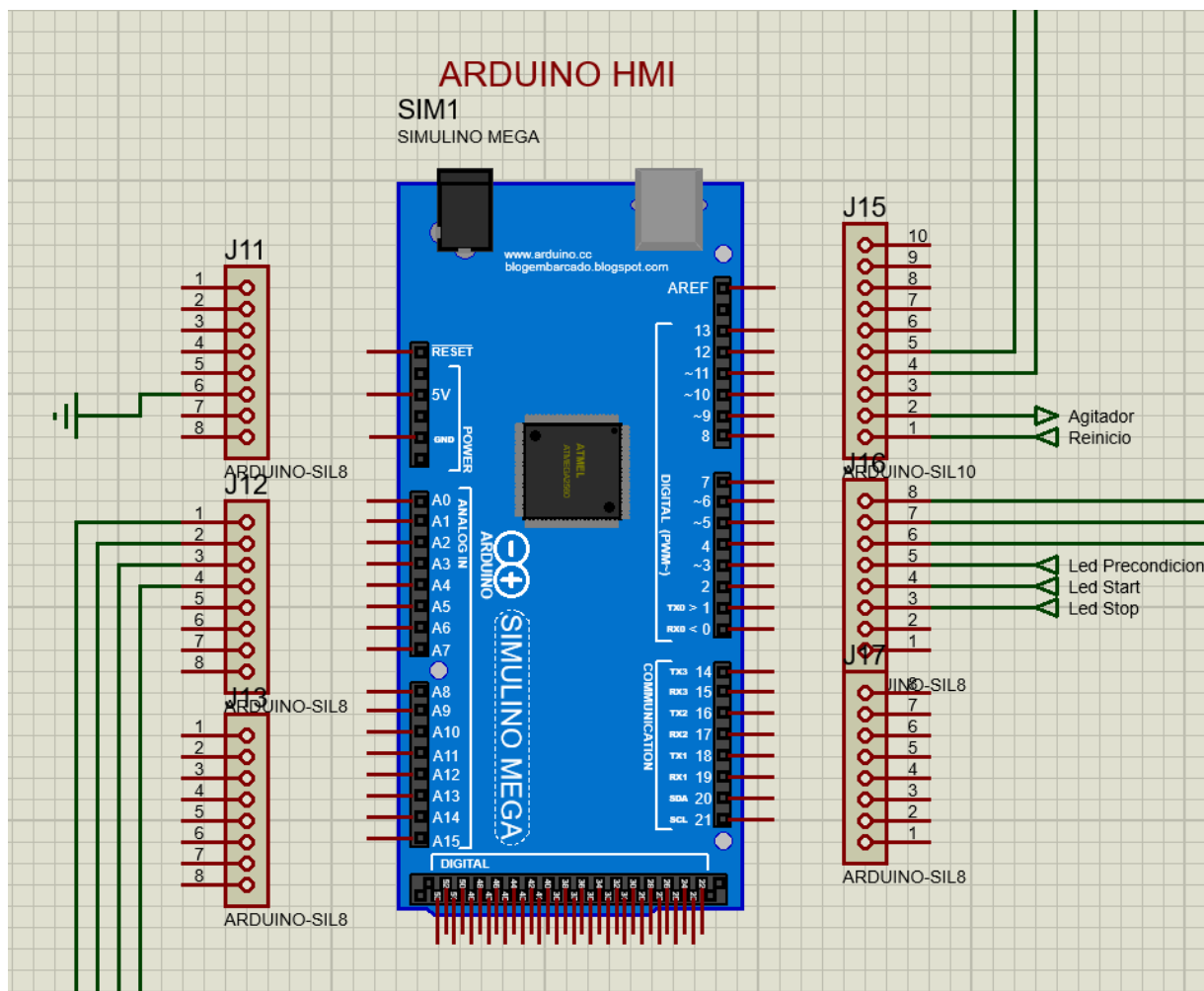


Figura 69: Circuito Controlador HMI

En el circuito de la figura 69, básicamente se utiliza un controlador Arduino, para permitir la vinculación de la pantalla HMI Delta Electronic y el Arduino principal. Este Arduino HMI recibe en sus pines digitales las señales del Arduino principal referente a los leds precondición, start, stop, reinicio, capta el accionamiento de los pulsadores de start, stop y paro de emergencia de la pantalla HMI y por los pines analógicos los valores digitales de los pasos del motor, voltajes de ruptura y la temperatura y humedad sentido por el sensor AM2301.

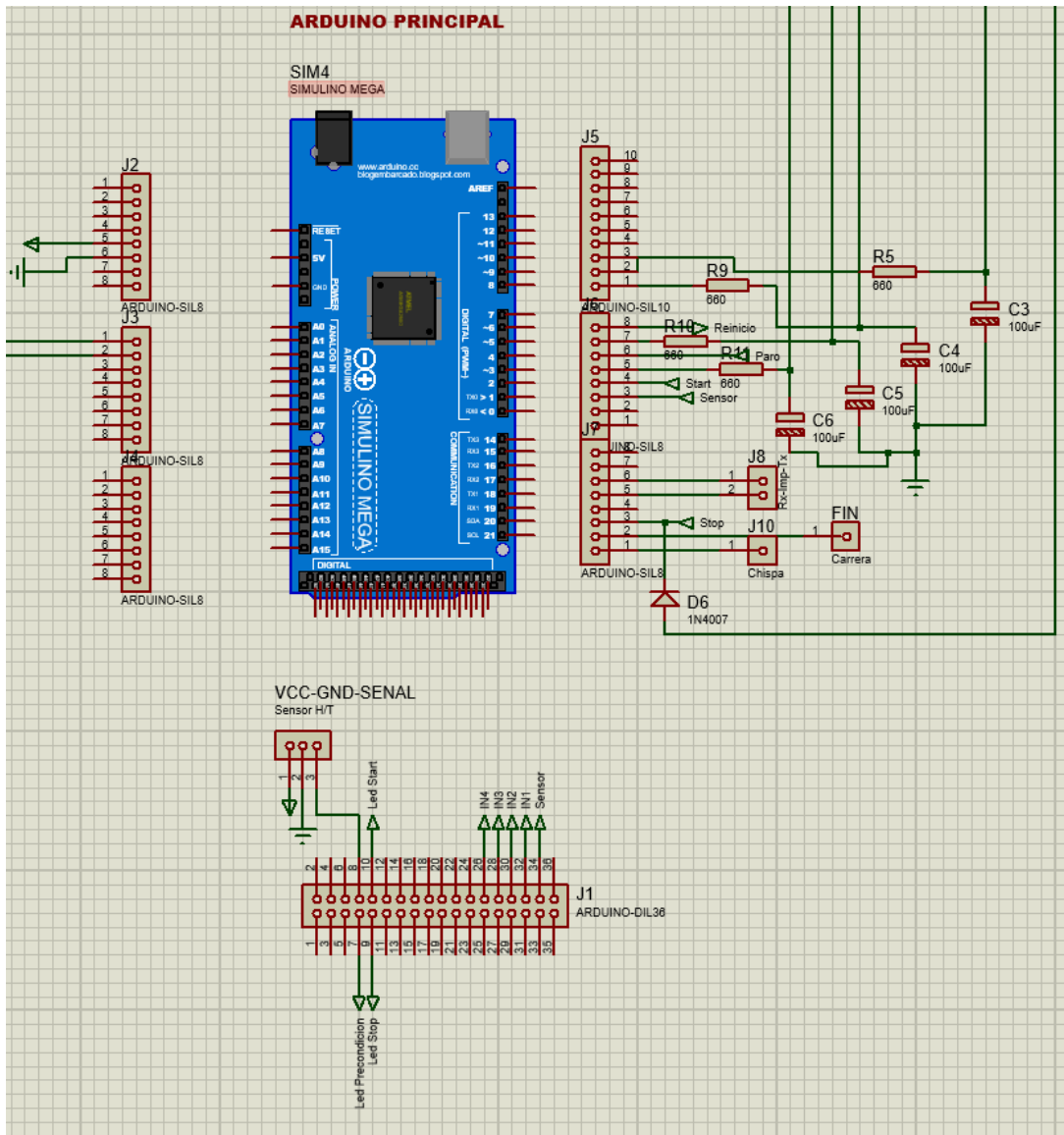


Figura 70: Circuito Controlador Principal

En el circuito de la figura 70 se utiliza un controlador Arduino, en el se activa los pines del motor a pasos, comanda el encendido de los leds start, stop y precondiciones, y capta las señales de la activación de los elementos de mando y control físicos del equipo como son el pulsador de start, el pulsador de stop y el paro de emergencia.

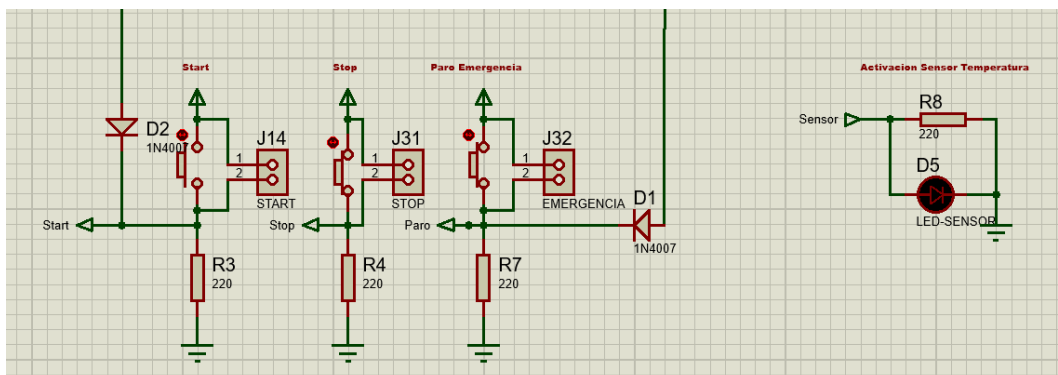


Figura 71: Circuito Elementos de Mando y Control

En el circuito de la figura 71 se puede apreciar la configuración pull-down de la conexión de los pulsadores start, stop, y paro de emergencia físicos que dispone el equipo para su manipulación.

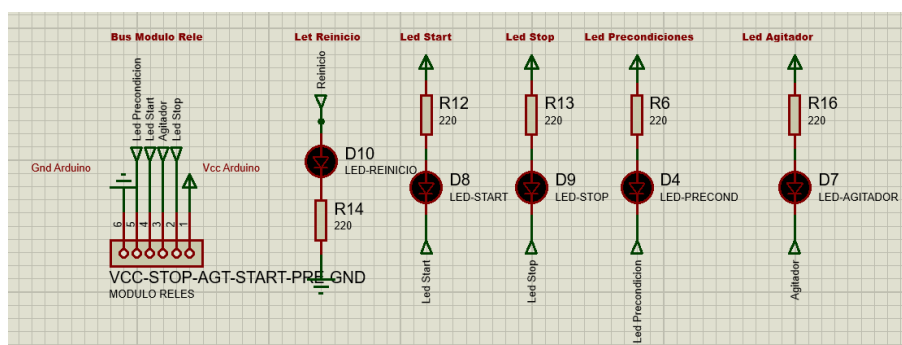


Figura 72: Circuito Elementos de Visualización

En el circuito de la figura 72 se puede apreciar la conexión de los leds start, stop, precondiciones, reinicio, y agitador de la placa de control del chispometro, que permite el monitoreo de la secuencia que está ejecutando el equipo. Adicional esta la conexión del módulo relé, que permitirá la activación de las luces piloto de 22mm físicas del equipo. Los colores físicos de las luces piloto son verdes para el estado de precondiciones y start, y color rojo para el estado de suspensión del testeo.

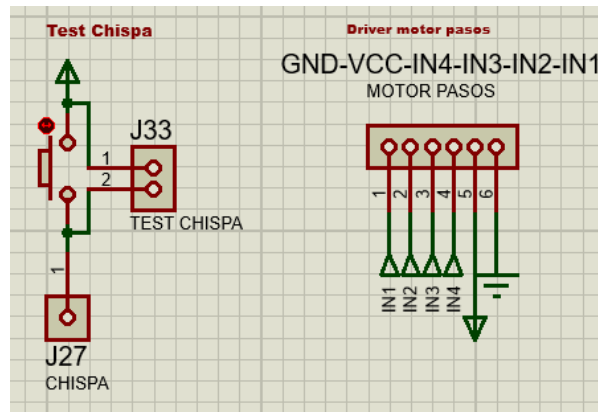


Figura 73: Circuito Test de Chispa

En el circuito de la figura 73 se aprecia la conexión para ejecutar el test de chispa de forma manual en la placa de control del chispometro, permitiendo realizar las configuraciones, calibraciones de las sentencias de programación del equipo a través de los controladores Arduino.

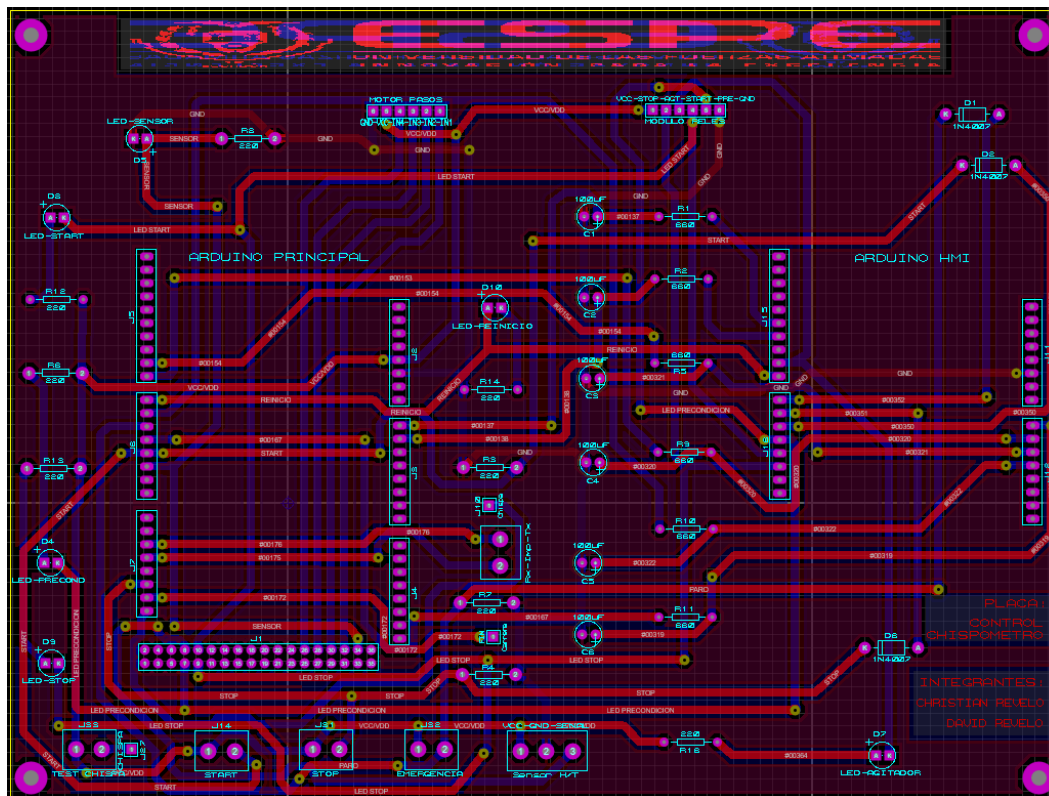


Figura 74: Placa PCB doble capa

En la placa pcb de la figura 74, se tiene todo el circuito de control del chispometro, en donde se conecta de forma modular los 2 controladores Arduino, dispone de las borneras para la conexión de señales de los pulsadores start, stop y paro de emergencia, la alimentación y señales del sensor de humedad-temperatura y el test de chispa al alcanzar el voltaje de ruptura en los electrodos.

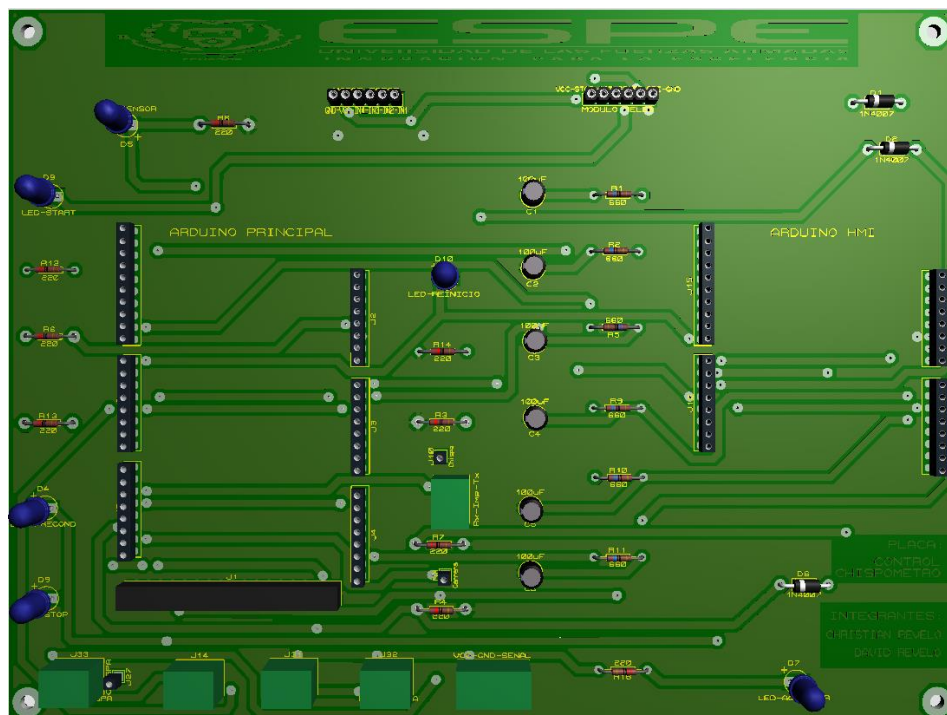


Figura 75: Placa PCB Vista Superior 3D

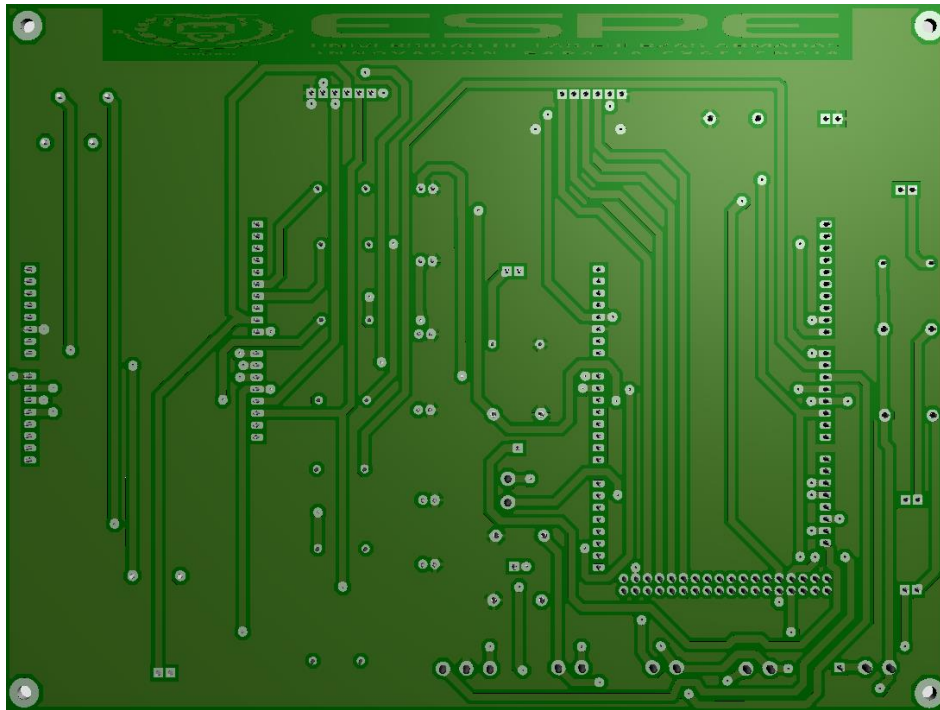


Figura 76: Placa PCB Vista Posterior 3D

3.3 Diseño de componentes del sistema de control

3.3.1 Control de accionamiento de test de prueba

Para el accionamiento del sistema para el test de prueba, se debe cumplir con la precondition del nivel de temperatura ambiente y del porcentaje de humedad relativa, para lo cual se utilizará el sensor AM2301, como se puede apreciar en la siguiente figura:

Temperature and humidity module

AM2301 Product Manual



Figura 77: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301

El sensor AM2301 es un sensor capacitivo para detección de humedad y temperatura, el sensor incluye un sensor capacitivo con componentes húmedos y dispositivos de medición de temperatura de alta precisión, y conectado con un microcontrolador de alto rendimiento de 8 bits. El producto tiene excelente calidad, respuesta rápida, fuerte capacidad anti-jamming, y alto costo.

De pequeño tamaño, bajo consumo de energía, distancia de transmisión de señal de hasta 20 metros, lo que la convierte en la mejor opción de todo tipo de aplicaciones e incluso las

aplicaciones más exigentes. Productos para la conveniencia de conexión de 3 conductores (interfaz de un solo bus), acorde a las necesidades del usuario.

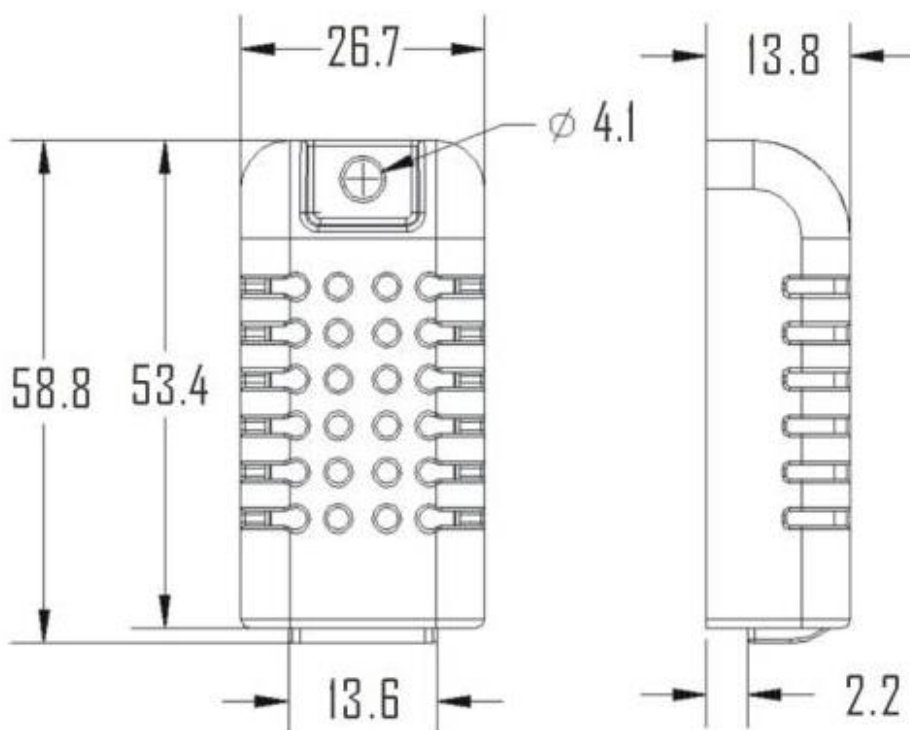


Figura 78: Dimensiones del Sensor de Humedad y Temperatura AM2301

La tabla de características para conexión de los pines del sensor se puede apreciar en la siguiente tabla:

Pin	Color	Name	Description
1	Red	VDD	Power (3.3V–5.2V)
2	Yellow	SDA	Serial data, Dual-port
3	Black	GND	Ground
4		NC	Empty

Figura 79: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301

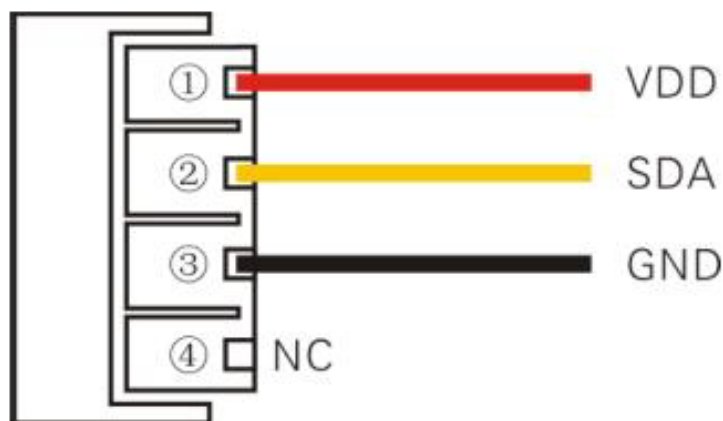


Figura 80: Sensor de Humedad y Temperatura AM2301

La figura de los rangos de funcionamiento del sensor, para la medición de la variable de humedad y la variable de temperatura se aprecia en la siguiente figura:

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		%RH
Range		0		99.9	%RH
Accuracy ^[1]	25°C		± 3		%RH
Repeatability			± 1		%RH
Exchange		Completely interchangeable			
Response ^[2]	1/e(63%)		<6		S
Sluggish			± 0.3		%RH
Drift ^[3]	Typical		<0.5		%RH/yr

Figura 81: Rango de medición variable humedad

Se puede determinar en base a la figura 81 que el sensor AM2301 tiene la capacidad de sensado del porcentaje de humedad relativa de 0 a 99%.

