



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

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

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

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

**TEMA: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN  
EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE  
CAMPOS DE VELOCIDADES EN FLUIDOS USANDO  
VELOCIMETRÍA POR ÍMAGENES DE PARTÍCULAS**

**AUTORES: FLORES MORALES, JIMMY SANTIAGO**

**SARANGO NARVÁEZ, DIANA ELIZABETH**

**DIRECTOR: CARRIÓN MATAMOROS, LUIS MIGUEL**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



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

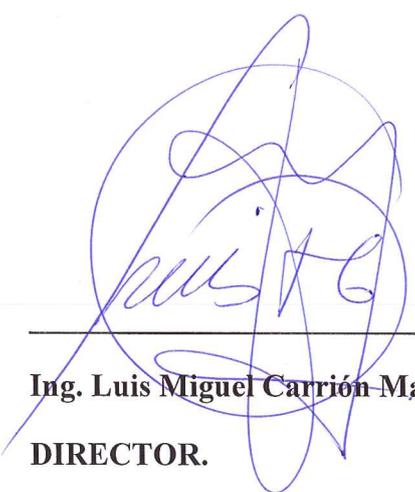
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECTRÓNICA**

### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CAMPOS DE VELOCIDADES EN FLUIDOS USANDO VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULA”***, realizado por los señores, ***DIANA ELIZABETH SARANGO NARVÁEZ*** y ***JIMMY SANTIAGO FLORES MORALES***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores, ***DIANA ELIZABETH SARANGO NARVÁEZ*** y ***JIMMY SANTIAGO FLORES MORALES*** para que sustenten públicamente.

Sangolquí, 18 de abril de 2016



**Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros.**

**DIRECTOR.**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECTRÓNICA

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **DIANA ELIZABETH SARANGO NARVÁEZ** y **JIMMY SANTIAGO FLORES MORALES**, con cédula de identidad N° 1719531954 y N° 1724482979 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CAMPOS DE VELOCIDADES EN FLUIDOS USANDO VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULA**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 18 de abril de 2016

Diana Elizabeth Sarango Narváz

C.C. 1719531954

Jimmy Santiago Flores Morales

C.C. 1724482979



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECTRÓNICA

### AUTORIZACIÓN

Nosotros, **DIANA ELIZABETH SARANGO NARVÁEZ** y **JIMMY SANTIAGO FLORES MORALES**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE CAMPOS DE VELOCIDADES EN FLUIDOS USANDO VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULA**" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 18 de abril de 2016

Diana Elizabeth Sarango Narváez

C.C. 1719531954

Jimmy Santiago Flores Morales

C.C. 1724482979

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres Carmen y Juan, quienes siempre me han brindado todo su apoyo en las decisiones que he tomado en mi vida.

Su gran responsabilidad y su ejemplo han contribuido para hacer de mí una persona de bien, una hija y hermana que estará eternamente agradecida.

A mis hermanos por darme fuerzas en los momentos más difíciles de mi vida.

A toda mi familia quienes de una u otra manera me han apoyado para conseguir las metas que me propongo.

A mis amigos y compañeros de la carrera con los que compartí la mayor parte de tiempo.

*Diana Elizabeth Sarango Narváez.*

Dedico este proyecto a mi madre, quien fue quien me trajo a la vida y está siempre a mi lado apoyándome y aconsejándome para ser cada día una mejor persona, por haber criado, educado y sacarme adelante para ser la persona que soy.

A mi padre por el apoyo que me ha dado a la largo de todo el camino escolar y universitario, por brindarme los recursos y brindarme su ayuda cuando lo necesitaba.

A mi hermano por brindarme su ayuda cuando lo necesitaba y estar en los momentos más importantes, por cuidarme y siempre estar preocupado por mí.

A Viviana por darme todo su amor y su comprensión, por estar en los momentos de alegrías y tristezas y compartir momentos inolvidable con ella.

A mis amigos y compañeros de carrera, los cuales estuvimos siempre ahí para ayudarnos con los trabajos y deberes en el transcurso de la etapa universitaria.

*Jimmy Santiago Flores Morales*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por estar conmigo siempre en los momentos que más triste me sentía, él me dio las fuerzas para continuar y no desmayar.

Agradezco a mis padres, por haberme apoyado incondicionalmente; e inculcarme los valores de la responsabilidad, el respeto, el amor hacia los demás.

A mis abuelitos Ángela y Mateo, quienes con sus palabras de aliento han estado presentes a lo largo de toda mi vida.

A mi mejor amiga Dayana, quien ha sido como una hermana para mí; siempre con unas palabras de aliento en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis amigos, por todos los momentos que pasamos juntos, cuyas alegrías y a veces nostalgias han llenado los días de nuestra vida que quedarán grabados en el corazón.

A mis profesores, por todos los conocimientos impartidos a lo largo de toda la carrera.

Al Ing. Luis Carrión, que con su sabiduría y responsabilidad ha dedicado muchas horas de su valioso tiempo para orientarnos y poder culminar el presente trabajo.

*Diana Elizabeth Sarango Narváez.*

Agradezco primero a Dios por darme la vida y cuidar de mí en todo lugar.

A mi madre por tenerme paciencia y apoyarme incondicionalmente en todas las decisiones que tome a lo largo de mi vida.

A mi padre por apoyarme y brindarme su ayuda durante toda mi vida tanto económicamente como también físicamente.

A mi hermano por ayudarme en los momentos de dificultad y siempre cuidarme en cualquier lugar que es, cuidarme y ver siempre mi bienestar.

A mi enamorada Viviana por darme su apoyo estos meses y brindarme su amor y comprensión pese a las dificultades que se presenta.

A toda mi familia por preocuparse por nosotros y ayudarnos en esos momentos difíciles que se tiene que atravesar en el transcurso de la vida.

A mi amigo Estefano, que es más que un amigo, es para mí como un hermano, que siempre estuvo ahí en las buenas y en las malas apoyando y brindándome su ayuda.

A mis amigos del colegio que siempre estuvieron ahí en el transcurso de mi vida para ayudarme cuando lo necesitaba.

A mis amigos de la universidad que nunca nos vimos superados por ninguna dificultad, siempre estuvimos unido para seguir adelante y conseguir el objetivo, el título universitario.

A mi director de tesis Ing. Luis Carrión quien nos proveo el tema y ayudo con sus enseñanzas para salir adelante y sacar este proyecto.

*Jimmy Santiago Flores Morales*

## ÍNDICE

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>III</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>X</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	1
1.3 ÁREA DE INFLUENCIA.....	2
1.4 OBJETIVOS.....	2
1.4.1 Objetivo General.....	2
1.4.2 Objetivos Específicos.....	2
1.5 ALCANCE.....	3
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>5</b>
<b>LA VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS: PIV</b> .....	<b>5</b>
2.1 PRINCIPIOS DE LA TÉCNICA PIV.....	5
2.2 ASPECTOS DE LA TÉCNICA PIV.....	6
2.2.1 Partículas trazadoras.....	7
2.2.1.1 Movimiento de partículas.....	7
2.2.1.2 Dispersión de luz.....	9
2.2.2 Sistema de iluminación.....	9

2.2.3 Sistema de registro. ....	10
2.2.4 Proceso de análisis de imágenes. ....	12
2.2.4.1 Autocorrelación. ....	12
2.2.4.2 Correlación cruzada. ....	14
2.2.5 Post-procesados. ....	15
2.3 IMÁGENES DE PIV. ....	15
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>18</b>
<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN. ....</b>	<b>18</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO. ....	18
3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO. ....	19
3.2.1 Sistema Hidráulico. ....	19
3.2.1.1 Distribución del fluido. ....	19
3.2.1.2 Accesorios hidráulicos. ....	22
3.2.1.3 Caja de pruebas. ....	25
3.2.1.4 Sistema de bombeo. ....	26
3.2.2 Sistema Mecánico. ....	37
3.2.2.1 Sistema de iluminación y ampliación de luz. ....	37
3.3 SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA. ....	39
3.3.1 Láser. ....	39
3.3.2 Cámara. ....	40
3.3.3 Óptica. ....	41
3.3.4 Partículas. ....	42
3.4. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y/O ELECTRÓNICOS. ....	44
3.4.1 Controlador. ....	44
3.4.2. Pantalla de Visualización. ....	45
3.4.3. Módulo de Relé. ....	47
3.4.4. Fuente de alimentación para el sistema electrónico de control. ....	49
3.4.5. Fusible. ....	50
3.5. DISEÑO ELECTRÓNICO Y DE CONTROL. ....	50
3.5. PROGRAMACIÓN Y CONTROL. ....	56