Adicional se determina que en base a la figura 81 el sensor AM2301 tiene la capacidad de sensado de temperatura en un rango de -40 a 80 grados centígrados.

Parameter	Condition	min	typ	max	Unit
Resolution			0.1		°C
			16		bit
Accuracy			± 0.3	± 1	°C
Range		-40		80	°C
Repeat			± 0.2		°C
Exchange		Completely interchangeable			
Response	1/e(63%)		<10		S
Drift			± 0.3		°C/yr

Figura 82: Rango de medición variable temperatura

3.3.2 Control agitador de aceite

El control utilizado en para accionar el agitador de aceite, básicamente se usará un control ON-OFF, ya que, dependiendo de la norma a utilizarse para efectuar el testeo en la muestra de aceite, el controlador decidirá activar o desactivar el motor DC que a través del campo magnético giratorio del imán permanente hará girar la pastilla ferromagnética para agitar el aceite, para la prueba con los electrodos de caras semiesférica.

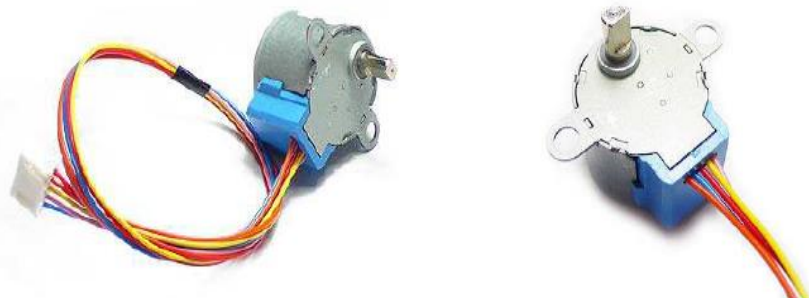
La decisión de que norma utilizar, será definida por el usuario a través de la HMI del equipo.

3.3.3 Control del dimmer

Para lograr controlar la regulación del voltaje de entrada al circuito generador de alto voltaje, se debe comandar el potenciómetro del circuito eléctrico del dimmer, para lo cual se utilizará un motor a pasos Modelo 28BYJ-48, cuyas características se indican en la siguiente figura:

28BYJ-48 – 5V Stepper Motor

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.



Rated voltage :	5VDC
Number of Phase	4
Speed Variation Ratio	1/64
Stride Angle	5.625°/64
Frequency	100Hz
DC resistance	50Ω±7%(25°C)
Idle In-traction Frequency	> 600Hz
Idle Out-traction Frequency	> 1000Hz
In-traction Torque	>34.3mN.m(120Hz)
Self-positioning Torque	>34.3mN.m
Friction torque	600-1200 gf.cm
Pull in torque	300 gf.cm
Insulated resistance	>10MΩ(500V)
Insulated electricity power	600VAC/1mA/1s
Insulation grade	A
Rise in Temperature	<40K(120Hz)
Noise	<35dB(120Hz, No load, 10cm)
Model	28BYJ-48 – 5V

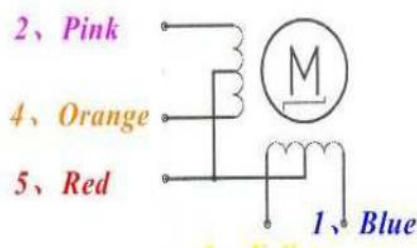


Figura 83: Características del Motor a pasos 28BYJ-48
Fuente: (Kiatronic, 2017)

Las dimensiones del motor a pasos se pueden apreciar en la siguiente figura:

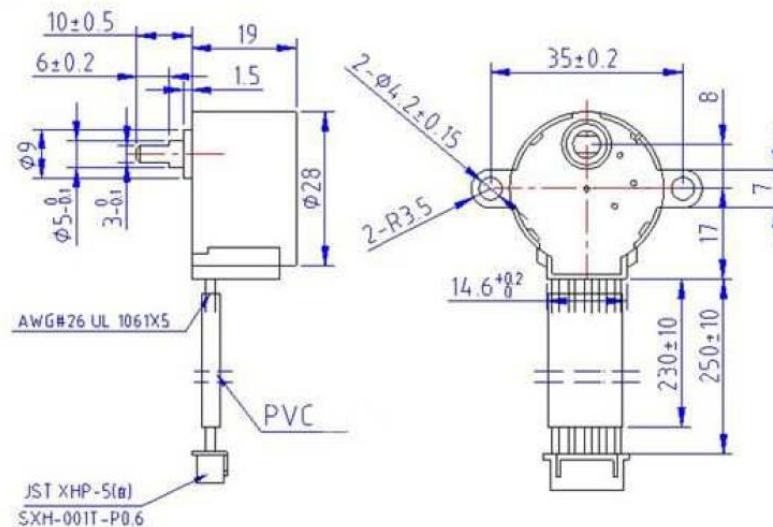


Figura 84: Dimensiones del Motor a pasos 28BYJ-48
Fuente: (Kiatronic, 2017)

El motor 28BYJ-48 es un motor unipolar con las siguientes características:

- Tensión nominal de entre 5V y 12 V
- 4 fases
- Resistencia 50 Ω
- Par motor de 34 Newton / metro más o menos 0,34 Kg por cm
- Consumo de unos 55 mA
- 8 pasos por vuelta
- Reductora de 1 / 64

Al necesitar 8 por vuelta y al usar una reductora de 1 / 64, por lo que necesitamos dar 8 * 64 = 512 impulsos para completar un giro completo.

A diferencia de los motores CC normales que están diseñados para que al alimentarlos giren de forma continua, un motor paso a paso está diseñado para girar un paso cada vez que alimentas una de las fases.

Por eso nuestro programa tendrá que gestionar la secuencia en la que excitamos las bobinas para que el motor vaya avanzando de forma continua.

En un motor de 4 fases como este que vamos a usar hay tres maneras de hacer la secuencia de activación de las bobinas para generar el giro del motor.

- Excitando 2 bobinas cada vez
- Excitando 1 bobina cada vez
- Excitando alternadamente 1 y 2 bobinas a la vez

Excitando dos bobinas cada vez (Suele ser lo que recomienda el fabricante) Tendríamos máximo par, buena velocidad y alto consumo.

PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

Figura 85: Excitando 2 bobinas motor a pasos
Fuente: (Macho, 2017)

Excitando solo una bobina cada vez (*Se le llama wave drive*): Que produciría un par menor (*Porque solo se activa una bobina en lugar de dos*) y consumo bajo.

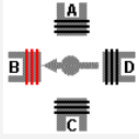
PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

Figura 86: Excitando 1 bobina motor a pasos
Fuente: (Macho, 2017)

O podríamos dar medios pasos así: El movimiento es más suave, lento y de más pasos que con los métodos anteriores, y el consumo y el par es también intermedio.

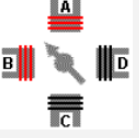
PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

Figura 87: Excitando medios pasos al motor a pasos
Fuente: (Macho, 2017)

Para el control del potenciómetro del dimmer a través del motor a pasos, se diseñó un acople que permita transmitir el movimiento del motor hacia el potenciómetro del circuito del dimmer detallado en la figura 54, el cual será fabricado a través de impresión 3D en material ABS.

El diseño CAD del acople del motor se puede apreciar en la siguiente figura:

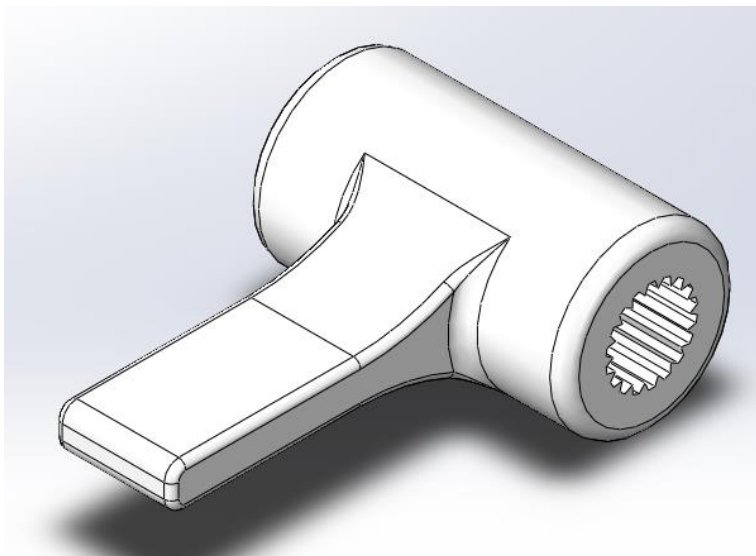


Figura 88: Acople motor a potenciómetro vista isométrica

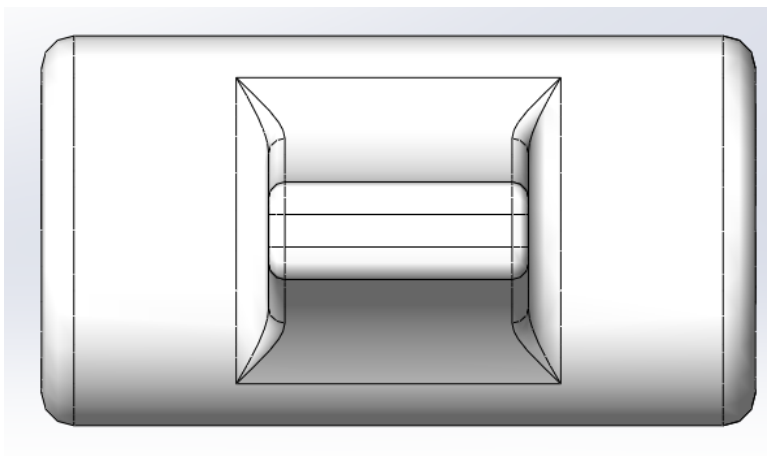


Figura 89: Acople motor a potenciómetro vista lateral

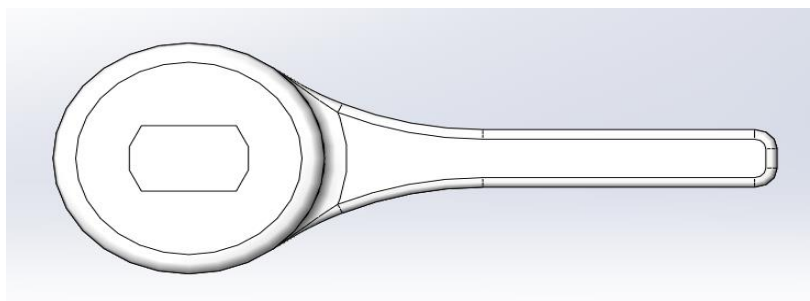


Figura 90: Acople motor a potenciómetro vista frontal

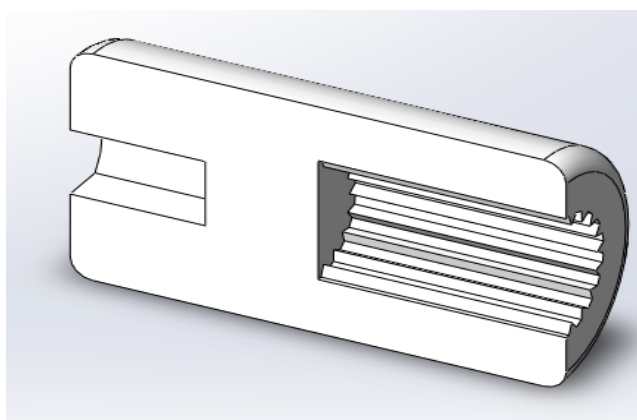


Figura 91: Acople motor a potenciómetro vista sección

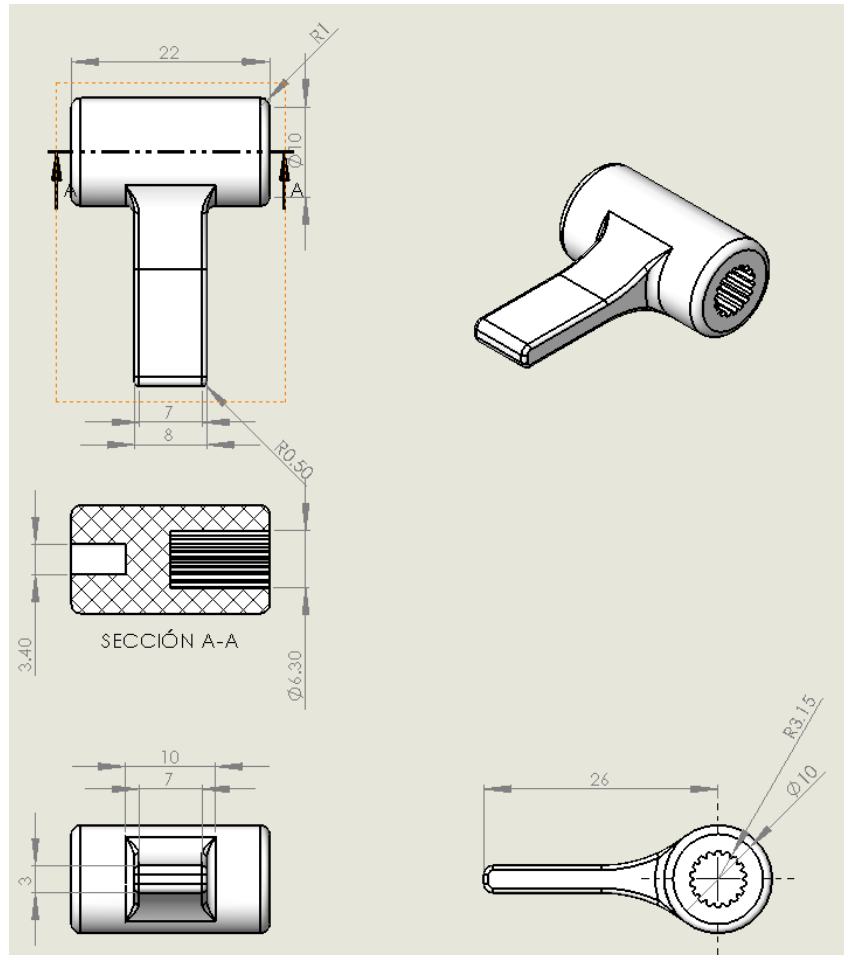


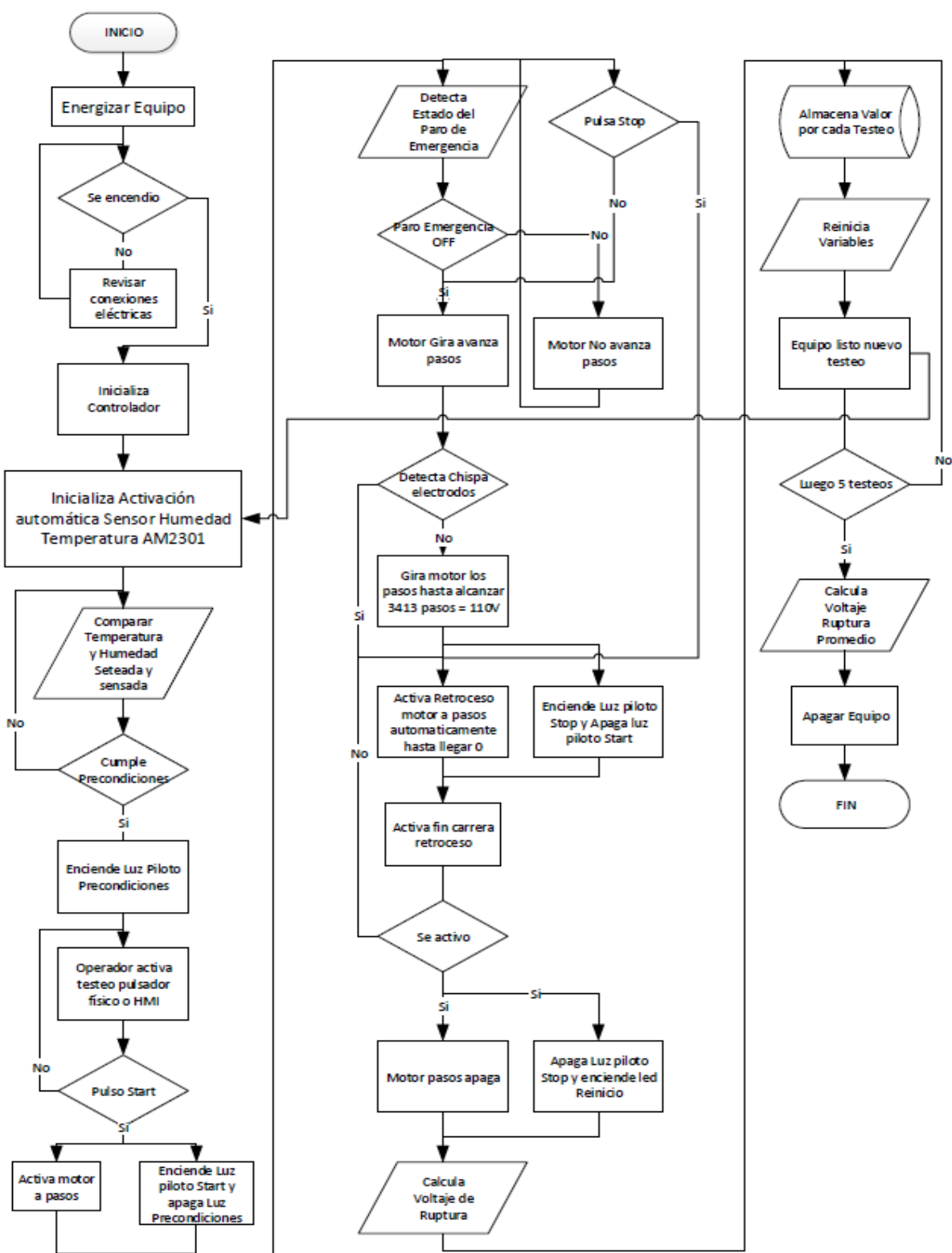
Figura 92: Esquema Acople motor a potenciómetro

3.4 Diseño del software

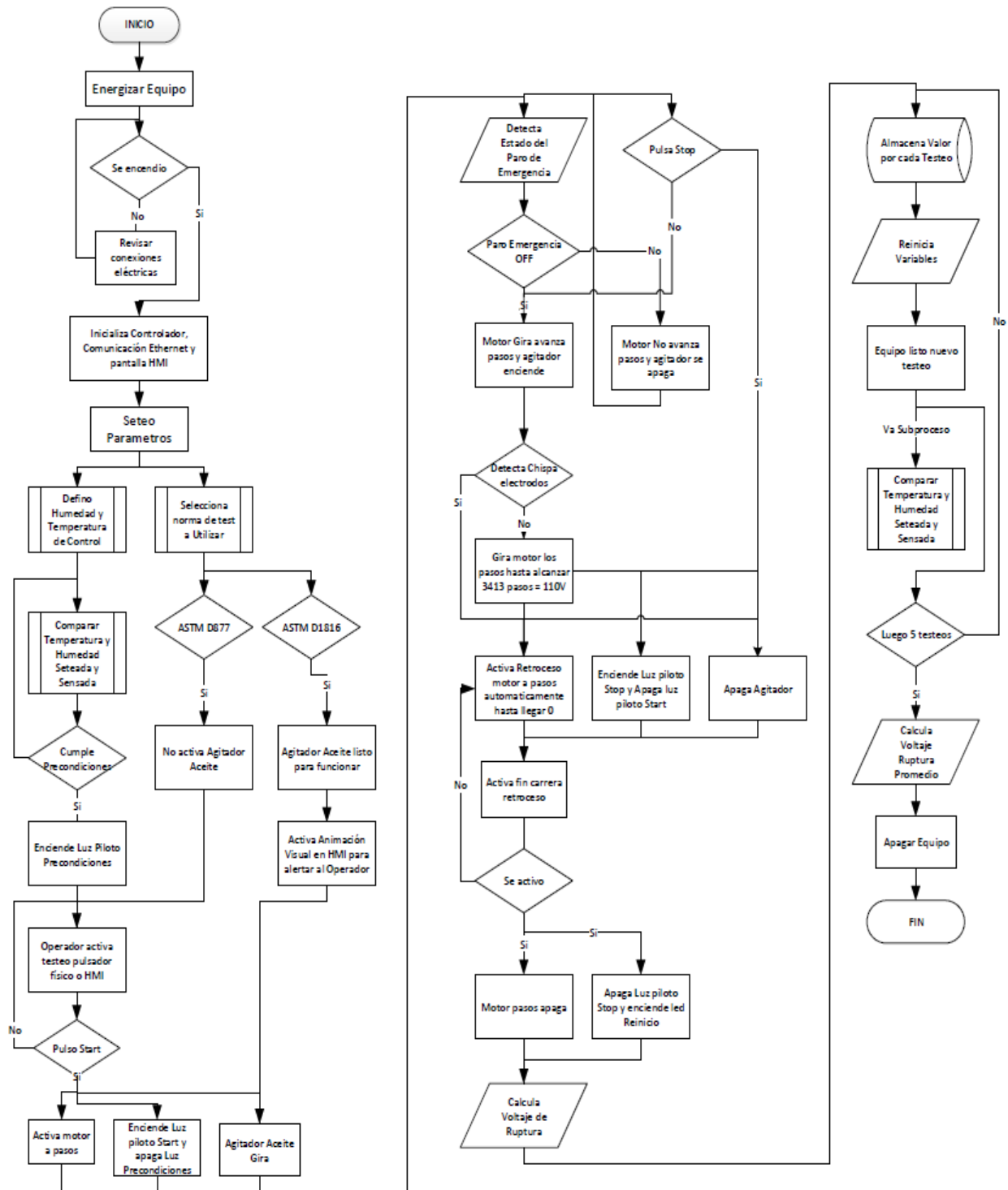
3.4.1 Programación del Controlador

Se utiliza 2 controladores Arduino, el primer Arduino tiene la programación principal de las sentencias para activación y desactivación del dimmer, sensores de humedad temperatura, luces piloto a través de interrupciones, mientras que, para la vinculación del controlador con el HMI, se utiliza un segundo controlador Arduino, cuyas sentencias permiten habilitar los puertos de comunicación para la interfaz HMI, configuración de botones de mando y control y agitador de aceite

❖ Diagrama de Flujo Controlador Principal



❖ Diagrama de Flujo Controlador Secundario HMI



3.4.2 Programación HMI en panel Delta Electronics

La programación de la HMI se la realizo mediante el software DopSoft para la pantalla de 4.3” de marca Delta Electronic. A continuación, se podrá observar las distintas pantallas programadas:

❖ Pantalla Principal

Permite la visualización de la función que cumple realiza el equipo



Figura 93: Pantalla principal

❖ Pantalla de Proceso

Esta pantalla, será la que permita al usuario del equipo, realizar la activación del test para la medición del voltaje de ruptura, visualizando a través de luces piloto, el estado de cada etapa del proceso, así como la obtención del resultado del testeo en cada test, y el voltaje de ruptura promedio.

También se visualizará parámetros como temperatura y humedad del ambiente, factores importantes que determinan la factibilidad de realizarse el testeo.

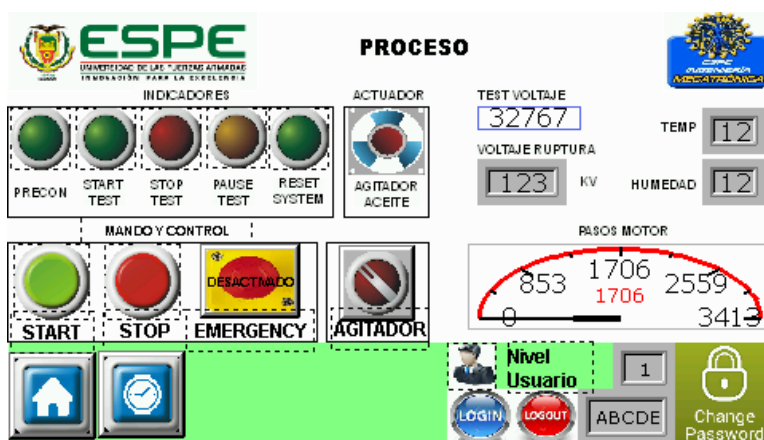


Figura 94: Pantalla de Proceso

❖ Pantalla de Configuración

En esta pantalla, permite al usuario del equipo, realizar la configuración del testeo, determinándose bajo que norma se ejecutara la prueba, para habilitar el agitador de aceite, dependiendo del tipo de electrodo a usar, así como determinar la temperatura y humedad para cumplimiento de las precondiciones de testeo.