<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>56</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE</b>	
<b>DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....</b>	<b>56</b>
4.1 ESTRUCTURA MECÁNICA.....	56
4.1.1. Diagrama de procesos de fabricación.....	57
4.1.1.1. Mesa Principal y estructura de madera.....	57
4.1.1.2. Mesa bomba-Tanques.....	62
4.1.1.3. Soporte láser, lente y cuadrado.....	66
4.1.1.4. Caja Circuito eléctrico.....	71
4.1.1.5. Caja de Pruebas.....	74
4.1.1.6. Tubería.....	74
4.1.2. Operaciones tecnológicas.....	75
4.1.3. Tiempos de fabricación.....	75
4.2. IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA.....	79
4.3. SOFTWARE.....	80
4.3.1. Total Video Converter.....	80
4.3.2. PIVlab.....	81
4.4. MONTAJE.....	90
4.5. MANUAL DE USUARIO.....	92
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>93</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>93</b>
5.1. CALCULO DE LA VELOCIDAD EXPERIMENTAL MEDIANTE UN ROTÁMETRO.....	93
5.1.1 Rotámetro en 10cm.....	95
5.1.2 Rotámetro en 15cm.....	97
5.1.3 Rotámetro en 20cm.....	98
5.1.4 Rotámetro en 25cm.....	99
5.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FLUIDO MEDIANTE LA TÉCNICA PIV.....	101
5.2.1 Rotámetro en 10cm.....	101
5.2.2 Rotámetro en 15cm.....	103
5.2.3 Rotámetro en 20cm.....	106
5.2.4 Rotámetro en 20cm.....	108

5.3. ERRORES EXPERIMENTALES. ....	111
5.3.1. Error Absoluto.....	111
5.3.2. Error Relativo.....	111
5.3.3. Error porcentual. ....	112
5.4 VALIDACIÓN .....	112
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>114</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO. ....</b>	<b>114</b>
6.1. ANÁLISIS FINANCIERO. ....	114
6.1.1. Costos Directos. ....	114
6.1.2. Costos Indirectos.....	120
6.1.3. Costos de fabricación. ....	122
6.2. ANÁLISIS ECONÓMICO. ....	123
<b>CAPITULO 7.....</b>	<b>126</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>126</b>
7.1 CONCLUSIONES. ....	126
7.2 RECOMENDACIONES.....	127
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>128</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA PIV .....	4
FIGURA 2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA PIV.....	5
FIGURA 4 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA PIV.....	10
FIGURA 5 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA TÉCNICA PIV.....	11
FIGURA 6 FUNCIÓN DE AUTOCORRELACIÓN. ....	13
FIGURA 7 FUNCIÓN DE CORRELACIÓN CRUZADA. ....	15
FIGURA 8 IMÁGENES DE PARTÍCULAS TOMADAS EN T0 Y T1. ....	16
FUENTE: (CINGEL, 2012).....	16
FIGURA 9 ZONAS DE INTERROGACIÓN Y DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN EL INTERVALO T0-T1.....	16
FUENTE: (CINGEL, 2012).....	16
FIGURA 10 MAPA DE VECTORES DE 128X128 PÍXELES Y 64X64 PÍXELES RESPECTIVAMENTE.....	17
FUENTE: (CINGEL, 2012).....	17
FIGURA 11 MAPA DE VECTORES DE 32X32 PÍXELES Y 16X16 PÍXELES RESPECTIVAMENTE.....	17
FIGURA 12 VÁLVULA CHECK. ....	23
FIGURA 13 ACCESORIOS ROSCABLES (CODOS, TES, NEPLOS).....	23
FIGURA 14 VÁLVULA ESFÉRICA. ....	24
FIGURA 15 RESERVORIO. ....	24
FIGURA 16 CAJA DE PRUEBAS. ....	25
FIGURA 17 SISTEMA DE FLUJO DE FLUIDO QUE ILUSTRRA LA ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA. ....	27
FIGURA 18 SISTEMA HIDRÁULICO DEL SISTEMA. ....	28
FIGURA 19 BOMBA PERIFÉRICA QB-70 (DATOS TÉCNICOS). ....	37
FIGURA 20 SISTEMA PARA EL LÁSER Y AMPLIACIÓN DE LA LUZ. ....	38
FIGURA 21 SOPORTE PRINCIPAL. ....	38
FIGURA 22 LÁSER TYLASER 303.....	40
FIGURA 23 CÁMARA CASIO EXILIM EXFH20. ....	40
FIGURA 24 SIMULACIÓN DE LAS 2 LENTES UTILIZADAS EN EL SISTEMA PIV.....	41

FIGURA 25 LENTE CÓNCAVO BK7.....	42
FIGURA 26 PARTÍCULAS TRAZADORAS.....	43
FIGURA 27 MODULO RELÉ PARA ARDUINO.....	48
FIGURA 28 FUENTE DE ALIMENTACIÓN. ....	50
FIGURA 29 FUSIBLE - PORTAFUSIBLE. ....	50
FIGURA 30 CIRCUITO INGRESO DE DATOS. ....	51
FIGURA 31 CIRCUITO DE RESISTENCIA EN PULL-DOWN. ....	51
FIGURA 32 PINES PARA MONTAJE DEL ARDUINO.....	53
FIGURA 33 PINES PARA PANTALLA TFT DE 2.4 “.....	53
FIGURA 34 PINES PARA ALIMENTACIÓN DE PLACAS EXTERNAS. ....	54
FIGURA 35 PINES DE SALIDAS DIGITALES. ....	54
FIGURA 36 PINES PARA ENTRADAS DIGITALES. ....	55
FIGURA 37 PLACA ELECTRÓNICA ROUTEADA.....	55
FIGURA 38 ESQUEMA DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN. ....	57
FIGURA 39 CONEXIÓN ELÉCTRICA / ELECTRÓNICA.....	79
FIGURA 40 CONEXIÓN ELÉCTRICA / ELECTRÓNICA.....	81
FIGURA 41 ENTORNO DEL SOFTWARE PIVLAB.....	82
FIGURA 42 SUB-MENÚ EXCLUSIONS.....	83
FIGURA 43 SUB-MENÚ IMAGE PRE-PROCESSING.....	85
FIGURA 44 SUB-MENÚ PIV SETTING. ....	85
FIGURA 45 SUB-MENU ANALYSIS.....	86
FIGURA 46 SUB-MENU POST PROCESSING.....	87
FIGURA 47 SUB-MENU CALIBRATION. ....	88
FIGURA 48 SUB-MENU DERIVE PARAMETERS. ....	89
FIGURA 49 EQUIPO DE MEDICIÓN. ....	92
FIGURA 50 EQUIPO DE MEDICIÓN (ROTÁMETRO).....	93
FIGURA 51 GRÁFICA DEL ROTÁMETRO.....	94
FIGURA 52 TEMPERATURA DEL LABORATORIO.....	95
FIGURA 53 ROTÁMETRO A 10CM.....	96
FIGURA 54 ROTÁMETRO A 15CM.....	97
FIGURA 55 ROTÁMETRO A 20CM.....	98
FIGURA 56 ROTÁMETRO A 25CM.....	100