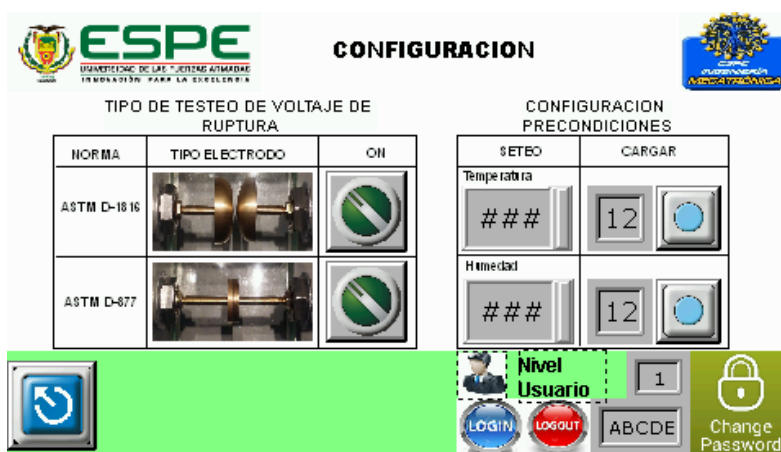


Figura 95: Pantalla de Configuración

Capítulo 4: Implementación y Pruebas

4.1 Implementación

4.1.1 Implementación del proceso, equipo o máquina

A continuación, se describirá el proceso de implementación del equipo, en sus etapas constructivas, como se podrá observar en las siguientes figuras:



Figura 96: Dobles y corte en tapa frontal del equipo



Figura 97: Colocación tapa izquierda del equipo



Figura 98: Colocación tapa derecha del equipo



Figura 99: Soldadura de Tapas del equipo



Figura 100: Soldadura de Tapas del equipo



Figura 101: Soldadura de Tapas del equipo



Figura 102: Soldadura de Tapas del equipo



Figura 103: Colocación de elementos de mando y control

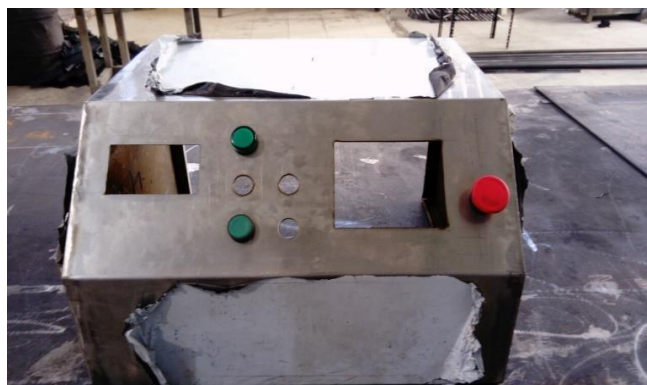


Figura 104: Colocación de elementos de mando y control



Figura 105: Colocación de sensor de humedad temperatura

A continuación, se describirá la construcción de los electrodos de prueba, los tipos cara semiesféricos y tipo cara plana, como también los soportes de anclaje y aislantes de duralón

respectivos, los cuales se elaboraron mediante procesos de arranque de viruta utilizando el torno, obteniendo las geometrías respectivas como se podrá observar en las siguientes figuras:



Figura 106: Electrodo de semiesféricos de bronce



Figura 107: Electrodo de disco plano de bronce



Figura 108: Base conexión soporte electrodos

Se utilizó el duralón como material aislante para recubrimiento de las bases y brazos de conexión de soporte de los electrodos, por su facilidad para mecanizado y obtención de las geometrías respectivas, considerando que existen materiales con mejores propiedades aislantes, como las cerámicas, que sería una mejora en el diseño del prototipo a futuro.



Figura 109: Aislante Base conexión soporte electrodos



Figura 110: Ensamble aislante con base conexión soporte electrodos



Figura 111: Brazo y aislante de conexión soporte electrodos vista frontal y lateral derecha



Figura 112: Punta cónica de conexión soporte electrodos



Figura 113: Ensamble de soportes porta electrodos de prueba

4.1.2 Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos.

A continuación, se describirá el proceso de implementación de los componentes eléctricos y electrónicos del equipo, en sus etapas constructivas, como se podrá observar en las siguientes figuras:

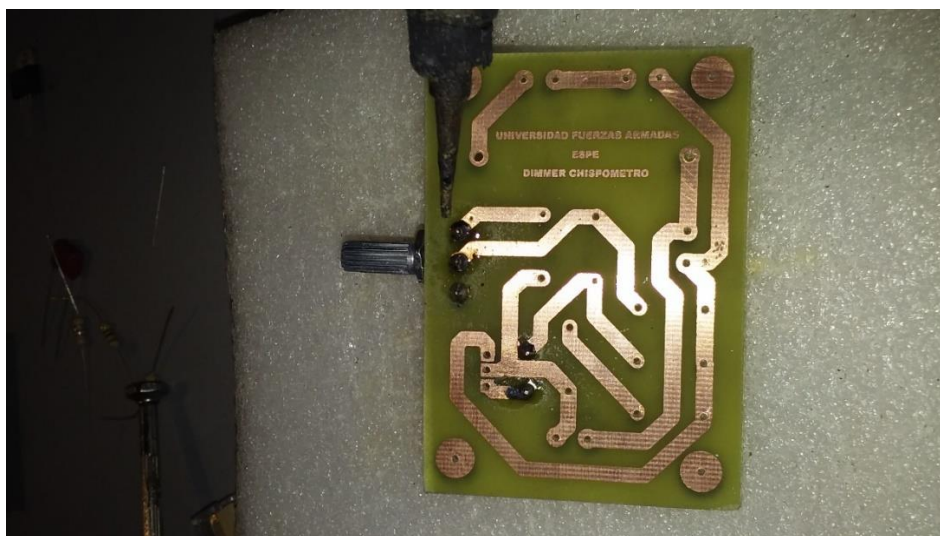


Figura 114: Pcb Dimmer Electrónico

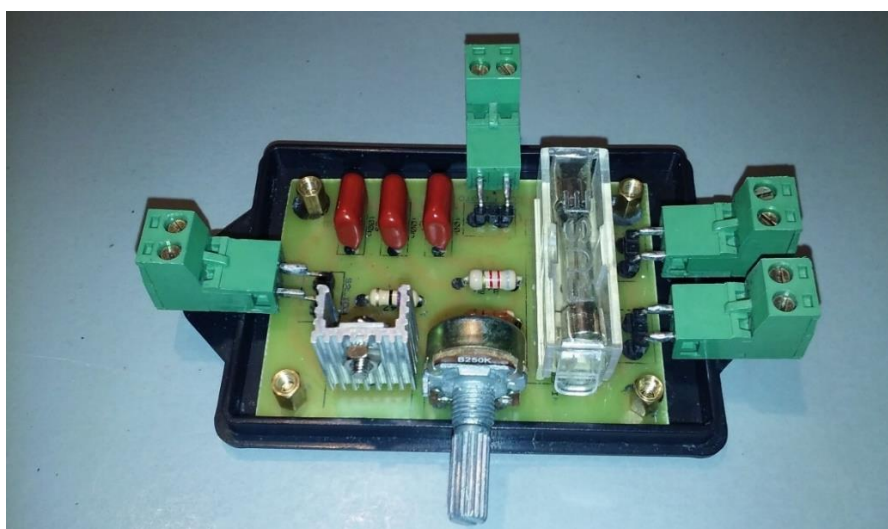


Figura 115: Soldadura componentes Dimmer Electrónico



Figura 116: Dimmer Electrónico Empaquetado



Figura 117: Pcb Detector de chispa



Figura 118: Pcb Reinicio Sistema fin de carrera

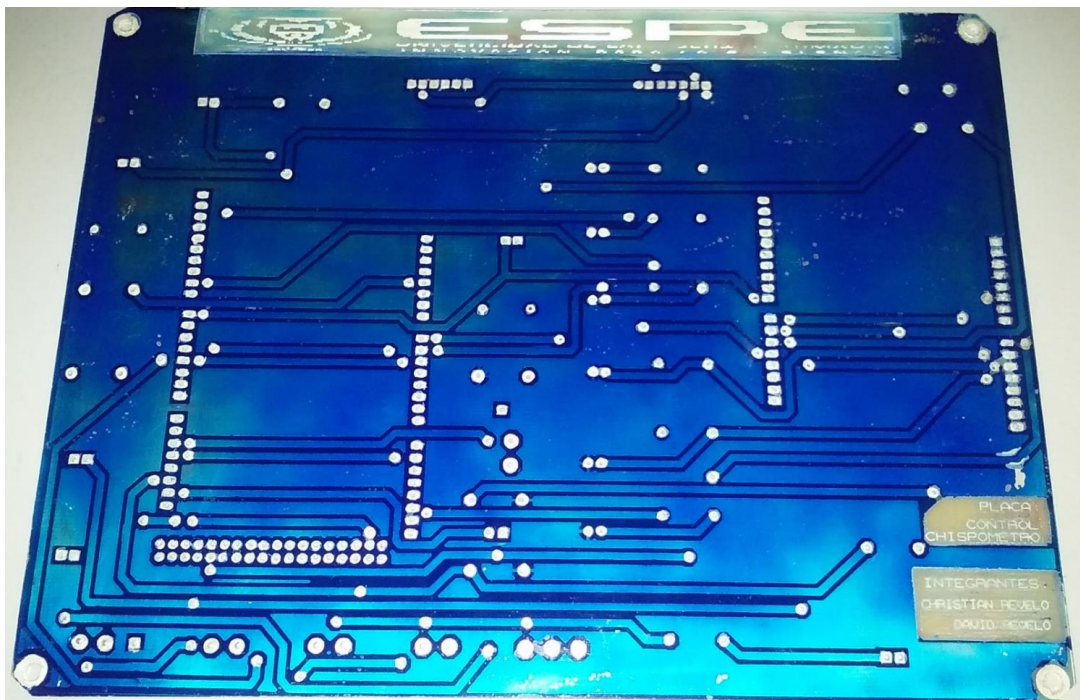


Figura 119: Pcb Placa Control Chispometro Vista superior

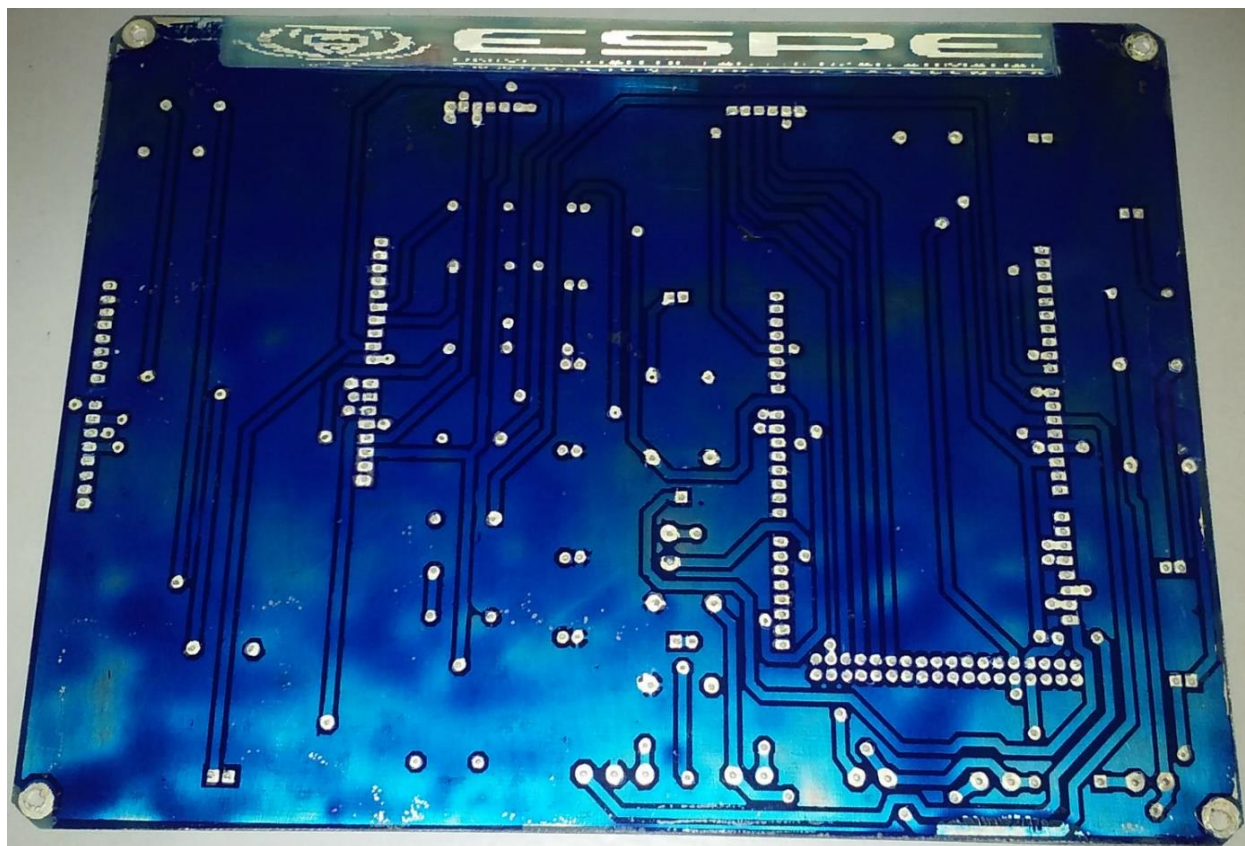


Figura 120: Pcb Placa Control Chispometro Vista posterior

4.1.3 Implementación del sistema de control.

A continuación, se describirá el proceso de implementación del sistema de control del equipo que corresponde al conjunto de elementos de conexión como borneras, relés de armadura, fuentes para los distintos elementos de mando y control, en sus etapas constructivas, como se podrá observar en las siguientes figuras:



Figura 121: Base de conexiones

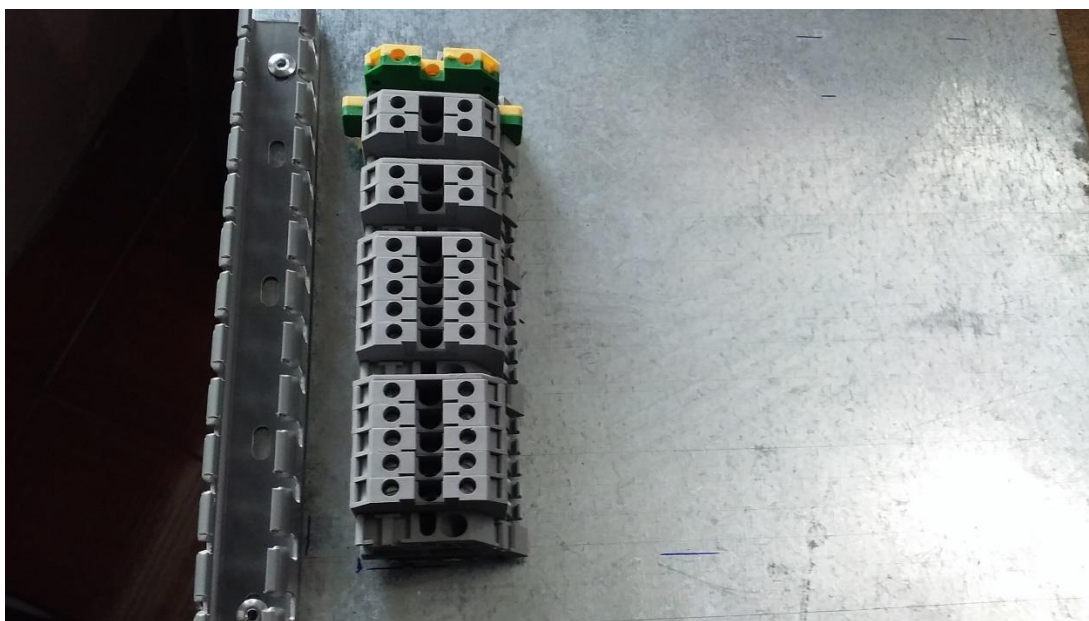


Figura 122: Armado de tablero del Sistema de Control



Figura 123: Tablero del Sistema de Control

4.1.4 Programación del sistema de control.

La programación del sistema de control, se lo realizó con el compilador de los controladores Arduino, versión de software 1.6.4 en la cual se añadieron distintas librerías para el control de motores, sensores de temperatura, comunicación ethernet para Hmi, etc.



Figura 124: Compilador de Controladores

Las librerías utilizadas son:

- DHT
- Ethernet
- Stepper
- Mudbus

Para la programación del HMI de operación del equipo, se utilizó el software DOPSoft Versión: 2.00.05 Build: 2.00.05.08, en la cual se colocaron indicadores, botones, selectores, visualizadores, que permiten la configuración y manipulación de forma automática del equipo.

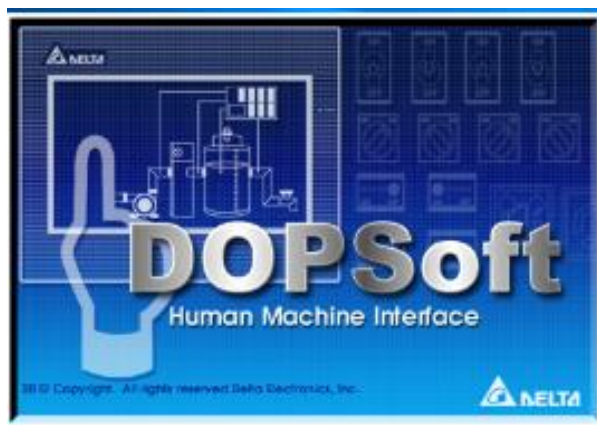


Figura 125: Programador de Pantallas Táctil Delta Electronic

4.2 Pruebas

4.2.1 Desarrollo del protocolo de pruebas.

La prueba se realiza, llenando la copa con aceite hasta que los dos electrodos queden cubiertos completamente. Al vaciar la muestra de aceite en la copa de prueba, ésta deberá dejarse reposar 10 minutos antes de ser probado, con el propósito de que se escapen las burbujas de aire que pueda contener.

Posteriormente, se cierra el interruptor del aparato, el cual previamente se habrá conectado a una fuente de 120 voltios. Luego se va incrementando gradualmente la tensión automáticamente en el aparato con el regulador, aproximadamente a una velocidad de 3 Kv por segundo, hasta que el aceite contenido en los electrodos falle; consistiendo esta falla en el brinco del arco eléctrico, entre los electrodos, con lo cual se cortocircuitan abriéndose el interruptor de alimentación de la fuente de energía eléctrica.

A cada muestra se le efectuarán varias pruebas de ruptura agitando y dejando reposar la muestra un mínimo de 1 minuto, después de cada prueba. Los valores obtenidos se promediarán y el valor obtenido del promedio será representativo de la muestra. Este promedio es válido siempre que ninguna prueba sea diferente en más de 5 Kv, si existe una variación mayor deberán efectuarse más pruebas con nuevas muestras.

Cuando se prueba aceite muy sucio deberá lavarse la copa con un buen solvente y secarla perfectamente; posteriormente, tener la precaución al obtener una muestra de enjuagar la copa dos o tres veces con el mismo aceite por probar.

4.2.2 Pruebas y resultados de los componentes eléctricos y/o electrónicos.

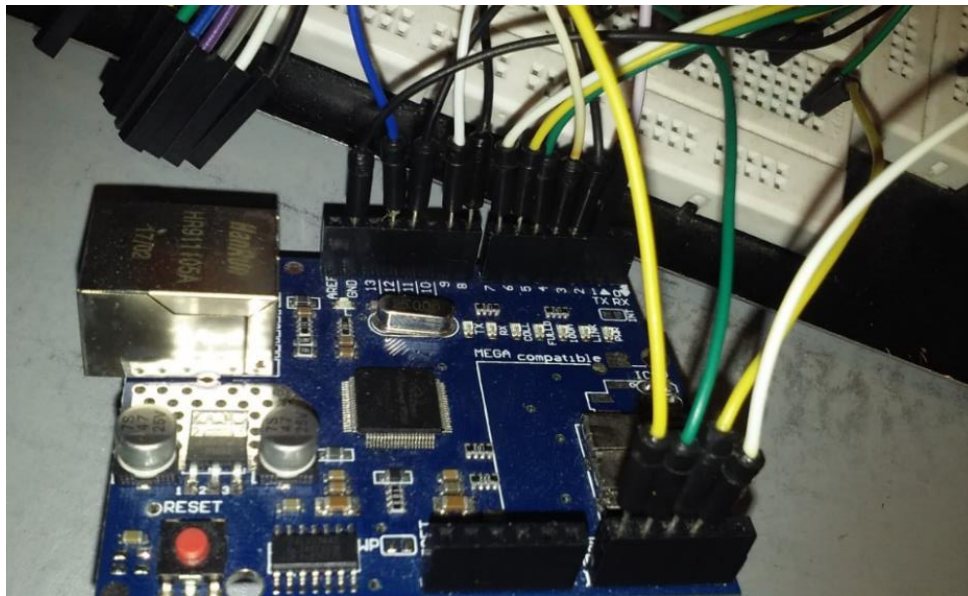


Figura 126: Pruebas de comunicación modulo Ethernet



Figura 127: Pruebas de funcionamiento del dimmer y motor a pasos

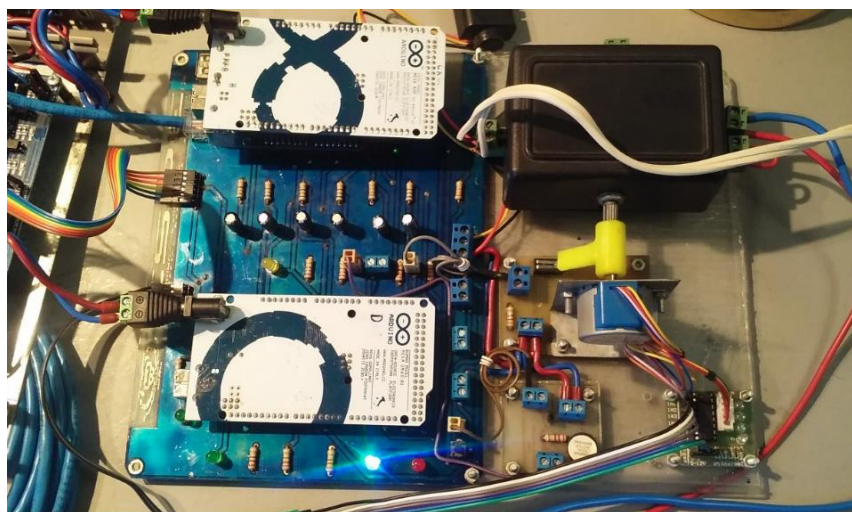


Figura 128: Pruebas de funcionamiento placa control chispometro

4.2.3 Pruebas y resultados del sistema de control.

A continuación, se puede observar el funcionamiento del sistema de control, al cumplirse las precondiciones de humedad y temperatura del sistema para el test de voltaje de ruptura, el

sistema acciona el módulo relé, que a su vez activa los relés de armadura, para encender las luces indicadoras de cada proceso, como son:

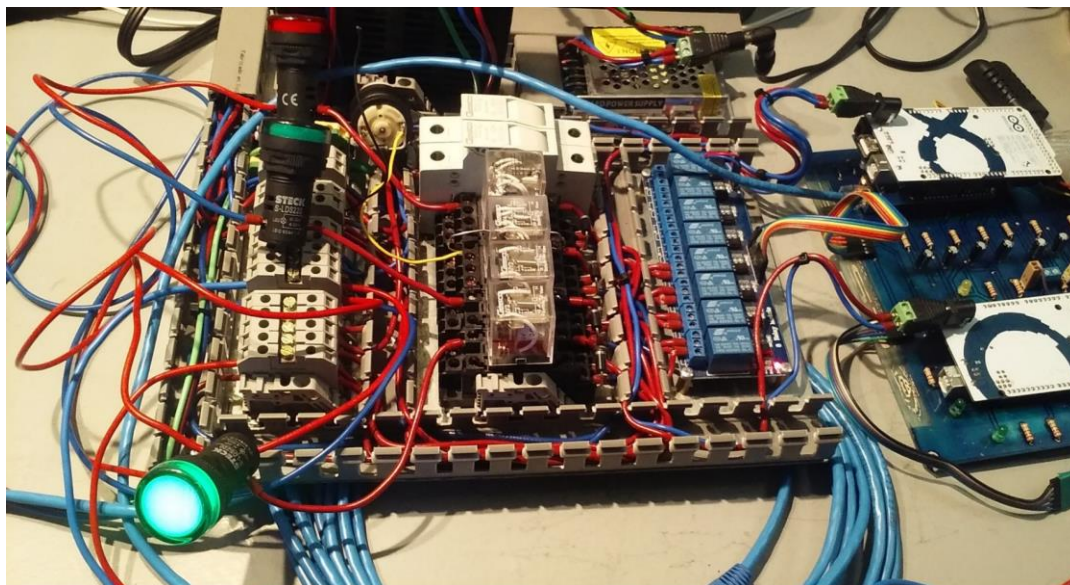


Figura 129: Funcionamiento sistema de control led Precondiciones Activado

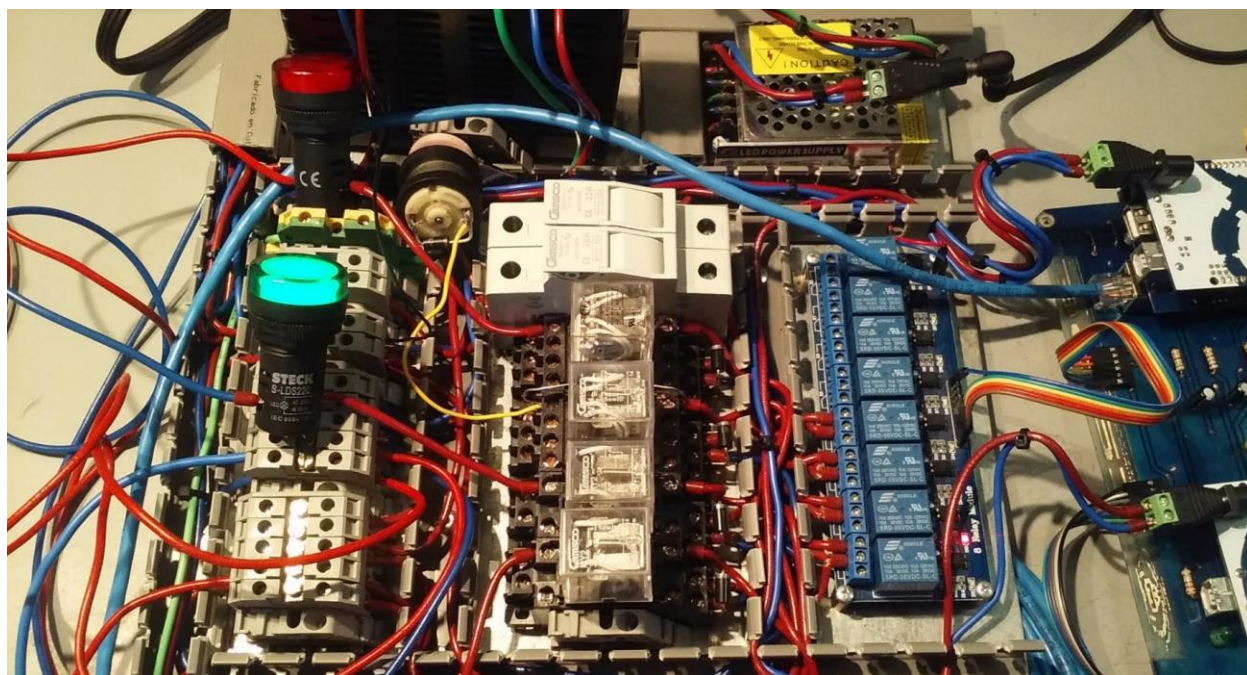


Figura 130: Funcionamiento sistema de control led Start Activado

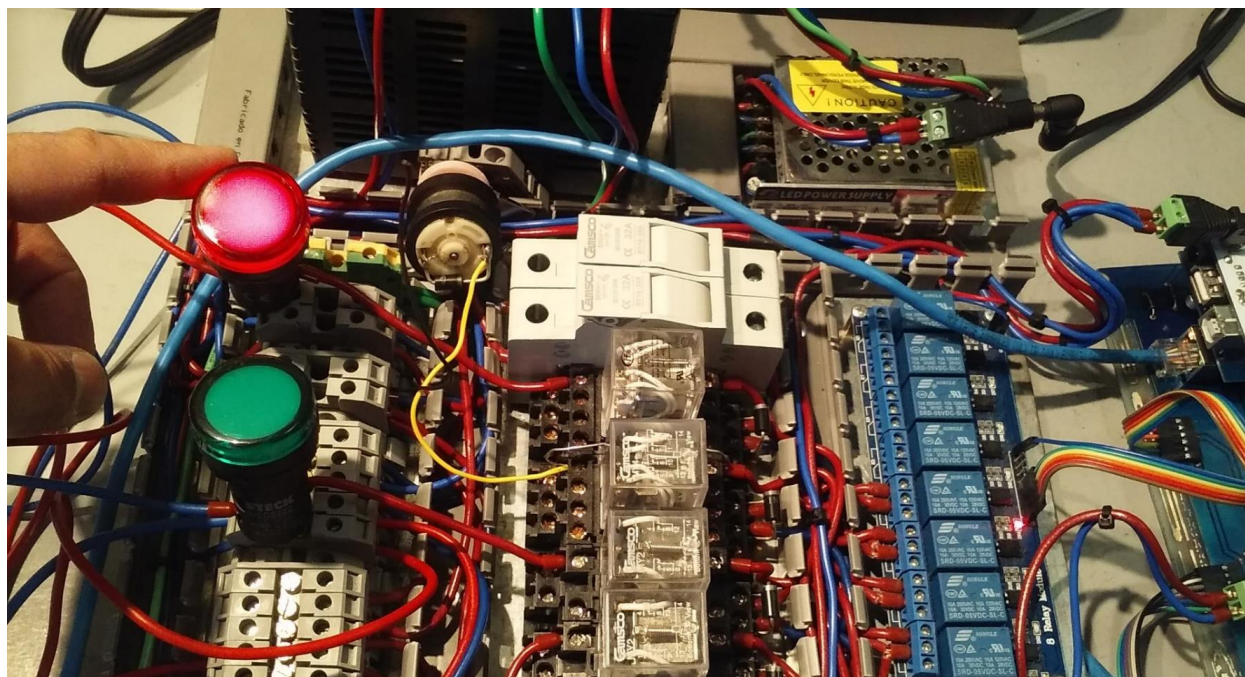


Figura 131: Funcionamiento sistema de control led Stop Activado

4.2.4 Pruebas y resultados del sistema mecatrónico general.

A continuación, se puede observar el funcionamiento del sistema mecatrónico general, en la parte interna se puede apreciar todas las conexiones respectivas desde la bobina para alto voltaje, los circuitos de control y comunicación de los controladores, el sistema de mando y control industrial.

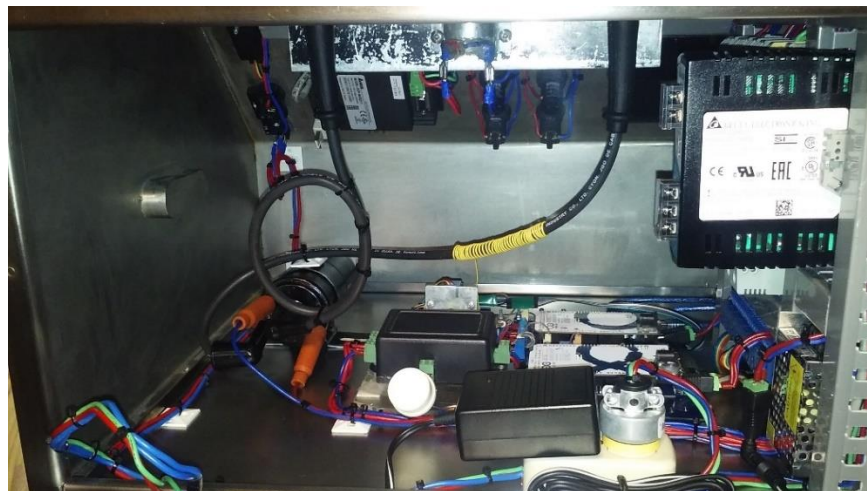


Figura 132: Conexión interno sistema mecatrónico del equipo

En la parte frontal se puede apreciar las botoneras, luces piloto y pantalla Hmi de operación del equipo de testeo.



Figura 133: Sistema mecatrónico del equipo

Una vez encendido el equipo, el usuario debe configurar el funcionamiento del equipo, realizando los siguientes pasos como se enuncia a continuación en las siguientes figuras:

1. Los parámetros temperatura y humedad para realizar el test,
2. Seleccionar en la HMI pantalla Configuración bajo que norma ejecutar el test, para determinar si utilizará los electrodos de cara plana o los semiesféricos
3. Si utiliza discos semiesféricos debe activar el agitador de aceite
4. Realizar el test de forma manual con la botonera o a través de la HMI
5. Los resultados del voltaje de ruptura se visualizan en la pantalla HMI en la ventana proceso



Figura 134: Configuración de Precondiciones Temperatura y Humedad desde HMI



Figura 135: Configuración de tipo de electrodo a utilizar



Figura 136: Activación del Agitador de Aceite

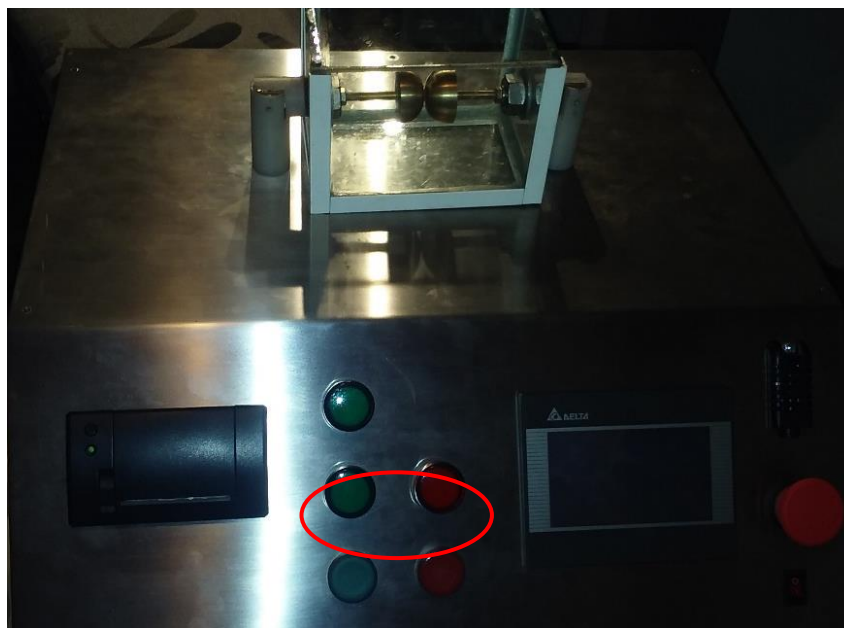


Figura 137: Activación Equipo botonera Manual Pulsador Start y Stop

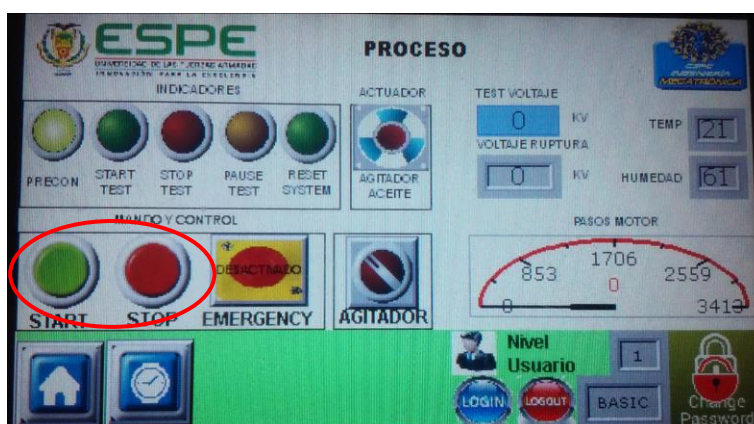


Figura 138: Activación Equipo desde HMI

A continuación, se evidencia en la siguiente tabla, las pruebas efectuadas a 3 tipos de aceites, para determinar, a que voltaje se produce la ruptura, mediante un salto de chispa entre los electrodos, los aceites testeados son:

- Aceite Automotriz SAE 15W40

- Aceite de Cocina Girasol
- Aceite Dieléctrico de compresor de refrigeradoras

Tabla 6

Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite SAE 15W40





TIPO ACEITE	NORMA	ELECTRODO	MUESTA DE ACEITE	CONDICIONES			VOLTAJE RUPTURA [KV]	CRITERIO
				Separación Electrodos [mm]	Temp Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]		
SAE 15W40	ASTM D- 877			2.54	24	48	0.088	Inaceptable. No es dielectrico
	ASTM D- 1816			2.03	22	50	0.2	Inaceptable. No es dielectrico

Tabla 7

Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite Girasol









TIPO ACEITE	NORMA	ELECTRODO	MUESTA DE ACEITE	CONDICIONES			VOLTAJE RUPTURA [KV]	CRITERIO
				Separación Electrodos [mm]	Temp Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]		
ACEITE GIRASOL	ASTM D- 877			2.54	25	46	0.088	Inaceptable. No es dielectrico
	ASTM D- 1816			2.03	25	46	0.088	Inaceptable. No es dielectrico

Tabla 8

Pruebas de resistencia dieléctrica Normas ASMT D-877 y ASTM D-1816 en Aceite Refrigerador

TIPO ACEITE	NORMA	ELECTRODO	MUESTA DE ACEITE	CONDICIONES			VOLTAJE RUPTURA [KV]	CRITERIO
				Separación Electrodos [mm]	Temp Ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]		
ACEITE DE REFRIGERADOR	ASTM D-877			2.54	26	42	15	Questionable.
	ASTM D-1816			2.03	25	42	18	Cumple valor mínimo para aceites a granel según norma INEN 2 133:98

4.2.5 Costo del prototipo

Tabla 9
Costeo del Prototipo

ORD	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO		IVA	TOTAL
			UNITARIO	TOTAL		
1	Condensadores ceramicos de 250 V/ 1mF	2	0.5	1	0.14	1.14
2	Bobina automotriz	1	30	30	4.20	34.20
3	Sensor digital de temperatura y humedad AMS2301	1	19.33	19.33	2.71	22.04
4	Motor a pasos 28BYJ-48 y driver de control	1	7.2	7.2	1.01	8.21
5	Luz piloto color verde 110 Vac	2	2.19	4.38	0.61	4.99
6	Luz piloto color rojo 220 Vac	1	2.19	2.19	0.31	2.50
7	Pulsador color verde	1	1.23	1.23	0.17	1.40
8	Pulsador color rojo	1	1.23	1.23	0.17	1.40
9	Paro de emergencia	1	2.47	2.47	0.35	2.82
10	Micro fin de carrera	1	0.2	0.2	0.03	0.23
11	Funda de acido ferrico	1	0.95	0.95	0.13	1.08
12	Materiales y contrucción de estructura del equipo en acero inoxidable	1	330	330	46.20	376.20
13	Materiales y contruccion de electrodos y aislantes	1	225	225	31.50	256.50
14	Contrucción recipiente de vidrio	1	30	30	4.20	34.20
15	Prisioneros	2	0.08	0.16	0.02	0.18
16	Tuerca M16x2	4	0.5	2	0.28	2.28
17	Fuente DC 15V	1	15.5	15.5	2.17	17.67
18	Rele auxiliar 2p 12Vdc 5A	2	8.93	17.86	2.50	20.36
19	Base para rele 8 pines	2	1.91	3.82	0.53	4.35
20	Rele auxiliar 4p 12Vdc 5A	2	8.93	17.86	2.50	20.36
21	Base para rele 14 pines	2	2.77	5.54	0.78	6.32
22	Portafusible simple 32A	2	2.38	4.76	0.67	5.43
23	Fusible Ceramico 4A	2	0.5	1	0.14	1.14
24	Bornera riel dim 4mm leipold	14	0.4	5.6	0.78	6.38
25	Bornera riel dim 4mm tierra leipold	1	1.13	1.13	0.16	1.29
26	Tapa bornera leipold	4	0.17	0.68	0.10	0.78
27	Tope bornera leipold	9	0.21	1.89	0.26	2.15
28	Caneleta ranurada 25x25 gris dexion	1	5.96	5.96	0.83	6.79
29	Terminal puntera 16 awg rojo	1	2.23	2.23	0.31	2.54
30	Cable flexible #18 awg	11	0.19	2.09	0.29	2.38
31	Enchufe polarizado 15A 125V Cooper	1	2.51	2.51	0.35	2.86
32	Toma corriente polarizado	2	2.91	5.82	0.81	6.63
33	Cinta doble face	1	3.27	3.27	0.46	3.73
34	Jack AC polarizado	1	0.75	0.75	0.11	0.86
35	Cable de poder para Jack	1	2.9	2.9	0.41	3.31
36	Pantalla Delta Electronic 4"	1	440	440	61.60	501.60
37	Fuente 2A para pantalla Delta Electronic	1	50.89	50.89	7.12	58.01
COSTO TOTAL						1424.32

4.3 Discusión de resultados

De las pruebas realizadas en el equipo, se pueden determinar las siguientes observaciones:

- Los electrodos de prueba no pueden ser separados a una distancia mayor a lo recomendado por la norma de ASTM D-877 de 2.54 mm como máximo para disco de cara plana, ya que hemos verificado, que, al efectuar la prueba de rigidez dieléctrica del aire contenido en el recipiente de ensayo, el arco de chispa generado, salta por donde le resulta más fácil, y no necesariamente por los electrodos.
- El equipo genera un alto voltaje, el cual se puede apreciar un arco eléctrico entre los electrodos a partir de los 15 Kv, estando dentro de los parámetros de medición para los aceites dieléctricos, conforme a lo estipulado en la tabla #1 del Capítulo 2 referente a pruebas más importantes para aceites aislantes en operación, estableciendo un mínimo de 18KV como voltaje de ruptura para aceites a granel.
- Se observa, que luego de efectuar el testeo al aceite, si no se realiza una pausa entre testeos de unos 5min, el aceite es como si quedara ionizado, ya que el voltaje de ruptura disminuye en unos 3KV. Por lo que es importante hacer pausas luego cada testeo efectuado, para que el aceite repose.
- Se verifica que el campo magnético inducido por el arco eléctrico, afecta a las señales de comunicación del HMI.
- Se observa que el voltaje de ruptura que se determina usando electrodo de cara semiesférica es mayor, frente al electrodo de cara plana, ya que se tiene un solo punto tangente entre las caras semiesféricas que se encuentran a la distancia de testeo. Mientras que, en el electrodo de cara plana, se tiene un área mayor en la cual se produce el arco de chispa.

- De los 3 aceites testados, los resultados son los esperados, ya que tanto el aceite cocina y el aceite de motores de combustión no poseen propiedades dieléctricas altas, su voltaje de ruptura oscila entre los 88 a 200 voltios. El aceite de refrigeración, que es el más próximo en propiedades al aceite de los transformadores tiene un voltaje de ruptura de 18KV.

4.4 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones:

1. Se cumplieron con todos los objetivos e hipótesis específicos planteados en el capítulo 1 de generalidades.
2. De las pruebas de testeo realizado a los aceites de muestra, los resultados son los esperados, el aceite dieléctrico cumplió con alcanzar un voltaje de ruptura de 18KV mínimo establecido en la normativa vigente.
3. Se estudiaron los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos para la implementación del prototipo de equipo de medición de resistencia dieléctrica, es así que se determinó utilizar transformador elevador para generar el alto voltaje. El control del incremento del voltaje se lo realizó mediante un motor a pasos que comanda un dimmer electrónico.
Se elaboraron las respectivas placas electrónicas para control de chispa, conexión y comunicación de controladores, sensores y HMI respectiva.

4. Se construyó el prototipo de medición de resistencia dieléctrica, su estructura mecánica está compuesto por plancha de acero inoxidable de 1.2 mm de espesor, la cual contiene los componentes eléctricos y electrónicos de funcionamiento. El equipo cuenta con un interfaz humano maquina HMI por medio de una pantalla touch screen, que permite al usuario realizar las configuraciones y accionamiento del equipo.

5. El equipo construido, permite testear el pulso eléctrico para el cual, el fluido que se almacene en el recipiente alcanza su voltaje de ruptura. El equipo está diseñado para alcanzar un máximo de 60Kv.

Para efectuar el testeo, el equipo se enmarca en el cumplimiento a la normativa vigente, para la medición de la Rigidez Dieléctrica de los aceites aislantes de origen mineral, para lo cual utiliza 2 tipos de electrodos de prueba discos planos y semiesféricos, los cuales deben ser de material de bronce como se estipuló en la tabla #3 del capítulo 2.

6. El costo de la construcción del equipo de medición de resistencia dieléctrica alcanzó un monto de \$1424,32. Considerando que es un prototipo, y los gastos generados durante la curva de aprendizaje de desarrollo y diseño del equipo, el costo del equipo es factible de aminorarse, realizando algunas mejoras en las dimensiones físicas del equipo.

Recomendaciones:

1. Redefinir las dimensiones físicas del equipo, para aminorar su costo y peso, permitiendo que el equipo sea más fácil de transportar.
2. Para disminuir el peso del equipo, se podría determinar utilizar plancha de aluminio, material que es más liviano. Tomando en cuenta que su dureza es menor que el acero inoxidable.
3. El equipo de testeo debe funcionar alejado de otros equipos que produzcan campos magnéticos, para evitar interferencias en las comunicaciones.
4. Ver la factibilidad de utilizar cableado de instrumentación y del tipo blindado para aminorar la interferencia en las comunicaciones de los controladores, por el alto voltaje generado.
5. Para mejorar el aislamiento de todos los componentes que conforman el conjunto de chispa como electrodos, soportes y brazos, se deberá analizar la factibilidad de utilizar aisladores cerámicos que se adapten a la geometría de los componentes, así como también usar cableado eléctrico para el alto voltaje que posea mayor capacidad de aislamiento. Esta mejora necesariamente implicaría que el costo del equipo se incremente.

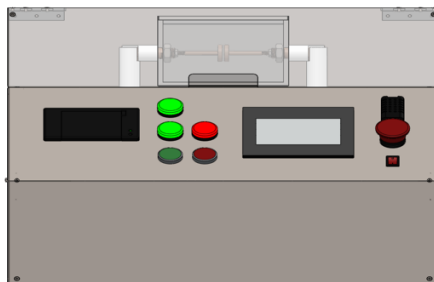
Anexos

A1: Manual de usuario

MANUAL DE USUARIO

Este manual tiene por objetivo dar a conocer al usuario los distintos elementos básicos que componen el equipo de medición, y su forma de operación para un correcto uso.

EQUIPO DE MEDICION DE VOLTAJE DE RUPTURA DE ACEITES DIELECTRICOS DE TRANSFORMADORES



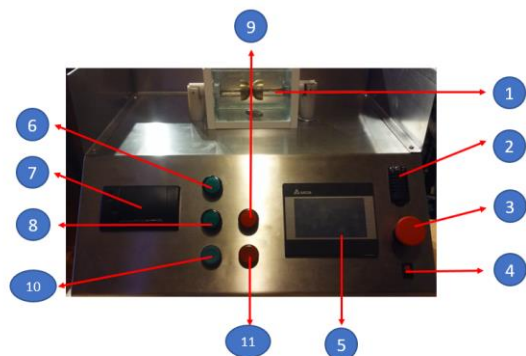
Marca: CDRO
 Versión: #001
 Made in: Ecuador

ESPECIFICACIONES

Voltaje de Alimentación	110 VAC
Frecuencia	60 Hz
Voltaje de salida en electrodos	0 – 60 KV
Fusible Internos Placa Control	Tipo Cerámico 4A
Fusible PCB <u>Dimmer</u> electrónico	Tipo Botella 32A
Material Electrodo	De Bronce
Forma del Electrodo	Cara semiesférica y Plana

DESCRIPCIÓN GENERAL

(Vista Frontal)



Ord	Función
1	Recipiente de Aceite
2	Sensor Humedad Temperatura
3	Paro de Emergencia
4	Switch de encendido
5	HMI Touch
6	Luz piloto condiciones
7	Impresora Resultados Test
8	Alto voltaje activado
9	Alto voltaje detenido
10	Pulsador de Start
11	Pulsador de Stop

DESCRIPCIÓN

(Componentes)

1. Recipiente de aceite con electrodos de bronce
2. Sensor de Humedad-Temperatura modelo AM2301
3. Pulsador paro de emergencia para pausar el testeo
4. Switch con luz piloto de energizado del equipo
5. Pantalla Touch del HMI marca Delta Electronic de 4.3" para operación del Equipo
6. Luz piloto de cumplimiento condiciones
7. Mini impresora térmica
8. Luz piloto color verde Alto voltaje activado
9. Luz piloto color rojo Alto voltaje desactivado
10. Pulsador de Start de Testeo
11. Pulsador de Stop de Testeo

DESCRIPCIÓN GENERAL

(Vista Posterior)



Ord	Función
1	Conector para cable de alimentación a 110V

MODO DE USO

- Conectar el cable de poder a la toma de la red eléctrica pública



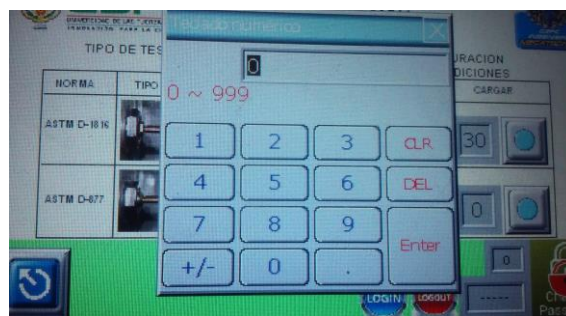
- Presione el botón de encendido del equipo, se encenderá la luz roja del switch de encendido.



- Encendido el equipo, se debe a través de la HMI pantalla configuraciones, especificar el valor de temperatura y humedad para las precondiciones, y seleccionar el tipo de electrodo de prueba a usar.



Ingrese el valor de humedad y temperatura a través del teclado digital, y haga clic en el botón azul para cargar los valores al controlador.