FIGURA 57 CAMPO DE VELOCIDAD DEL FLUIDO MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB ...	101
FIGURA 58 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB.	102
FIGURA 59 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA EN EXCEL.....	103
FIGURA 60 CAMPO DE VELOCIDAD DEL FLUIDO MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB ...	104
FIGURA 61 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB.	104
FIGURA 62 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA EN EXCEL.....	105
FIGURA 63 CAMPO DE VELOCIDAD DEL FLUIDO MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB ...	106
FIGURA 64 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB.	107
FIGURA 65 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA EN EXCEL.....	108
FIGURA 66 CAMPO DE VELOCIDAD DEL FLUIDO MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB ...	109
FIGURA 67 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA MEDIANTE EL SOFTWARE PIVLAB.	109
FIGURA 68 GRAFICA VELOCIDAD VS DISTANCIA EN EXCEL.....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO .....	18
TABLA 2 CUADRO COMPARATIVO PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO .....	19
TABLA 3 TABLA DE VALORACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO.....	20
TABLA 4 FLUJO DE AGUA EN TUBERÍAS DE CÉDULA 80 .....	21
TABLA 5 DIÁMETRO NOMINAL DE LA TUBERÍA PVC.....	21
TABLA 6 DIÁMETRO NOMINAL DE UNA MANGUERA DE HULE.....	22
TABLA 7 CUADRO COMPARATIVO PARA LA CAJA DE PRUEBAS .....	25
TABLA 8 TABLA DE VALORACIÓN PARA LA CAJA DE PRUEBAS .....	26
TABLA 9 DATOS CALCULADOS SECCIÓN NO CIRCULAR .....	33
TABLA 10 FACTORES DE FRICCIÓN.....	34
TABLA 11 PÉRDIDA POR FRICCIÓN .....	34
TABLA 12 DATOS TÉCNICOS DE LA BOMBA .....	36
TABLA 13 SOPORTES SECUNDARIOS DEL SISTEMA .....	38
TABLA 14 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA CÁMARA .....	41
TABLA 15 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DELLENTE .....	42
TABLA 16 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS PARTÍCULAS.....	43
TABLA 17 CUADRO COMPARATIVO DE CONTROLADORES .....	44
TABLA 18 TABLA DE VALORACIÓN DEL CONTROLADOR .....	45
TABLA 19 CUADRO COMPARATIVO DE CONTROLADORES .....	46
TABLA 20 TABLA DE VALORACIÓN DEL CONTROLADOR.....	47
TABLA 21 ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO RELÉ .....	48
TABLA 22 CAPACIDAD DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	49
TABLA 23 OPERACIONES TECNOLÓGICAS .....	75
TABLA 24 TIEMPOS DE FABRICACIÓN .....	76
TABLA 25 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ EXCLUSIONS .....	83
TABLA 26 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ IMAGE PRE-PROCESSING .....	84
TABLA 27 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ ANALYSIS .....	86
TABLA 28 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ POST-PROCESSING .....	87
TABLA 29 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ CALIBRATION .....	88
TABLA 30 ESPECIFICACIONES DEL SUB-MENÚ DERIVE PARAMETERS.....	89

TABLA 31 TIEMPOS DE ENSAMBLAJE MECÁNICO .....	90
TABLA 32 TIEMPOS DE ENSAMBLAJE ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO.....	91
TABLA 33 TIEMPO TOTAL DE ENSAMBLAJE .....	91
TABLA 34 ERRORES ABSOLUTOS DE LAS PRUEBAS .....	111
TABLA 35 ERRORES RELATIVOS DE LAS PRUEBAS .....	112
TABLA 36 ERRORES PORCENTUALES DE LAS PRUEBAS.....	112
TABLA 37 COSTOS DIRECTOS: MATERIALES MECÁNICOS .....	114
TABLA 38 COSTOS DIRECTOS: ACCESORIOS MECÁNICOS.....	116
TABLA 39 COSTOS DIRECTOS: MATERIALES Y ACCESORIOS HIDRÁULICOS.....	117
TABLA 40 COSTOS DIRECTOS: MATERIALES Y ACCESORIOS ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS.....	118
TABLA 41 COSTOS DIRECTOS: SOFTWARE.....	119
TABLA 42 COSTOS DIRECTOS: TOTAL .....	119
TABLA 43 COSTOS INDIRECTOS: MATERIALES INDIRECTOS.....	120
TABLA 44 COSTOS INDIRECTOS: MANO DE OBRA INDIRECTA .....	121
TABLA 45 COSTOS INDIRECTOS: OPERATIVOS O DE SERVICIO BÁSICO .....	121
TABLA 46 COSTOS INDIRECTOS: TOTAL .....	121
TABLA 47 COSTOS DE FABRICACIÓN POR TIEMPO .....	122
TABLA 48 COSTO TOTAL .....	122
TABLA 49 FLUJO DE CAJA PROYECTADA A 10 SEMESTRES .....	124
TABLA 50 VALORES DEL VAN, TIR, B/C.....	124