Active con el selector el tipo de electrodo de prueba a utilizar





- En la pantalla de HMI de proceso, el usuario debe registrarse en el botón login:

Usuario Básico: Clave 11111111

Usuario Administrador: Clave 33333333

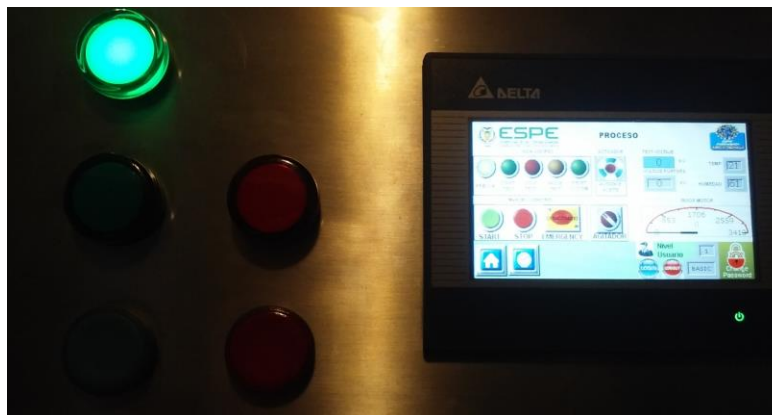
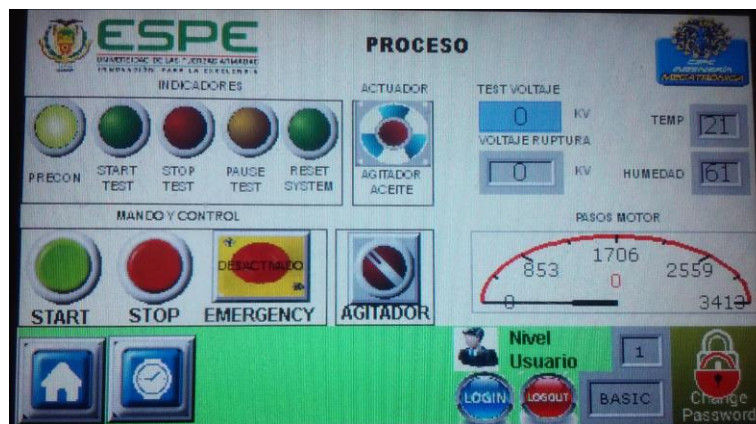


De clic en login, e ingrese con el teclado virtual la clave según su nivel de usuario



- El sistema testea automáticamente la temperatura y humedad relativa del ambiente y la compara con los valores de configuración
- Cumplida las Precondiciones, una luz piloto se enciende tanto en la HMI como en el equipo, permitiendo que se pueda ejecutar el testeo.

Precondiciones cumplidas



- Para iniciar el test, pulse el botón verde de Start iniciando el alto voltaje y para detener el testeo pulse el botón rojo de Stop deteniendo el alto voltaje generado

Iniciando alto voltaje



Deteniendo alto voltaje



- El botón paro de emergencia permite ejecutar un pause del proceso, deteniendo el movimiento del motor a pasos que controla al dimmer electrónico.



- Una vez sentido el voltaje de ruptura, el sistema se detiene y reinicia variables para un nuevo test.
- El voltaje de ruptura se visualiza en la HMI

FAQ'S

¿Mi equipo no enciende?	<ul style="list-style-type: none"> • Primeramente, verifique que la toma corriente de la red eléctrica pública a la cual esta conectando la fuente, este energizada con un voltaje nominal de 110V. • Verifique que el cable de alimentación este en buen estado, verificando continuidad entre terminales de entrada y salida
¿El equipo enciende, pero no tengo voltaje de salida en los electrodos?	<ul style="list-style-type: none"> • Verifique el estado de los fusibles cerámicos interno del sistema de control, ubicado en la parte posterior de la fuente. • Verificar el estado del fusible interno en la placa PCB del dimmer electrónico. • Verificar estado de la bobina del relé de armadura asociado al Start
¿La pantalla HMI no enciende?	<ul style="list-style-type: none"> • Verifique voltaje de entrada y salida de la fuente DC de 24 Voltios, si no tiene voltaje de salida y los fusibles cerámicos están bien, cambie la fuente esta quemada.
¿Sale humo de mi equipo?	<ul style="list-style-type: none"> • Apague inmediatamente la fuente y desconéctela de la toma corriente • Envíela el equipo al servicio técnico autorizado
¿Tengo voltaje en los electrodos de prueba, pero los led indicadores no encienden?	<ul style="list-style-type: none"> • Los leds están quemados, pero el equipo funcionará normalmente, remplazar los leds de ser posible. • Guíese del estado del proceso del testeo, mediante los leds de la pantalla HMI
¿Al encender el equipo, salto chispas internamente?	<ul style="list-style-type: none"> • Desconecte la fuente del toma corriente de inmediato • Verificar que conecto la una toma corriente de 110V • El equipo, tiene cortos circuitos internamente, envíela a reparación al servicio técnico autorizado.
¿Mi equipo produce ruido interno al iniciar el testeo?	<ul style="list-style-type: none"> • Es normal, el ruido se debe al movimiento del motor a pasos que controla al dimmer.

GARANTÍA

El equipo Chispómetro CDRO tiene una garantía limitada de 1 año. La garantía no cubre daños ocasionados por el usuario debido a:

- Mala utilización del equipo
- Golpes y destrucción de los elementos
- Manipulaciones internas a la fuente por terceras personas no autorizadas

SERVICIO TÉCNICO

Para brindarle un mejor soporte a sus inconvenientes con el equipo, comuníquese al servicio técnico.

Técnicos: Ing. Christian Revelo, Ing. David Revelo

Email: christ_revelo@yahoo

Telf: 022348-032

Localidad: Quito – Ecuador

A2: Sentencias programación Controlador Principal

Las sentencias de programación del controlador principal son:

```
//UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
//PROGRAMA EQUIPO TESTER DE VOLTAJE DE RUPTURA
//SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
//LIBRERIA PARA SENSORES DHT
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 26 // Pin del Arduino al cual esta conectado el pin 2 del sensor (Cable
Amarillo)
#define DHTTYPE DHT21 // DHT 21 (AM2301) Defino el tipo de sensor a utilizar
//INICIALIZA EL SENSOR
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

//CONFIGURACION MOTOR A PASOS CON SU DRIVER
//DRIVER MOTOR A PASOS
#define IN1 50
#define IN2 48
#define IN3 46
#define IN4 44
//CONFIGURACION DE VARIABLES PARA MOTOR A PASOS
signed int steps_left=0;// Grados por paso:  $5.625^{\circ}/64 = 0,087890625^{\circ}$ 
boolean Direction = true;
int Steps = 0; // Empiece en paso cero
```



```
int Paso [ 8 ][ 4 ] =
{ { 1, 0, 0, 0},
  { 1, 1, 0, 0},
  { 0, 1, 0, 0},
  { 0, 1, 1, 0},
  { 0, 0, 1, 0},
  { 0, 0, 1, 1},
  { 0, 0, 0, 1},
  { 1, 0, 0, 1}
};
```

```
//CONFIGURACION DE INTERRUPCIONES PARA EL CONTROL DEL SISTEMA
```

```
//Definiendo variables para cada interrupcion
```

```
volatile int contador = 0; // Variable auxiliar comparar interrupcion
```

```
volatile int contador1 = 0; // Variable auxiliar comparar interrupcion
```

```
volatile int contador2 = 0; // Variable auxiliar comparar interrupcion
```

```
volatile int contador3 = 0; // Variable auxiliar comparar interrupcion
```

```
int n = contador; //Variable que registra la interrupcion sensor temperatura
```

```
int n1 = contador1; //Variable que registra la interrupcion para dimmer
```

```
int n2 = contador2; //Variable que registra la interrupcion para voltaje ruptura
```

```
int n3 = contador3; //Variable que registra la interrupcion para fin de carrera del reinicio
```

```
long T0 = 0 ;      //Variable para determinar el tiempo de pulsar boton para usar con millis()

int inicio=0;     //Variable para controlar el pulso para activar la interrupcion INT0

int avanza=0;     //Variable para activar el avance motor a pasos

int reinicio=0;   //Variable para reiniciar el testeo en cada ciclo

int pasosruptura=0; //Variable registra los pasos de ruptura del motor a pasos

int voltajeruptura=0; //Variable que registra el valor en voltios de la ruptura

int ruptura=0;    //Variable registra el voltaje de ruptura promedio de los 5 testeos realizados

int x=0;          //variable auxiliar de pasos de ruptura para efectuar calculos

int parar=0;     //Variable para evitar asignar valor al vector voltaje

int pasos=0;     //Variable registra los pasos motor que se envia arduino HMI

int voltio=0;    //Variable registra el voltaje ruptura que se envia al arduino HMI

int valor1=0;    //Variable registra la humedad sensada y que se envia al arduino HMI

int valor2=0;    //Variable registra la temperatura sensada y que se envia al arduino HMI

//Constantes de curva suavizada para obtener voltaje de ruptura

float p1=3.239E-15;

float p2=-3.034E-11;

float p3=9.513E-08;

float p4=-9.87E-05;

float p5=0.02906;

float p6=-0.5206;
```

```

int voltaje[5]={0,0,0,0,0};//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo

//CONFIGURACION DE VARIABLES PARA SETEO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
DESDE HMI

int temp=30; //Valor de seteo para la temperatura

int hum=70; //Valor de seteo para la humedad

int t=0; //Variable que registra lectura sensor humedad temperatura

int h=0; //Variable que registra lectura sensor humedad temperatura

//Variable para el filtro digital

float alpha=0.8,Yk=0,Xk=0,Xk1=0,Yk1=0,Yk2=0,Yk3=0,Ykn=0;

//CONFIGURACION DEL ARDUINO

void setup() {

    pinMode(13,OUTPUT); //Apago led pin 13 del arduino

    Serial.begin(9600); //Inicializo comunicacion serial

    Serial.println("UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS\n\nPrueba de sensor
DHTxx!");

    dht.begin(); //Inicializo sensor temperatura

    Serial.println("Lectura de sensor");

//DECLARACIONES PINES DE LAS INTERRUPCIONES

```

```
pinMode(2, INPUT); //Lee interrupcion INT0 Para activar Sensor de Humedad Temperatura
pinMode(3, INPUT); //Lee interrupcion INT1 Ejecuta el avance del motor a pasos
pinMode(21, INPUT); //Lee interrupcion INT2 Ejecuta el retroceso del motor a pasos
pinMode(20, INPUT); //Lee interrupcion INT3 Sensa la activacion fin de carrera en el
retroceso
```

```
pinMode(19, INPUT); //Lee interrupcion INT4 Ejecuta el stop de la prueba
```

```
//DECLARACION DE PINES DE ACTIVACION DE LED
```

```
pinMode(52,OUTPUT); //Activar led para indicar cambio pulso para interrupcion automatica
sensor temperatura
```

```
pinMode(27,OUTPUT); //Activar led de precondiciones
```

```
pinMode(28,OUTPUT); //Activar led Start dimmer
```

```
pinMode(29,OUTPUT); //Activar led Stop dimmer
```

```
pinMode(5, INPUT); //Recibe señal del paro de emergencia
```

```
pinMode(7, OUTPUT); //Activa Led de Reinicio
```

```
//DECLARO COMO SALIDAS PINES DEL DRIVER MOTOR A PASOS
```

```
pinMode(IN1, OUTPUT); //Defino como salida a IN1
```

```
pinMode(IN2, OUTPUT); //Defino como salida a IN2
```

```
pinMode(IN3, OUTPUT); //Defino como salida a IN3
```

```
pinMode(IN4, OUTPUT); //Defino como salida a IN4
```

```
//DECLARO FUNCIONES PARA LAS INTERRUPCIONES
```

```

attachInterrupt( 0, Sensor, FALLING); //Llama interrupcion sensor humedad
attachInterrupt( 1, Dimmer, HIGH); //Llama interrupccion dimmer avanzar
attachInterrupt( 2, Ruptura, HIGH); //Llama interrupccion dimmer retroceder
attachInterrupt( 3, Reinicio, HIGH); //Llama interrupccion dimmer reiniciar
attachInterrupt( 4, Stop, HIGH); //Llama interrupccion Stop

```

```
//DECLARO PIN PARA COMUNICACION PASOS ENTRE ARDUINOS
```

```
pinMode(8, OUTPUT); //Registra en valor del steps_left para enviar al otro arduino y mostrar
en HMI
```

```
pinMode(4, OUTPUT); //Registra envia Voltaje de Ruptura
```

```
pinMode(6, OUTPUT); //Registra envia Valor temperatura sensada
```

```
pinMode(9, OUTPUT); //Registra envia Valor humedad sensada
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
//ASIGNACION DE SETEO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA
```

```
Xk=analogRead(A0); //Lectura del pwm de humedad
```

```
Xk1=analogRead(A1); //Lectura del pwm de temperatura
```

```
//Filtro digital para corrección
```

```
Yk=alpha*Xk+(1-alpha)*Yk1;//Asignacion de humedad
```

```
Yk1=Yk;
```

```
Yk3=alpha*Xk1+(1-alpha)*Yk2;//Asignacion de temperatura
```

```
Yk2=Yk3;
```

```
//Asigno y ajustaje del rango del valor leído y filtrado para su comparacion con el sensado
```

```
hum=map(Yk,0,1023,0,255);
```

```
temp=map(Yk3,0,1023,0,255);
```

```
//PULSO ACTIVAR AUTOMATICAMENTE LA INTERRUPCION SENSOR
```

```
TEMPERATURA
```

```
if(inicio==0){
```

```
  //Modulo Rele las salidas se activan en LOW
```

```
  //Inicio con los led Apagados
```

```
  digitalWrite(7,LOW); //Apago Led de Reinicio
```

```
  digitalWrite(27,HIGH); //Apago led precondiciones
```

```
  digitalWrite(28,HIGH); //Apago led Start
```

```
  digitalWrite(29,HIGH); //Apago Led Stop
```

```
  //Generar pulso automatico para activar INT0
```

```
  digitalWrite(52,HIGH); //Activo en Alto
```

```
  delay(1000); //Retardo 5 seg
```

```
  digitalWrite(52,LOW); //Activo en Bajo
```

```
  delay(100); //Retardo 1/2 seg
```

```
  inicio=1; //Asigno valor a Inicio=1
```

```
}
```

```
//LECTURA DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA
```

```
if (n != contador){
```

```
Serial.print("\nHumedad Seteada: ");

Serial.print(hum); //Muestro humedad seteada

Serial.print(" %\t");

Serial.print("Temperatura Seteada: ");

Serial.print(temp); //Muestro temperatura seteada

Serial.println(" *C ");

// Obtiene la Humedad del Sensor

float h = dht.readHumidity();

valor1=map(h,0,100,0,255); //Convierto rango sensado de humedad en bits

analogWrite(6,valor1); //Envio en bit al arduino hmi la humedad en bits

// Obtiene la Temperatura en Celsius del Sensor

float t = dht.readTemperature();

valor2=map(t,0,80,0,255); //Convierto rango sensado de temperatura en bits

analogWrite(9,valor2); //Envio en bit al arduino hmi la temperatura en bits

//Imprime la humedad y temperatura

Serial.print("\nHumedad sensada: ");

Serial.print(h); //Muestro humedad sensada

Serial.print(" %\t");

Serial.print("Temperatura sensada: ");

Serial.print(t); //Muestro temperatura sensada

Serial.println(" *C ");
```

```
n = contador;

// Control de errores, valida que se obtuvieron valores para los datos medidos
if (isnan(h) || isnan(t)) {

    Serial.println("Falla al leer el sensor DHT!");

    inicio=0;//Reset para volver a activar interrupcion INT0 cuando falla al leer sensor

    return;

}

//Definicion de Precondiciones en temperatura y humedad
if((h<hum)&&(t<=temp)){ //Si cumple precondiciones

    digitalWrite(27,LOW); //Enciendo Led Precondiciones cumplidas

    delay(250); //Retardo 250 ms

    Serial.print("\nPrecondiciones Cumplidas: ");

    Serial.print("\nContador: ");

    Serial.print(contador);

    Serial.print("\nContador1: ");

    Serial.print(contador1);

    Serial.print("\nParar: ");

    Serial.print(parar);

    Serial.print("\nInicie Test: ");

    Serial.print("\n");

}

else{//Si no cumple precondicones vuelve a iniciar sensado de temperatura y humedad
```



```

digitalWrite(27,HIGH);//Apago led Precondiciones

delay(500);

inicio=0;      //Reset para volver a activar interrupcion cuando falla al leer sensor

Serial.print("\nPrecondiciones No Cumplidas: ");

delay(500);    //Retardo 500 ms

}

}

//ACTIVACION DEL DIMMER AVANZA MOTOR A PASOS

if ((n1 != contador1) && (contador>0))//Solo cuando se haya cumplido las precondition, podra
funcionar el dimmer

{

digitalWrite(27,HIGH); //Apaga led condiciones

//AVANZA MOTOR A PASOS

if(steps_left<3413&&avanza==0)

{

digitalWrite(28,LOW); // Enciende led start

stepper() ;      // Llama Funcion Stepper

steps_left++;   // Un paso menos

pasos=map(steps_left,0,3413,0,255);//Convierto rango pasos en bits

analogWrite(8,pasos); // Envio en bit los pasos al arduino HMI

delay (1) ;

Serial.println(steps_left);

```

```
if(steps_left>3412){  
  
    steps_left=3413;  
  
    avanza=1; //Registra el avance del motor a pasos al llegar al total de pasos  
  
    digitalWrite(28,HIGH); //Apaga led start  
  
  
    n1 = contador1 ;  
  
    Direction=false; //Motor Regresa a posicion inicial si no hay deteccion de ruptura  
  
    pasosruptura=steps_left; //Asigno pasos a variable  
  
    x=pasosruptura; //Asigno pasos a variable  
  
  
    voltajeruptura=(p1*pow(x,5)+p2*pow(x,4)+p3*pow(x,3)+p4*pow(x,2)+p5*x+p6); //Calculo  
    voltaje de ruptura  
  
    Serial.print("\nvoltajeruptura=");  
  
    Serial.print(voltajeruptura);  
  
    Serial.print("\n");  
  
    delay(250);  
  
    if(voltajeruptura>110){  
  
        voltajeruptura=110; //Correccion de voltaje al llegar al limite  
  
    }  
  
    }  
  
    }  
  
    }
```

```
//ACTIVACION DEL RETROCESO MOTOR A PASOS

if (n2 != contador2||avanza==1)//Si detecta chispa el sensor, dimmer retrocede

{

//RETROCESO MOTOR A PASOS

if(steps_left>0)

{

digitalWrite(28,HIGH); //Apaga led Start

digitalWrite(29,LOW); //Enciende led de Stop

stepper() ; // Avanza un paso

steps_left-- ; // Un paso menos

pasos=map(steps_left,0,3413,0,255);//Convierto rango pasos en bits

analogWrite(8,pasos);//Envio en bit los pasos al arduino HMI

delay (1);

Serial.println(steps_left);

if(steps_left<1){

steps_left=0;

n2 = contador2 ;

reinicio=1;

}

}

}
```

```
//ACTIVA REINICIO DEL SISTEMA

if (n3 != contador3&&reinicio==1)//Si se activa fin de carrera
{
    digitalWrite(29,HIGH);//Apaga led stop

    Serial.print("\nReiniciando sistema");
    delay(100);
    Serial.print("\npasos de ruptura=");
    Serial.print(pasosruptura);
    delay(100);

    //Reiniciando variables
    reinicio=0;
    inicio=0;
    avanza=0; //Encero variable para activar avance del motor a pasos
    //parar=0;
    Serial.print("\ncontador1=");
    Serial.print(contador1);
    Serial.print("\nparar=");
    Serial.print(parar);
    delay (5000) ;
    Direction=true;
```

```
//CALCULANDO VOLTAJE DE RUPTURA

//Prueba 1

if(contador1==1&&parar==0){

  Serial.print("\nx=");

  Serial.print(x);

  Serial.print("\nvoltajeruptura=");

  Serial.print(voltajeruptura);

  voltaje[0]=voltajeruptura;

  Serial.print("\nvoltaje[0]= ");

  Serial.print(voltaje[0]);

  voltio=map(voltajeruptura,0,110,0,255);//Convierto en bit el voltaje al arduino HMI

  analogWrite(4,voltio);//Envio en bit el voltaje al arduino HMI

}

//Prueba 2

if(contador1==2&&parar==0){

  Serial.print("\nx=");

  Serial.print(x);

  Serial.print("\nvoltajeruptura=");

  Serial.print(voltajeruptura);

  voltaje[1]=voltajeruptura;

  Serial.print("\nvoltaje[1]= ");
```

```
Serial.print(voltaje[1]);

voltio=map(voltajeruptura,0,110,0,255);//Convierto en bit el voltaje al arduino HMI

analogWrite(4,voltio);//Envio en bit el voltaje al arduino HMI

}

//Prueba 3

if(contador1==3&&parar==0){

  Serial.print("\nx=");

  Serial.print(x);

  Serial.print("\nvoltajeruptura=");

  Serial.print(voltajeruptura);

  voltaje[2]=voltajeruptura;

  Serial.print("\nvoltaje[2]= ");

  Serial.print(voltaje[2]);

  voltio=map(voltajeruptura,0,110,0,255);//Convierto en bit el voltaje al arduino HMI

  analogWrite(4,voltio);//Envio en bit el voltaje al arduino HMI

}

//Prueba 4

if(contador1==4&&parar==0){

  Serial.print("\nx=");

  Serial.print(x);

  Serial.print("\nvoltajeruptura=");
```

```
Serial.print(voltajeruptura);

voltaje[3]=voltajeruptura;

Serial.print("\nvoltaje[3]= ");

Serial.print(voltaje[3]);

voltio=map(voltajeruptura,0,110,0,255);//Convierto en bit el voltaje al arduino HMI

analogWrite(4,voltio);//Envio en bit el voltaje al arduino HMI

}

//Prueba 5

if(contador1==5&&parar==0){

  Serial.print("\nx=");

  Serial.print(x);

  Serial.print("\nvoltajeruptura=");

  Serial.print(voltajeruptura);

  voltaje[4]=voltajeruptura;

  Serial.print("\nvoltaje[4]= ");

  Serial.print(voltaje[4]);

  voltio=map(voltajeruptura,0,110,0,255);//Convierto en bit el voltaje al arduino HMI

  analogWrite(4,voltio);//Envio en bit el voltaje al arduino HMI

  //Calculo voltaje de ruptura promedio

  ruptura=(voltaje[0]+voltaje[1]+voltaje[2]+voltaje[3]+voltaje[4])/5;

  voltio=map(ruptura,0,110,0,255);
```

```
analogWrite(4,voltio);//Envio voltaje de ruptura al HMI

Serial.print("\nvoltaje ruptura= ");

Serial.print(ruptura);

Serial.print("\ntesteo finalizado ");

contador1=0;

delay(1);

voltaje[0]=0;

voltaje[1]=0;

voltaje[2]=0;

voltaje[3]=0;

voltaje[4]=0;

voltajeruptura=0;

ruptura=0;

contador=contador2=contador3=0;

n=n1=n2=n3=0;

}

parar=0; //Reiniciando variable para volver a testear

Serial.print("\nparar=");

Serial.print(parar);

}

//PAUSAR SISTEMA

if(digitalRead(5)==HIGH){

  pausa1(); //Llamo a la funcion Pausa1 al activar el Paro Emergencia
```



```
}
```

```
}
```

```
//DEFINICION DE FUNCIONES
```

```
//FUNCION PARA PAUSAR ARDUINO POR ACTIVACION DEL PARO DE  
EMERGENCIA
```

```
void pausa1(){
```

```
//Parpadeo del led Pin 13 del arduino al activar paro emergencia
```

```
digitalWrite(13,HIGH);
```

```
delay(250);
```

```
digitalWrite(13,LOW);
```

```
delay(250);
```

```
if(digitalRead(5)==HIGH){
```

```
pausa1();//Llamo a la funcion pausa1
```

```
}
```

```
else{
```

```
loop(); //Llamo a la funcion loop
```

```
}
```

```
}
```

```
//FUNCION PARA LECTURA SENSOR TEMPERATURA
```

```
void Sensor(){
```

```

if ((millis() > T0 + 500)&&digitalRead(5)==LOW){
    contador++; //Se incrementa la variable contador a = 1, que sirve precondition para
funcionamiento del dimmer

    T0 = millis();
}
}

//FUNCION PARA ACTIVAR DIMMER y AGITADOR DE ACEITE DEL SISTEMA
void Dimmer(){
    if ((millis() > T0 + 500)&&(digitalRead(5)==LOW)){
        contador1++;
        T0 = millis();
    }
}

//FUNCION DE DETECCION VOLTAJE RUPTURA
void Ruptura(){
    if ((millis() > T0 + 500)&&(digitalRead(5)==LOW)){
        //contador2++;

        n1 = contador1 ;
        T0 = millis();

        pasosruptura=steps_left;

```

```

Serial.print("\npasos=");

Serial.print(pasosruptura);

x=pasosruptura;

Serial.print("\nx=");

Serial.print(x);

voltageruptura=(p1*pow(x,5)+p2*pow(x,4)+p3*pow(x,3)+p4*pow(x,2)+p5*x+p6);

Serial.print("\nvoltageruptura=");

Serial.print(voltageruptura);

Serial.print("\n");

Direction=false;

contador2++ ;

}

}

//FUNCION PARA STOP SISTEMA

void Stop(){

  if ((millis() > T0 + 500)&&(digitalRead(5)==LOW)){

    avanza=1;

    parar=1; //Variable para evitar asignar valor al vector voltaje

    contador1--;

    T0 = millis();

    digitalWrite(28,LOW); //Enciendo led Stop

```

```

Direction=false;

contador=0;

delay(1);

n=0;

}

}

//FUNCION PARA REINICIO SISTEMA

void Reinicio(){

  if ((millis() > T0 + 500)&&(digitalRead(5)==LOW)){

    contador3++ ;

    T0 = millis();

    digitalWrite(7,HIGH);//Enciendo led reinicio

    Direction=false;

  }

}

//FUNCIONES PARA EL MOTOR A PASOS

//Funcion para avanzar

void stepper() //Avanza un paso

{

  digitalWrite( IN1, Paso[Steps][ 0] );

  digitalWrite( IN2, Paso[Steps][ 1] );

```

```
digitalWrite( IN3, Paso[Steps][ 2] );
```

```
digitalWrite( IN4, Paso[Steps][ 3] );
```

```
SetDirection();
```

```
}
```

```
//Funcion para cambio de direccion
```

```
void SetDirection()
```

```
{
```

```
    if(Direction==false)
```

```
        Steps++;//Avanza
```

```
    else
```

```
        Steps--;//Retrocede
```

```
    Steps = ( Steps + 8 ) % 8 ;
```

```
}
```

A3: Sentencias programación Controlador Secundario HMI

Las sentencias de programación del controlador secundario para el HMI son:

```
//UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

//PROGRAMA PARA HMI DEL EQUIPO TESTER DE VOLTAJE DE RUPTURA

//LIBRERIA PARA COMUNICACION CON MODULO ETHERNET

#include <SPI.h>//comunicacion con pin de la shield

#include <Ethernet.h>//Comunicacion co0n shield

//LIBRERIAS PARA EMPLEAR LA COMUNICACION MODBUS TCP IP

#include "Mudbus.h"//LLama a la libreria

//Crea la clase Mb de la libreria mudbus

Mudbus Mb;//llama a las instancias o funciones (lectura o escrituta)

//Configuraciones

int voltio=0;      //Almacena valor voltaje recibido por puerto analogico A0

int voltajeruptura=0;  //Muestra valor voltaje convertido al rango adecuado y muestra en HMI

int steps=0;      //Almacena valor pasos motor recibido por puerto analogico A1

int pasos=0;      //Muestra valor pasos motor convertido al rango adecuado y muestra en
HMI

int valor1=0;      //Registra valor sensado temperatura

int valor2=0;      //Registra valor sensado humedad
```

```
int temp=0;          //Muestra valor temperatura sensada convertido al rango adecuado y
muestra en HMI

int hume=0;         //Muestra valor humedad sensada convertido al rango adecuado y muestra
en HMI

int tem=0;          //Inicializo temperatura seteada en HMI a enviar al arduino en 0

int hum=0;          //Inicializo humedad seteada en HMI enviar al arduino en 0

int voltaje[5]={0,0,0,0,0}; //Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo

int testeo=0;

int ruptura=0;

long T0 = 0 ;      //Variable para determinar el tiempo de pulsar boton para usar con millis()

void setup() {

// put your setup code here, to run once:

//DATOS PARA EL ETHERNET

uint8_t mac[]={0x00, 0x18, 0x3E, 0x01, 0x1C, 0x45}; //Direccion mac generica para todo
arduino

byte ip[]= { 192,168,0,98}; //Direccion ip para arduino

//Inicializa la comunicacion Ethernet

Ethernet.begin(mac,ip); // Inicia ethernet con la mac e iP del arduino
```

```
Serial.begin(9600); //Inicializo comunicacion serial

//CONFIGURACION DE PINES PARA INTERACTUAR CON HMI

//Pines de Salida envia señal desde el HMI al arduino

pinMode (5, OUTPUT); //Señal de Start

pinMode (6, OUTPUT); //Señal de Stop

pinMode (7, OUTPUT); //Señal de paro emergencia

pinMode (9, OUTPUT); //Encender agitador de aceite

pinMode (11, OUTPUT); //Salida PWM de temperatura

pinMode (12, OUTPUT); //Salida PWM de humedad

//Pines de Entrada lee señal desde el arduino

pinMode (4, INPUT); //Enciende led precondiciones

pinMode (3, INPUT); //Enciende led start

pinMode (2, INPUT); //Enciende le stop

pinMode (8, INPUT); //Enciende le reinicio

}

void loop() {

// put your main code here, to run repeatedly:

//INICIA LA COMUNICACION MODBUS DE ARDUINO CON PANTALLA DELTA

Mb.Run(); //Inicia la comunicacion Modbus
```



```
//PULSO INICIAR AGITADOR DE ACEITE APAGADO
```

```
if(Mb.C[7]==0){  
    digitalWrite(9,HIGH);//Apaga agitador  
}
```

```
//LECTURA DE REGISTROS ANALOGICOS DESDE ARDUINO AL HMI
```

```
//LEER REGISTRO ANALOGICO PARA PASOS DEL MOTOR
```

```
steps=analogRead(A1);    //Lee valor analogico recibido del pwm de valor digital pasos del  
motor  
pasos=map(steps,0,1023,0,3413);//Conversion a voltaje de valor digital a rango de voltaje  
Mb.R[1]=(pasos);        //Envia HMI los pasos del motor
```

```
//LEER REGISTRO ANALOGICO PARA TEMPERATURA SENSADA
```

```
valor1=analogRead(A2);    //Lee valor analogico recibido del pwm de valor digital de  
temperatura  
temp=map(valor1,0,1023,0,80);//Conversion a voltaje de valor digital a rango de voltaje  
Mb.R[6]=(temp);        //Envia HMI la temperatura
```

```
//LEER REGISTRO ANALOGICO PARA HUMEDAD SENSADA
```

```
valor2=analogRead(A3);//Lee valor analogico recibido del pwm de valor digital de humedad  
hume=map(valor2,0,1023,0,100);//Conversion a voltaje de valor digital a rango de voltaje
```

```

Mb.R[7]=(hume);//Envia HMI la humedad

//LEER REGISTRO DIGITAL DESDE LA PANTALLA HMI HACIA EL ARDUINO
//PULSO PARA START TEST
if(Mb.C[1]==1){ //ESTO ES COMO DECIR DIGITALREAD C=COIL C[1] C=COIL
[1]=POSICION

digitalWrite(5,HIGH);//Salida en Alto activo Interrupcion INT1 en arduino principal

//Antirrebote para aumentar variable testeo en 1 en cada pulso
if ( millis() > T0 + 500)
{
testeo++;

T0 = millis();

//LEER REGISTRO ANALOGICO PARA VOLTAJE DE RUPTURA

voltio=analogRead(A0); //Lee valor analogico recibido del pwm de valor digital
voltaje de ruptura

voltajeruptura=map(voltio,0,1023,0,120);//Conversion a voltaje de valor digital a rango de
voltaje

Mb.R[8]=(voltajeruptura); //Envia HMI el voltaje ruptura
}
}
else{

digitalWrite(5,LOW);//Salida en bajo
}

```

```
//PULSO PARA STOP TEST
```

```
if(Mb.C[2]==1) {  
    digitalWrite(6,HIGH);//Salida en Alto activo Interrupcion INT2 en arduino principal  
    testeo=0;  
    voltio=0;  
    voltajeruptura=0;  
    ruptura=0;  
}  
else{  
    digitalWrite(6,LOW);  
}
```

```
//PULSO PARO DE EMERGENCIA
```

```
if(Mb.C[3]==1){  
    digitalWrite(7,HIGH);//Salida en Alto activo Pause Test en arduino principal  
}  
else{  
    digitalWrite(7,LOW);  
}
```

```
//PULSO ENVIAR TEMPERATURA SETEADA EN HMI AL ARDUINO PRINCIPAL
```

```
if(Mb.C[8]==1){ //Aplasto boton en HMI  
    tem=Mb.R[2]; //Almaceno valor temperatura en tem
```

```

analogWrite(11,tem);//Envio valor temperatura al arduino principal por el pin pwm 11

Mb.R[4]=tem;    //Muestro en la HMI valor temperatura seteada
}

else if(Mb.C[8]==0){

    analogWrite(11,tem);//Envio valor temperatura almacenado al arduino
}

//PULSO ENVIAR HUMEDAD SETEADA EN HMI AL ARDUINO

if(Mb.C[9]==1){    //Aplasto boton en HMI

    hum=Mb.R[3];    //Almaceno valor humedad en hum

    analogWrite(12,hum);//Envio valor humedad al arduino principal por el pin pwm 12

    Mb.R[5]=hum;    //Muestro en la HMI valor humedad seteada
}

else if(Mb.C[9]==0){

    analogWrite(12,hum);//Envio valor humedad almacenado al arduino
}

//LECTURA DATOS DIGITALES HACIA LA HMI

//LED PRECONDICIONES

if(digitalRead(4)==0){

Mb.C[0]=1;//Enciende foco precondiciones en HMI

}

else{

```

```
Mb.C[0]=0;//Apaga foco condiciones en HMI
}

//LED START
if(digitalRead(3)==0){
Mb.C[4]=1;//Enciende foco Start en HMI

//PULSO AGITADOR DE ACEITE EN ETAPA AVANCE MOTOR PASOS
if((Mb.C[7]==1)&&(Mb.C[3]==0)){
digitalWrite(9,LOW);//Enciende Agitador
}
else if((Mb.C[7]==1)&&(Mb.C[3]==1)){
digitalWrite(9,HIGH);//Apaga Agitador
}
}
else{
Mb.C[4]=0;//Apaga foco Start en HMI
}

//LED STOP
if(digitalRead(2)==0){
Mb.C[5]=1;//Enciende foco stop en HMI

//PULSO AGITADOR DE ACEITE
if((Mb.C[7]==1)&&(Mb.C[3]==0)){
```

```
digitalWrite(9,HIGH);//Apaga Agitador
}

if((digitalRead(2)==0)&&(testeo==1)){
    //Leer registro analogico
    voltaje[0]=(voltajeruptura);//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo
    voltajeruptura=0;
    voltio=0;
    Serial.print("\nVoltaje[0]=");
    Serial.print(voltaje[0]);
    Mb.R[8]=voltaje[0];
}

if((digitalRead(2)==0)&&(testeo==2)){
    //Leer registro analogico
    voltaje[1]=(voltajeruptura);//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo
    voltajeruptura=0;
    voltio=0;
    Serial.print("\nVoltaje[1]=");
    Serial.print(voltaje[1]);
    Mb.R[8]=voltaje[1];
}

if((digitalRead(2)==0)&&(testeo==3)){
    //Leer registro analogico
```

```
voltaje[2]=(voltajeruptura);//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo  
voltajeruptura=0;  
voltio=0;  
Serial.print("\nVoltaje[2]=");  
Serial.print(voltaje[2]);  
Mb.R[8]=voltaje[2];  
}
```

```
if((digitalRead(2)==0)&&(testeo==4)){
```

```
    //Leer registro analogico
```

```
    voltaje[3]=(voltajeruptura);//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo  
    voltajeruptura=0;  
    voltio=0;  
    Serial.print("\nVoltaje[3]=");  
    Serial.print(voltaje[3]);  
    Mb.R[8]=voltaje[3];  
}
```

```
if((digitalRead(2)==0)&&(testeo==5)){
```

```
    //Leer registro analogico
```

```
    voltaje[4]=(voltajeruptura);//Vector para guardar el voltaje de ruptura en cada ensayo  
    voltajeruptura=0;  
    voltio=0;
```

```
Serial.print("\nVoltaje[4]=");  
Serial.print(voltaje[4]);  
Mb.R[8]=voltaje[4];  
delay(1000);  
testeo=6;  
}  
}  
else{  
Mb.C[5]=0;//Apaga foco stop en HMI  
}  
  
//LED REINICIO  
if(digitalRead(8)==0){  
Mb.C[6]=0;//Apaga foco Reinicio en HMI  
}  
else{  
Mb.C[6]=1;//Enciende foco Reinicio en HMI  
  
if ((digitalRead(8)==1)&&(testeo==6)&&(voltaje[4]!=0)){  
//Leer registro analogico
```



```
ruptura=(voltaje[0]+voltaje[1]+voltaje[2]+voltaje[3]+voltaje[4])/5;

Serial.print("\nVoltaje Ruptura Promedio=");

Serial.print(ruptura);

Mb.R[0]=(ruptura);

voltaje[0]=0;

voltaje[1]=0;

voltaje[2]=0;

voltaje[3]=0;

voltaje[4]=0;

testeo=0;

voltajeruptura=0;

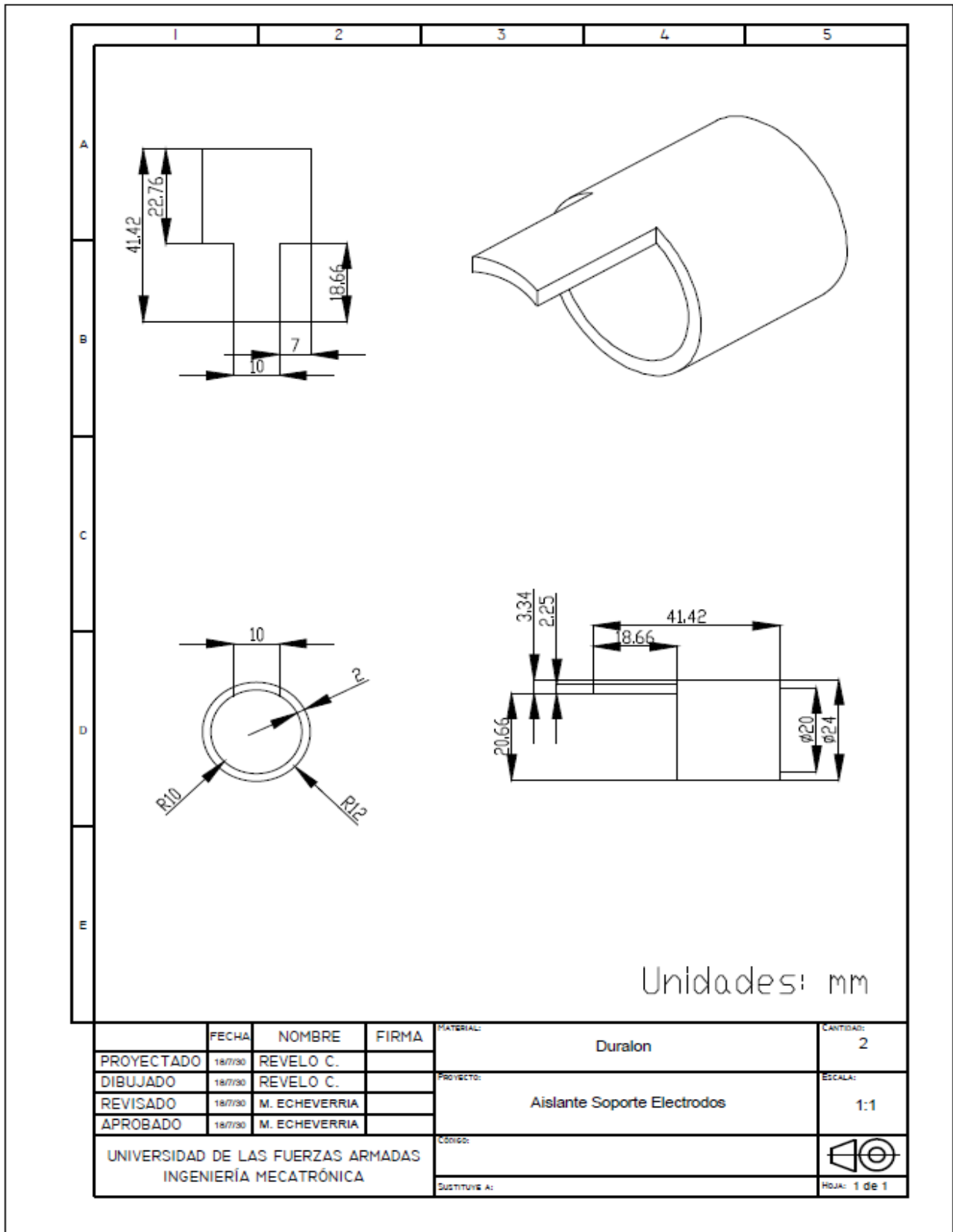
voltio=0;

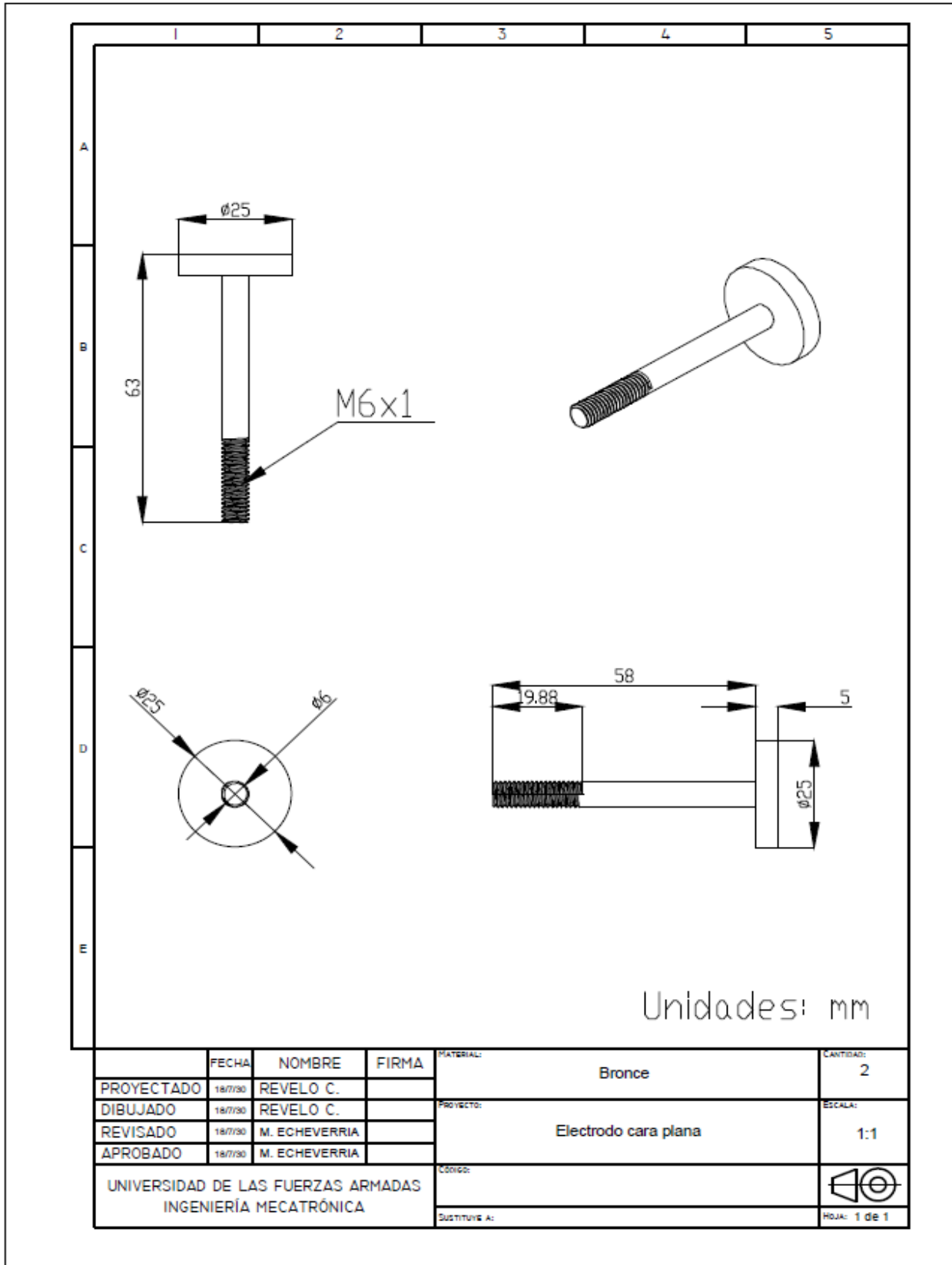
}

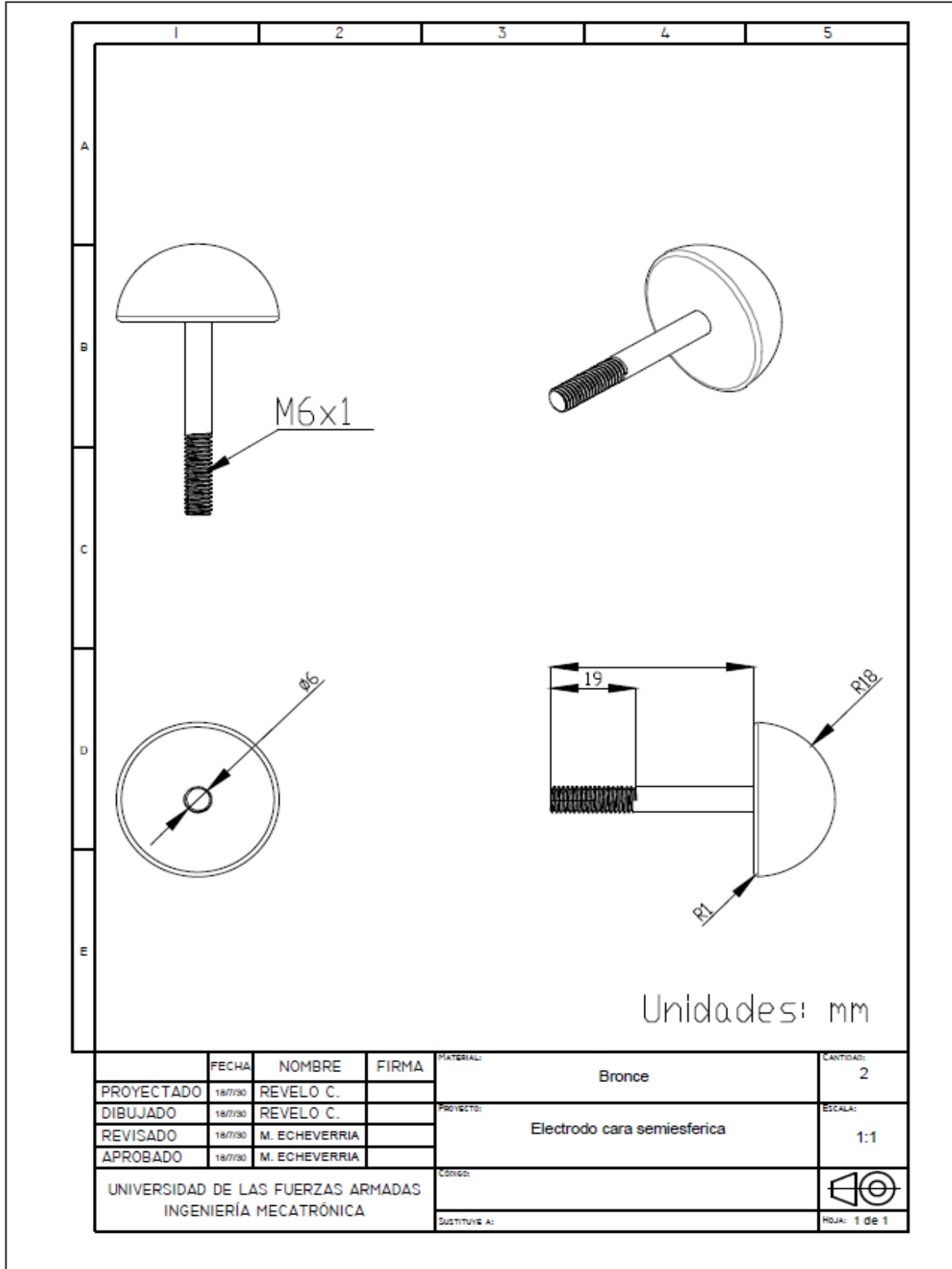
}

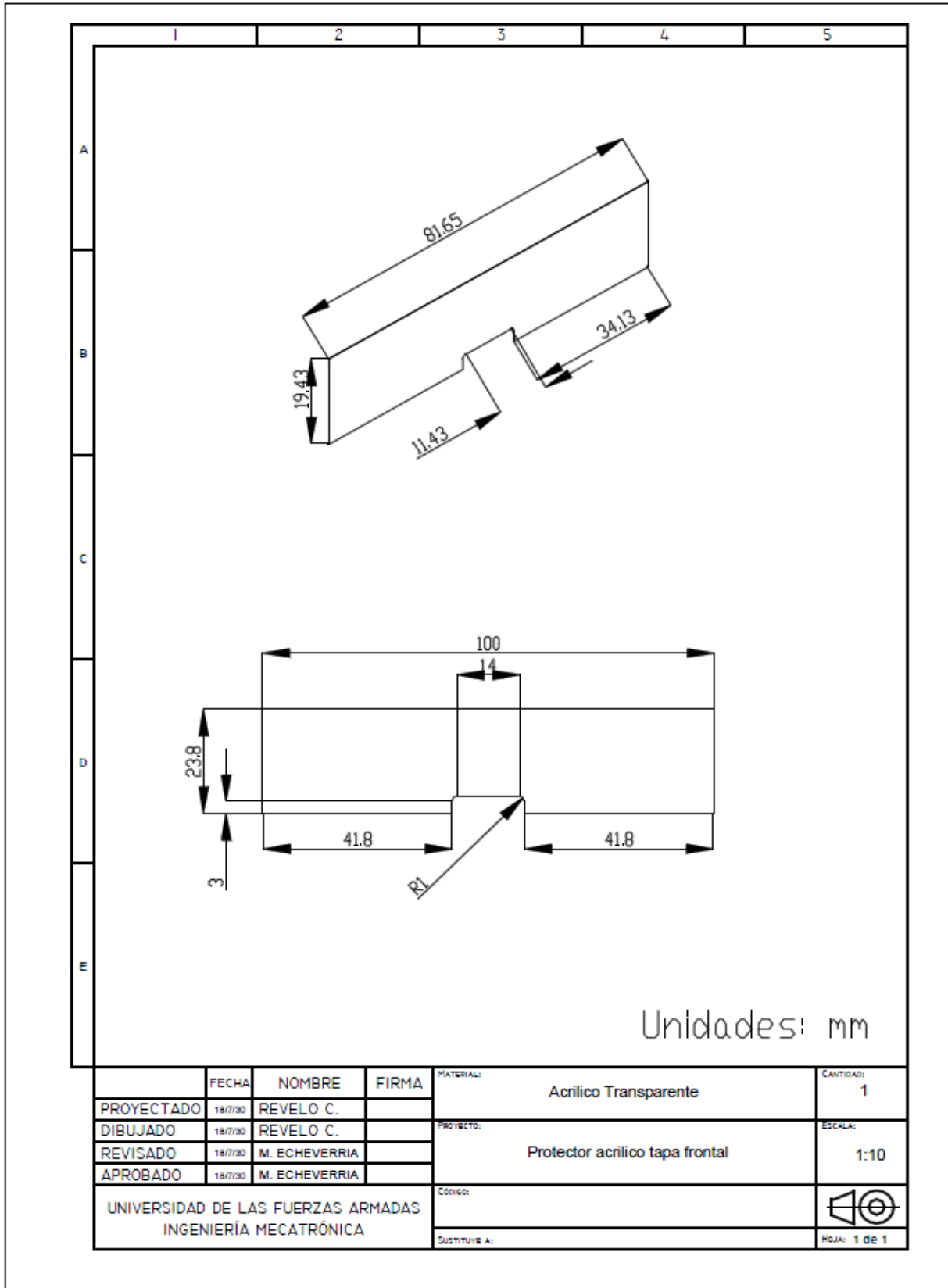
}
```