## **RESUMEN**

El proyecto consiste en el diseño, construcción y validación experimental de un sistema de medición de campos de velocidades en fluidos usando Velocimetría por Imágenes de Partícula; está contemplado por ocho capítulos. El primero capítulo consta de la justificación, los objetivos, el área de influencia y el alcance. En el segundo capítulo se presenta un estudio de este sistema de medición, el cual consta de: principios, aspectos importantes y los pasos que se deben seguir para adquirir una medición exacta de la velocidad. En el tercer capítulo se diseña cada uno de los sistemas, los cuales son: mecánicos, eléctricos, hidráulicos y de control que componen la máquina. El diseño consta del dimensionamiento de cada una de las piezas, a más de diseñar el sistema eléctrico/electrónico. Se seleccionan los accesorios hidráulicos, eléctricos y mecánicos. En el cuarto capítulo se muestra los procesos de fabricación para la construcción y ensamblaje del equipo junto con las operaciones tecnológicas necesarias para la fabricación. Se presenta los diagramas de procesos para cada una de las piezas que conforman el sistema mecánico. En el quinto capítulo se realiza las pruebas de funcionamiento del equipo, para lo cual, se toman varias fotografías con la cámara de alta velocidad las que serán analizadas en el software libre PIVlab; de esta manera se comprueba el correcto funcionamiento del sistema. En el sexto capítulo se muestra los costos directos, indirectos y generales del proyecto. Finalmente el capítulo siete corresponde a las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **DISEÑO.**
- **PIXELES.**
- **PARTÍCULAS.**
- **SOFTWARE LIBRE.**

## **ABSTRACT**

The project consists in the design, construction and experimental validation of a measurement system in fluid velocity fields using a Velocimetry of Particle Image; it is contemplated by eight chapters. The first chapter contains the rationale, objectives, area of influence and scope. The second chapter shows a study of the measurement system, which consists of important aspects and steps to be followed to acquire an accurate measurement of speed. The third chapter is designed each of the systems, which are mechanical, electrical, hydraulic and control that make up the machine. The design consists in the sizing of each of the parts, and the design of the electrical / electronic system, hydraulic, electrical and mechanical accessories are selected. The fourth chapter shows manufacturing processes for construction and assembly of equipment, along with technological operations required for manufacturing, at a time shows process diagrams for each of the pieces that make the mechanical system. In the fifth chapter shows the testing performance of equipment, for which, acquires some pictures with the camera of high speeds, which will be analyzed in PIVlab free software; of this form is checked the correct function of the system. The sixth chapter shows the direct, indirect and overall costs of project. Finally, the seventh chapter corresponds to the conclusions and recommendations of the project.

## **KEYS WORDS**

- **DESIGN**
- **PIXELS**
- **PARTICLES**
- **FREE SOFTWARE**

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 Antecedentes.**

En la última década la técnica del PIV se ha utilizado para las mediciones instantáneas de campos de velocidades en amplias regiones de fluidos. La visualización de los campos en flujos tiene una importancia muy alta en el estudio de la hidrodinámica, la aeronáutica, la industria del petróleo, la industria automovilística, energías renovables y flujos biológicos en donde se investigan varios procesos físicos de mezclado, fenómenos de turbulencia, efectos de compresibilidad, etc.

La técnica del PIV mediante un plano laser es una herramienta muy potente para problemas que se presenta en la mecánica de fluidos como líquidos, y gases. Nos brinda medidas del campo de velocidades con una precisión satisfactoria.).

Una de las desventajas de la técnica de PIV es la gran demanda de los algoritmos computacionales que se emplea para cálculos de los vectores de velocidad, esto ha impedido el surgimiento de los sistemas en tiempo real.