A4: Planos Mecánicos

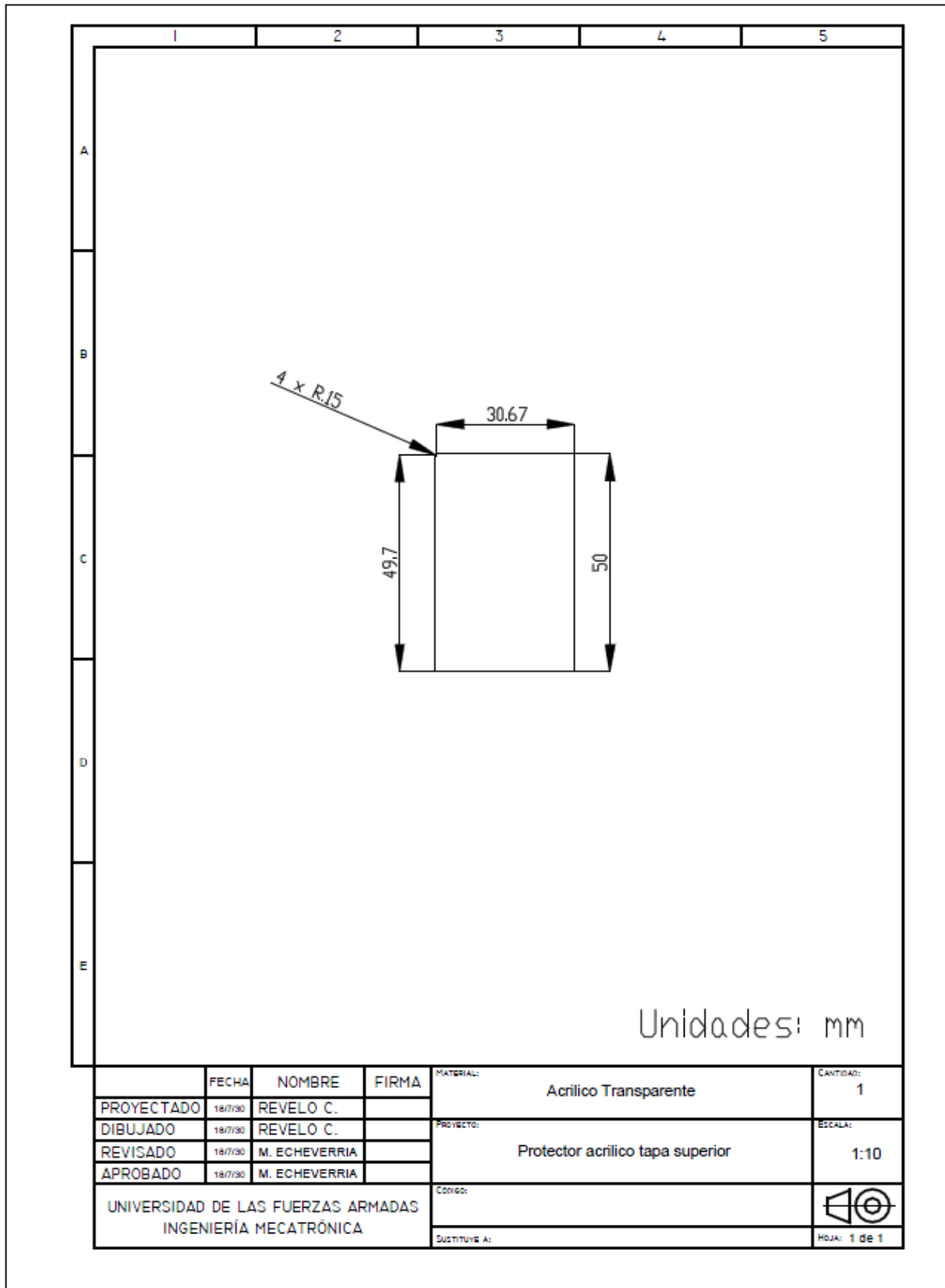


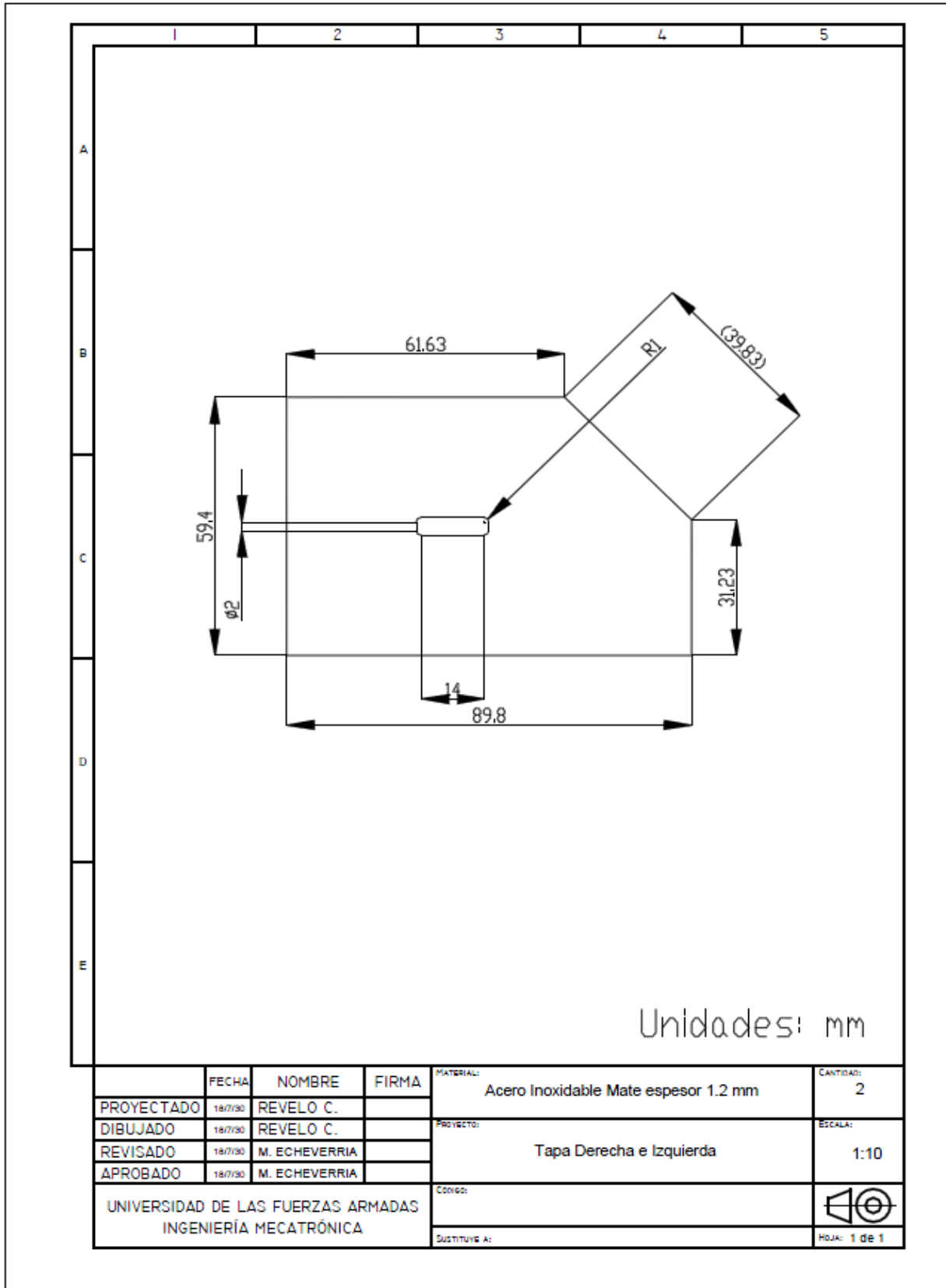


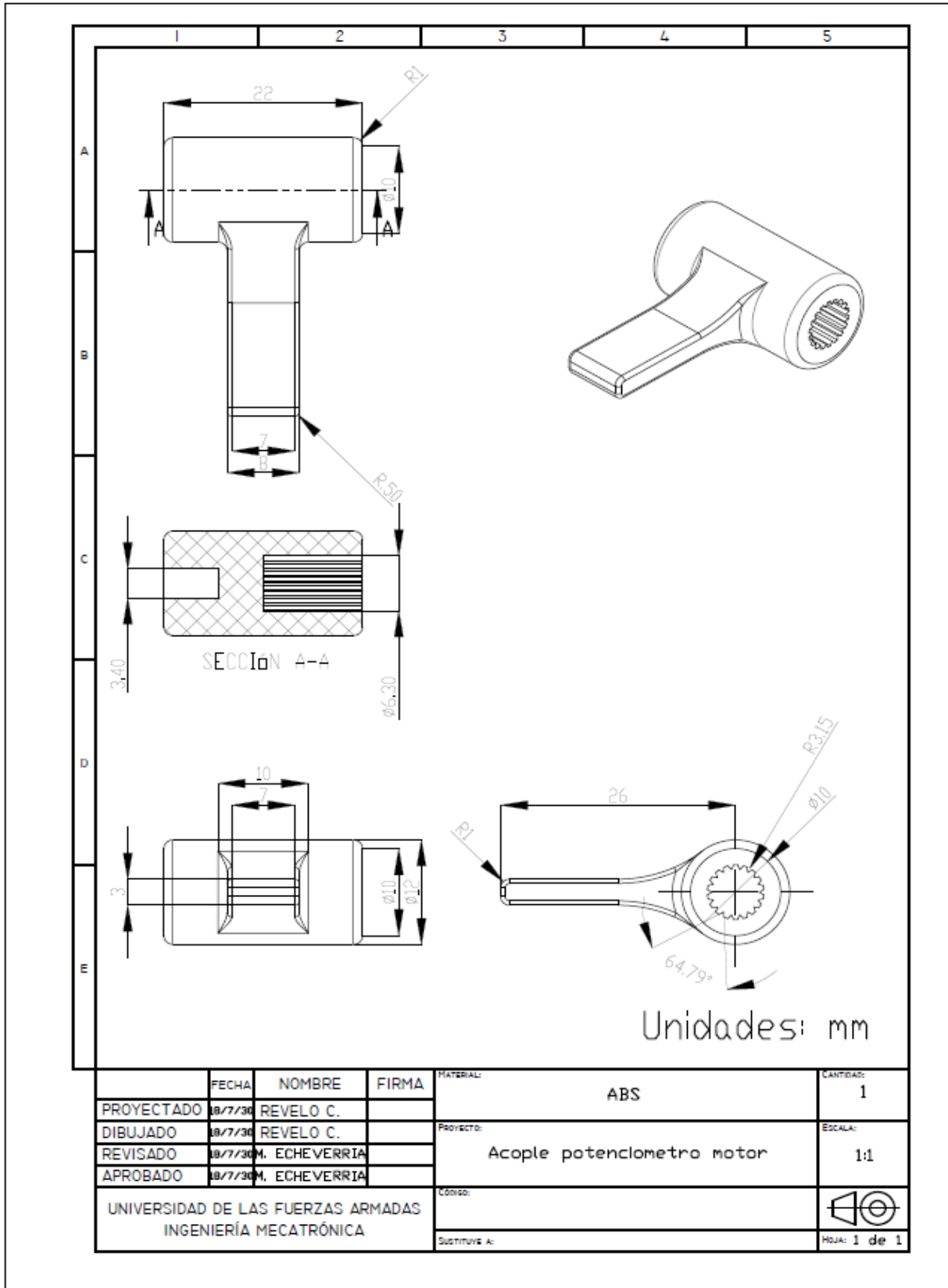





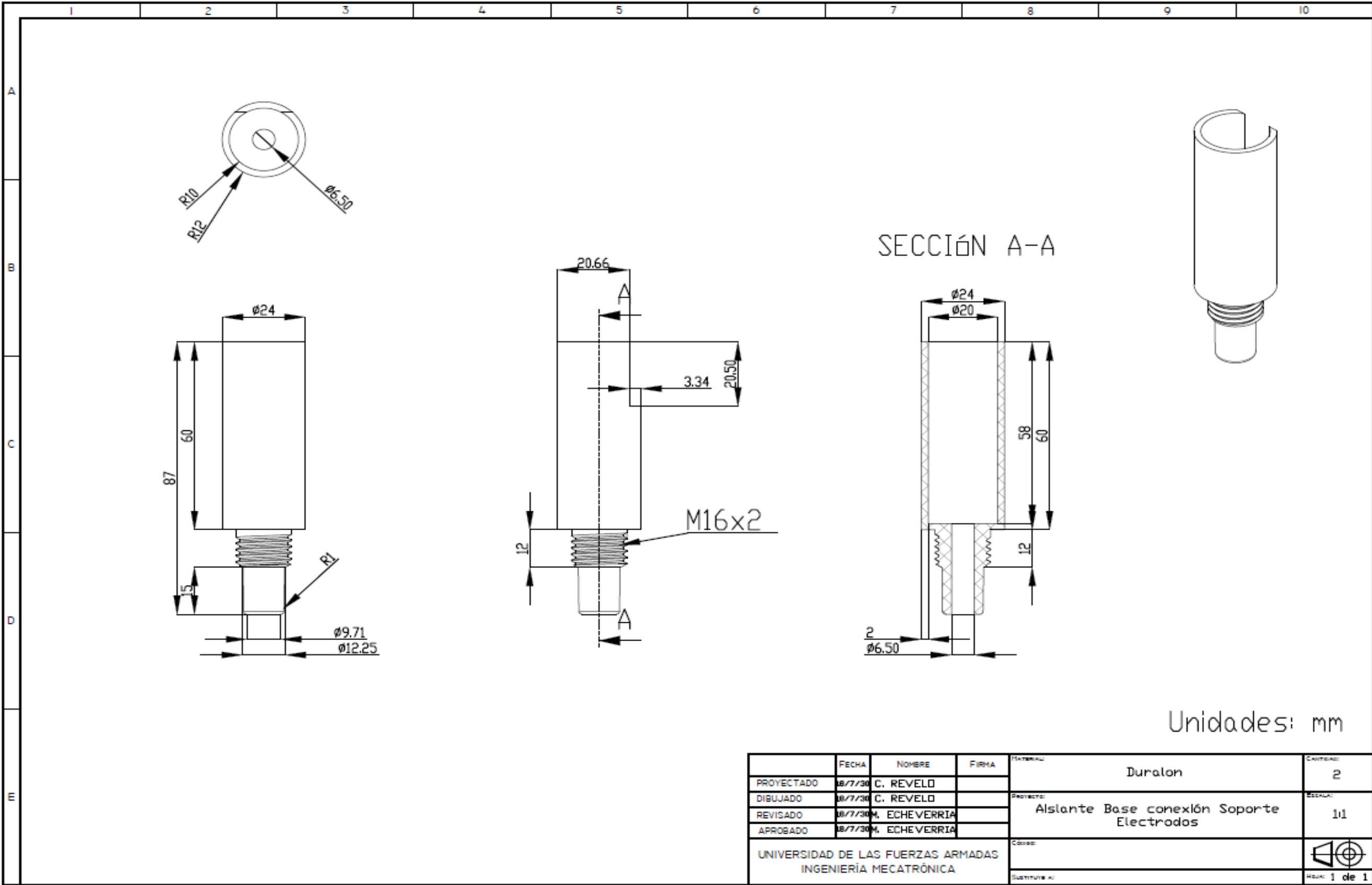
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	Acrilico Transparente	CANTIDAD:	1
PROYECTADO	18/7/90	REVELO C.		PROYECTO:	Protector acrilico tapa frontal	ESCALA:	1:10
DIBUJADO	18/7/90	REVELO C.					
REVISADO	18/7/90	M. ECHEVERRIA					
APROBADO	18/7/90	M. ECHEVERRIA					
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERIA MECATRONICA				COPIAS:			
				SUSTITUYE A:			





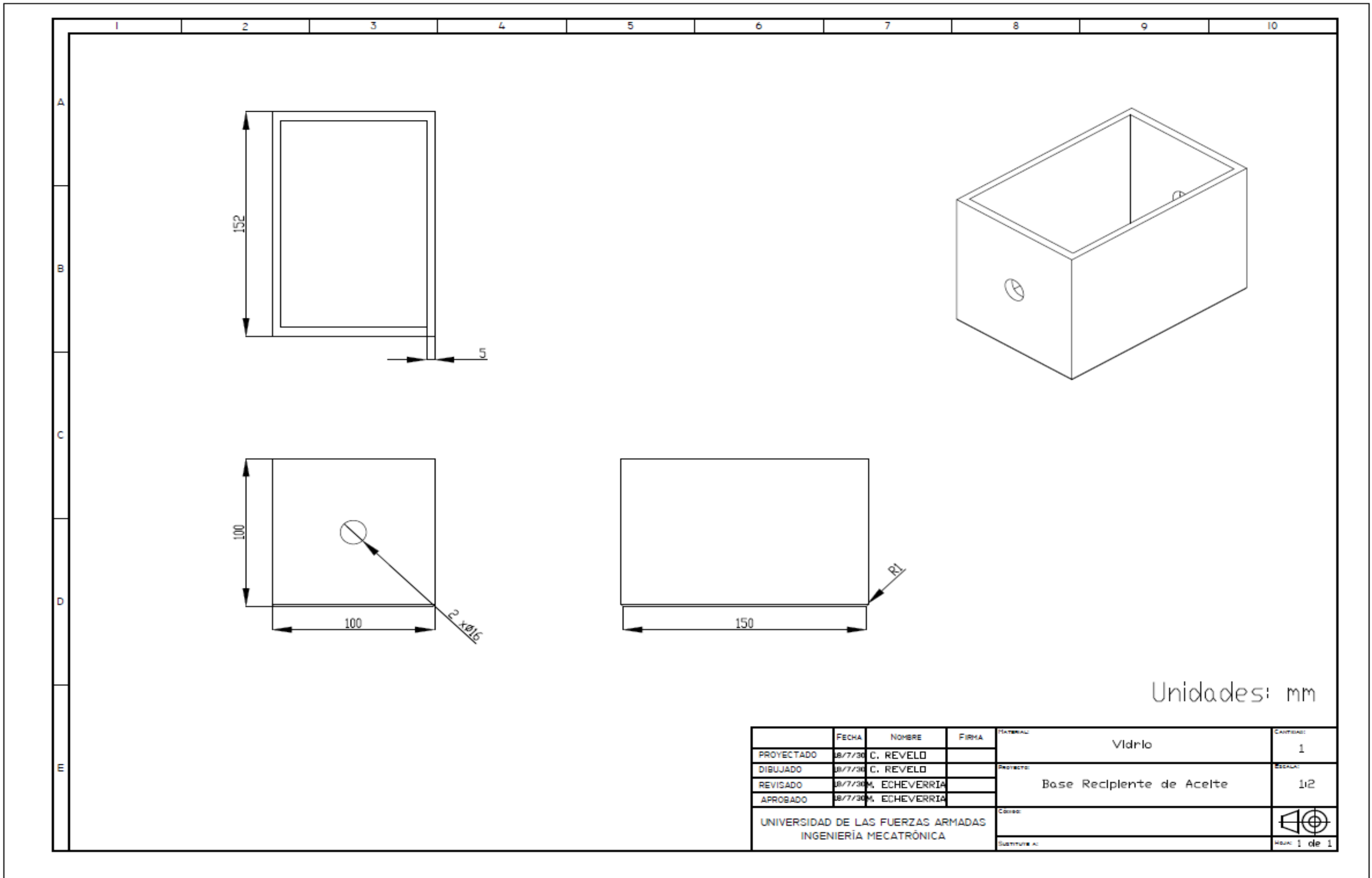


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	08/7/30	REVELO C.		ABS	1
DIBUJADO	08/7/30	REVELO C.		PROYECTO:	ESCALA:
REVISADO	08/7/30	M. ECHEVERRIA		Acople potenciómetro motor	1:1
APROBADO	08/7/30	M. ECHEVERRIA		CÓDIGO:	
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERÍA MECATRÓNICA				SUSTITUYE A:	 HOJA: 1 de 1



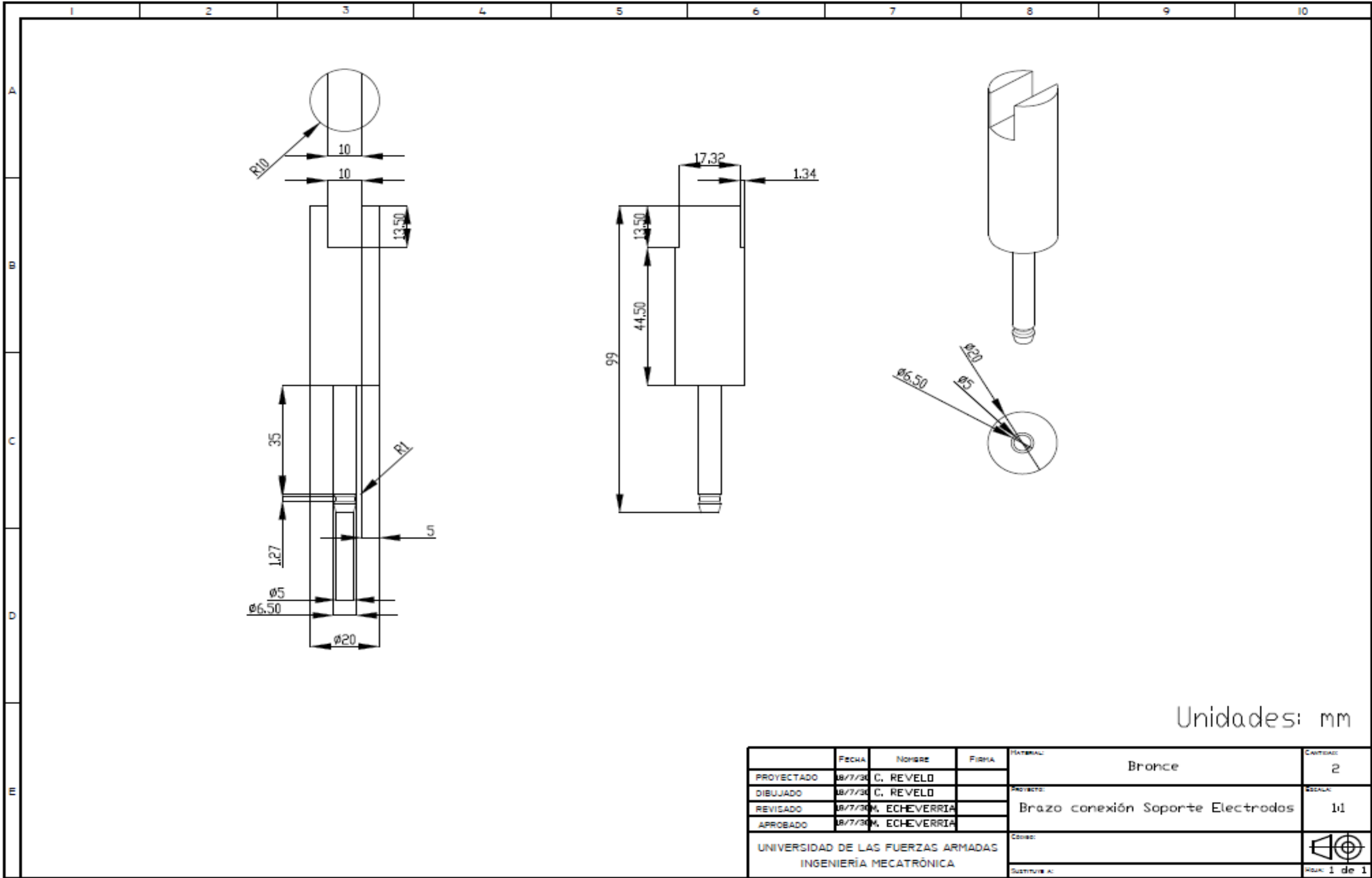
Unidades: mm

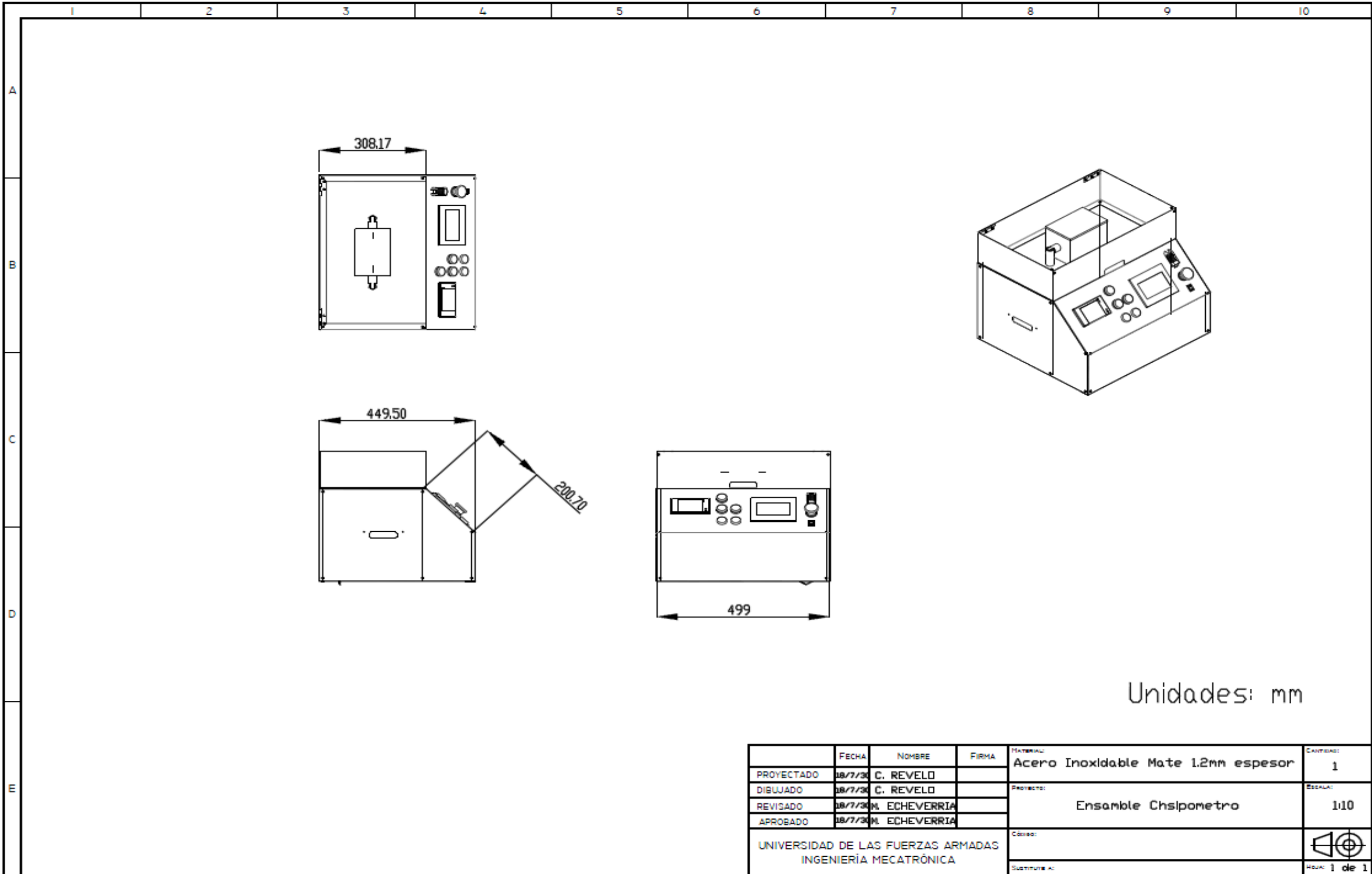
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL	Duralon	CANTIDAD	2
PROYECTADO	18/7/30	C. REVELD					
DIBUJADO	18/7/30	C. REVELD		PROYECTO	Aislante Base conexión Soporte Electrodo	ESCALA	1:1
REVISADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA					
APROBADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA					
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERÍA MECATRÓNICA				CÓDIGO			
				SUSTITUIR A:		HOJA 1 de 1	



Unidades: mm

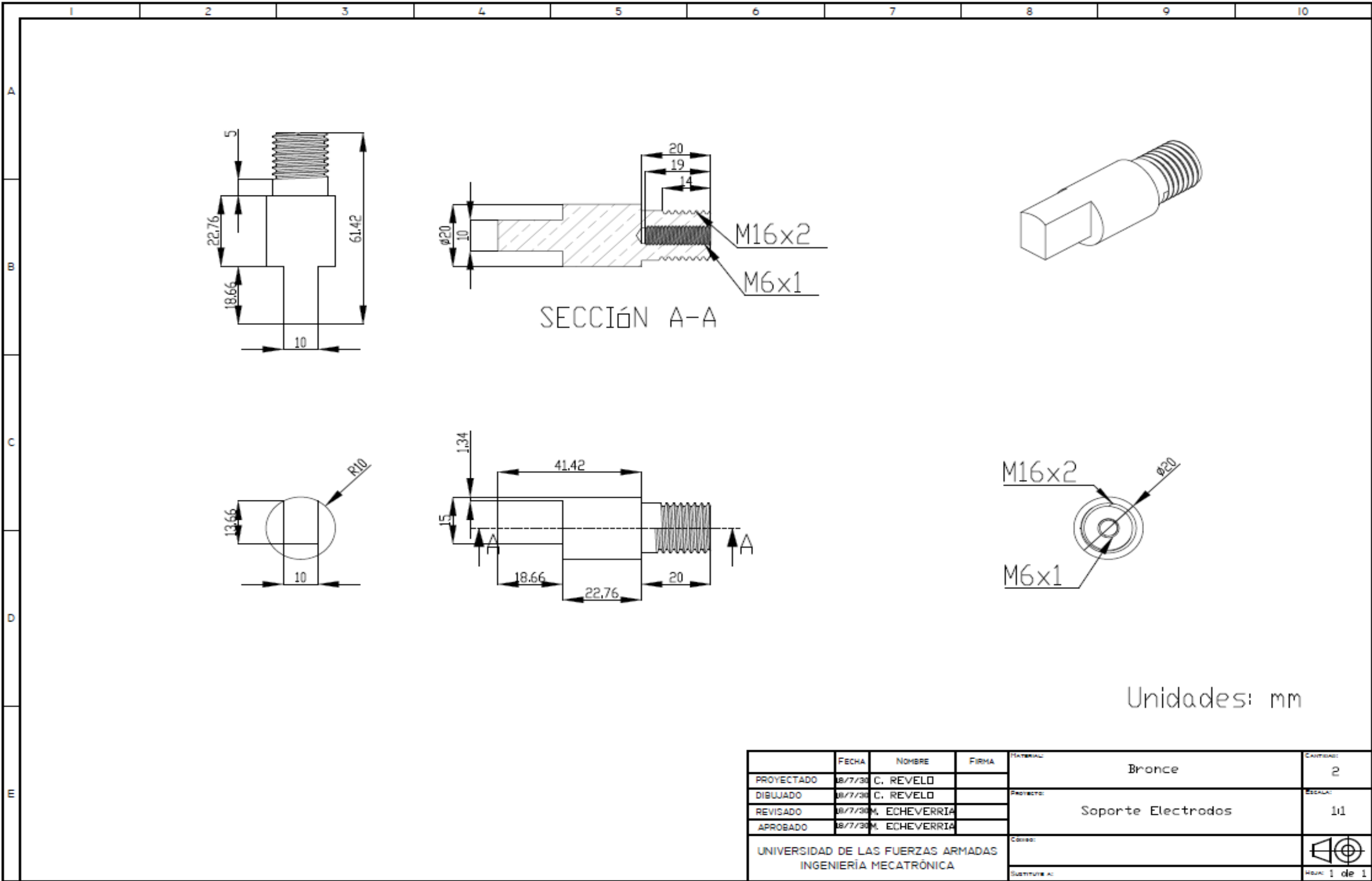
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL	CANTIDAD
PROYECTADO	18/7/30	C. REVELD		Vidrio	1
DIBUJADO	18/7/30	C. REVELD		Base Recipiente de Aceite	1±2
REVISADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA			
APROBADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA			
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERÍA MECATRÓNICA				Escala: Hoja: 1 de 1	

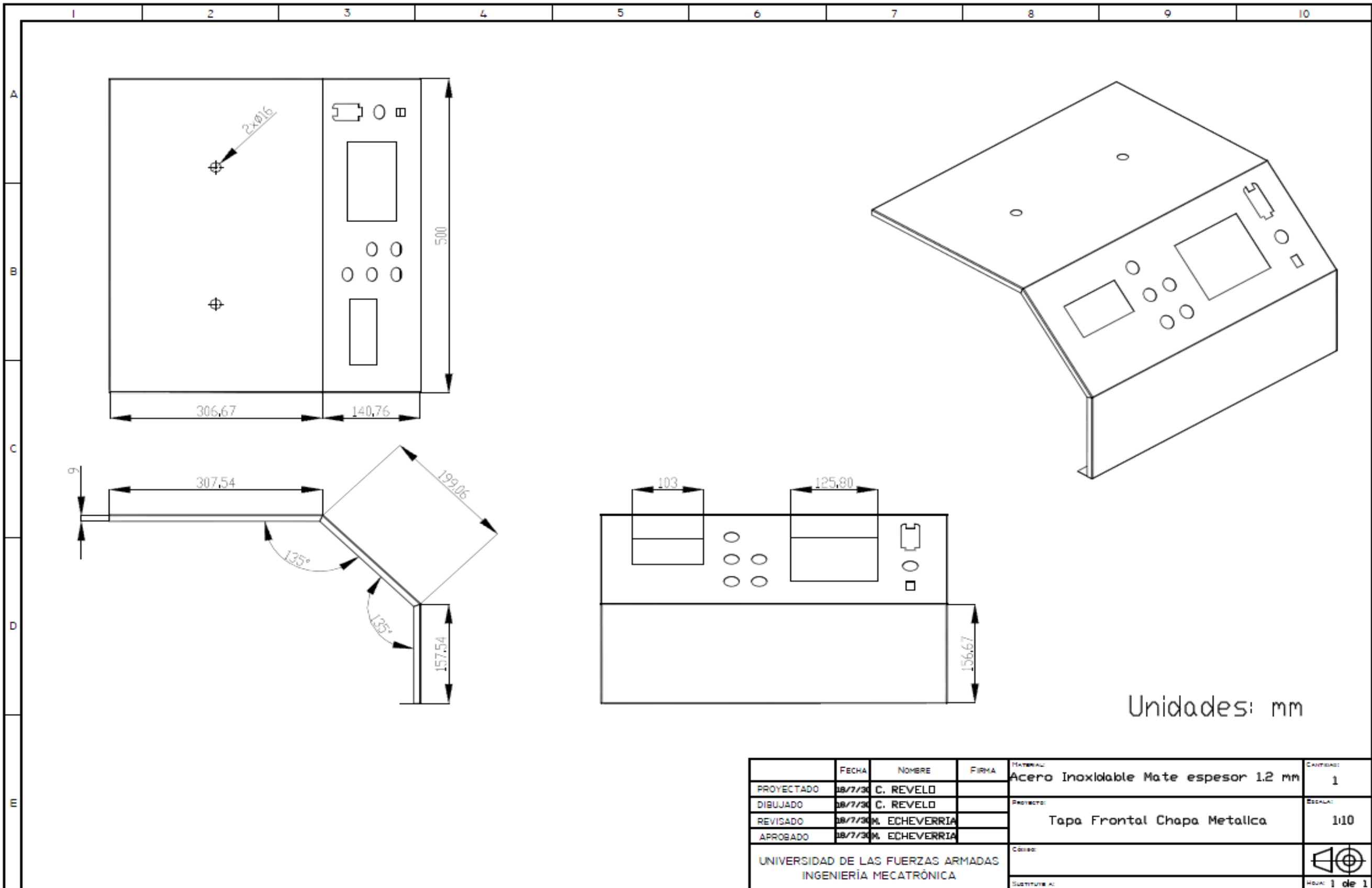




Unidades: mm

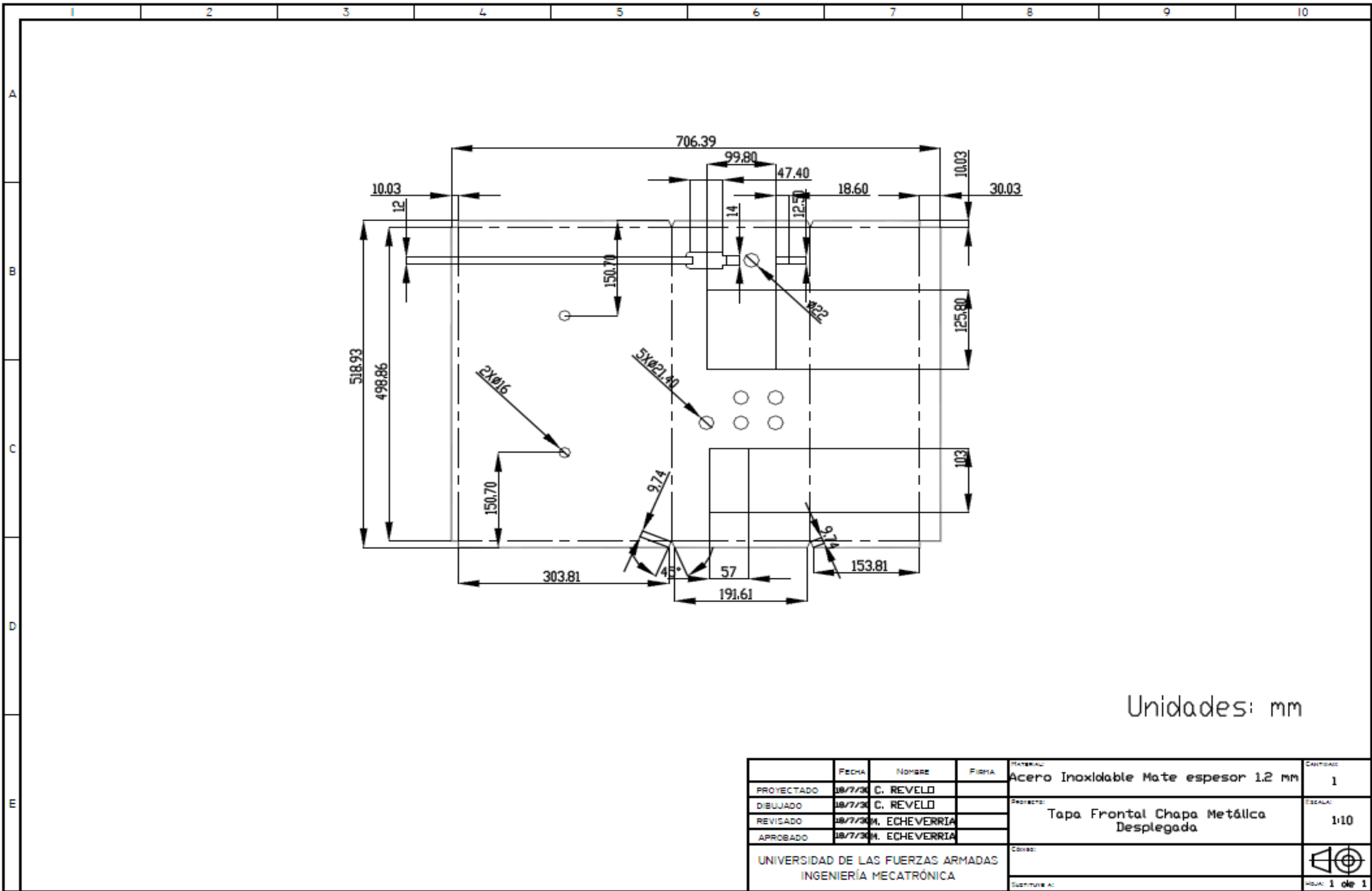
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	08/7/20	C. REVELD		Acero Inoxidable Mate 1.2mm espesor	1
DIBUJADO	08/7/20	C. REVELD		Proyecto:	ESCALA:
REVISADO	08/7/20	M. ECHEVERRIA		Ensamble Chsipometro	1:10
APROBADO	08/7/20	M. ECHEVERRIA		Construccion:	
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERIA MECATRONICA				Substituye a:	HOJA 1 de 1






Unidades: mm

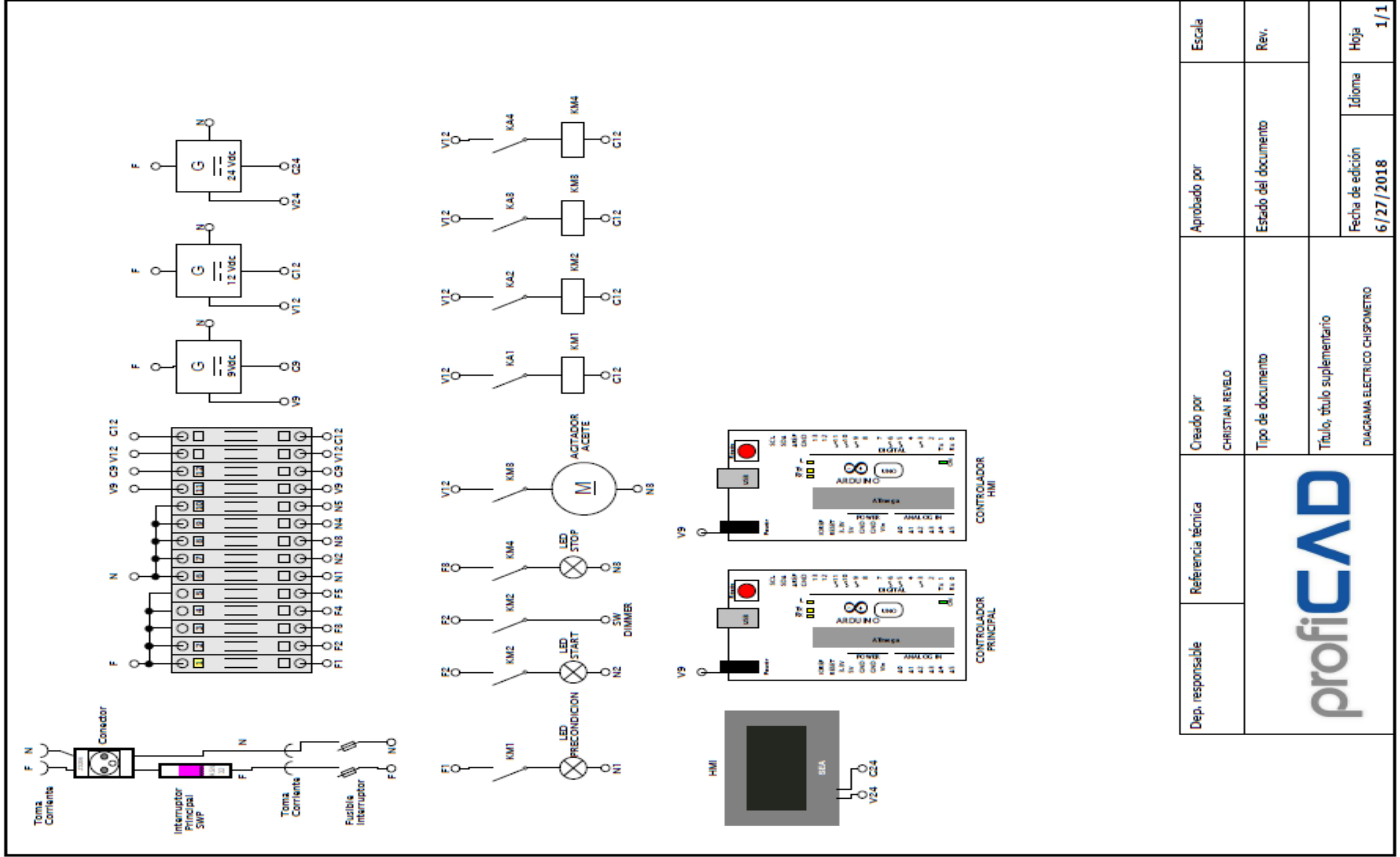
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL	CANTIDAD
PROYECTADO	18/7/30	C. REVELD		Acero Inoxidable Mate espesor 1.2 mm	1
DIBUJADO	18/7/30	C. REVELD		PROYECTO:	ESCALA:
REVISADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA		Tapa Frontal Chapa Metalica	1:10
APROBADO	18/7/30	M. ECHEVERRIA		COLECCION:	
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERIA MECATRONICA				SUSTITUIR A:	HOJA 1 de 1




Unidades: mm

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL	CANTIDAD
PROYECTADO	08/7/20	C. REVELD		Acero Inoxidable Mate espesor 1.2 mm	1
DIBUJADO	08/7/20	C. REVELD		Proyecto: Tapa Frontal Chapa Metálica Desplegada	ESCALA: 1:10
REVISADO	08/7/20	M. ECHEVERRÍA			
APROBADO	08/7/20	M. ECHEVERRÍA			
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS INGENIERÍA MECATRÓNICA				Consejo:	 Hoja: 1 de 1
				Sustituir a:	

A5: Diagrama eléctricos/electrónicos, instrumentación y control u otros necesarios, con formatos estandarizados.



Dep. responsable	Referencia técnica	Creado por CHRISTIAN REVELO	Aprobado por	Escala
		Tipo de documento Título, título suplementario DIAGRAMA ELECTRICO CHISPOMETRO	Estado del documento Rev.	Rev.
		Fecha de edición 6/27/2018	Idioma	Hoja 1/1

BIBLIOGRAFÍA

- Amperis. (2009, 10 8). *Instrumentación eléctrica y equipos de ensayo*. Obtenido de <http://amperis-products.blogspot.com/2009/10/voltaje-de-ruptura-en-aceite.html>
- Amperis. (2017, 03 10). *Equipos de medidas eléctricas e instrumentación de ensayo*. Obtenido de <http://www.amperis.com/>
- Asing, S. d. (2016, Junio 6). *Diagnóstico de Transformadores*. Obtenido de http://www.asing.es/diagnostico_transformadores.php
- BAUR. (2016, 12 06). *Ensayadores de aceites aislantes BAUR*. Obtenido de <https://baur.at/es>
- Brettis. (2014, Mayo 30). *Brettis*. Obtenido de <http://www.brettis.com/>
- Bruno, L. G. (2009, 02 14). *Ingeniería Eléctrica Explicada*. Obtenido de <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2009/09/fgfg.html>
- Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc Graw Hill.
- Corona. (2016, Mayo 26). *Corona*. Obtenido de <http://www.corona.co>
- Forestieri, J. N. (2004). *Tesis Guia para mantenimiento transformadores de potencia*. Guayaquil.
- Giesecke, F. (2003). *Technical Drawing, 12e*. España: Prentice Hall.
- Kiatronic. (2017, 03 10). *Kiatronic*. Obtenido de <http://robocraft.ru/files/datasheet/28BYJ-48.pdf>
- Macho, J. C. (2017, 05 20). *Promotec*. Obtenido de <https://www.promotec.net/motor-28byj-48/#>
- Martínez, E. G. (2010). *Diagnóstico y mantenimiento a transformadores en campo*. Bogotá: Gerencia y Diseño Ltda.
- Pillaga, M. A. (2014). *Tesis Master en Planificación y Gestión Energéticas*. Cuenca.
- Promelsa. (2014, Mayo 26). *Promelsa*. Obtenido de <http://www.promelsa.com.pe/>
- Sierra, J. C. (2011, 05 20). *Mecanica automotriz y mas*. Obtenido de <http://mecanicaymas555.blogspot.com/2014/01/estudio-de-las-bobinas.html>
- STMicroelectronics. (2001, 10 01). *STMicroelectronics*. Obtenido de <http://www.st.com>
- Tosatado, M. (2008, Mayo 23). *mailxmail*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-estaciones-energia/estaciones-transformador-potencia-sumergido-aceite>