### **1.2 Justificación e importancia.**

El proyecto está dirigido al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, el cual ayudará a la medición de campos de velocidades de flujos en turbo maquinaria, aerofólios, en tuberías, en fenómenos de combustión, en pruebas de túnel de viento y con la información adecuada nos permitirá conocer el comportamiento de los flujos y de esta manera mejorar la eficiencia de los procesos anteriormente mencionados. Adicionalmente este equipo desarrollado se empleará para las futuras investigaciones que se realicen en el DECEM en el área de mecánica de fluidos y energía, por lo cual nuestra finalidad es construir un equipo económico y accesible para las investigaciones futuras de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

### **1.3 Área de influencia.**

El desarrollo de este proyecto de grado está enfocado al diseño, construcción y validación experimental de un sistema de medición de campos de velocidades en flujos usando Velocimetría por imágenes de partículas, por lo cual se beneficiarán directa e indirectamente las siguientes instituciones:

**Directamente.-** El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, ya que tendrán un equipo para realizar sus prácticas con mayor destreza y para investigaciones futuras.

**Indirectamente.-** El cambio de la matriz productiva del Ecuador, que consiste en elaborar productos nacionales de calidad y disminuir la importación de equipos y maquinaria.

### **1.4 Objetivos.**

#### ***1.4.1 Objetivo General.***

Diseñar, Construir y Validar un sistema de medición de campos de velocidades en fluidos usando Velocimetría por imágenes de partículas.

#### ***1.4.2 Objetivos Específicos.***

- Diseñar y construir los circuitos electrónicos para la etapa de potencia y control del sistema de medición.
- Diseñar y programar el sistema de control para el correcto funcionamiento del sistema de medición.
- Realizar el levantamiento de planos de las piezas mecánicas del sistema de medición.

- Aplicar el software libre PIVlab para la adquisición y análisis de imágenes tomadas por la cámara de alta velocidad para la obtención del campo de velocidades del fluido.
- Validar experimentalmente el equipo de medición con diferentes velocidades.

### **1.5 Alcance.**

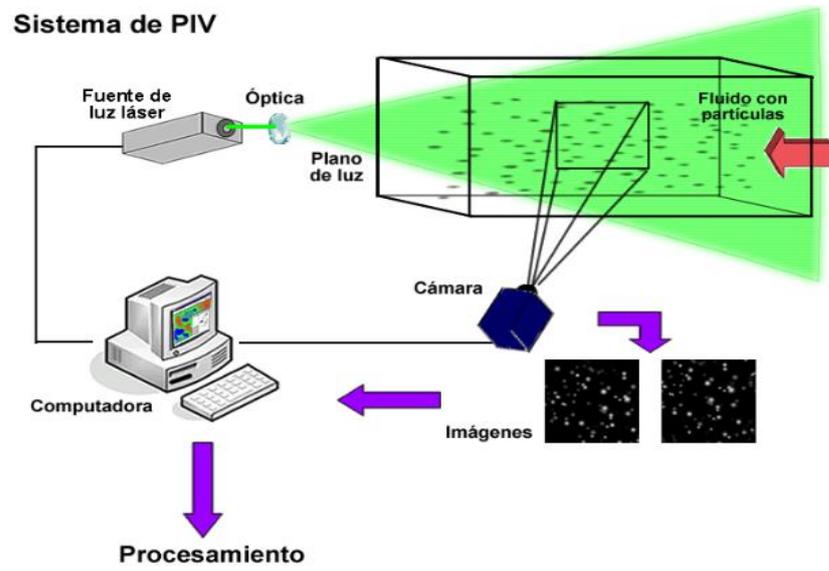
En el presente proyecto de grado se realizará el diseño, construcción y validación experimental de un sistema de medición de campos de velocidades en fluidos usando Velocimetría por imágenes de partícula.

El equipo constará de un sistema de tuberías conectadas a una bomba y a un tanque de almacenamiento del fluido, se mezclará partículas trazadoras con el fluido, el cual serán arrastradas por el mismo, adquiriendo la velocidad del fluido.

Un láser, con la óptica apropiada (lente cóncavo), permitirán aumentar el campo de visión del láser iluminando las partículas trazadoras que se encuentran en el fluido en una sección cuadrada del sistema de tuberías, las partículas dispersarán la luz del láser indicando la posición que tienen en el fluido, la cual será captada mediante una cámara de alta velocidad mediante un video que será tomado a 1000 fps, este video se procederá a convertir en imágenes mediante un software.

Para conocer la dinámica de los fluidos se utilizará el software libre PIVlab, el cual es un método óptico de visualización de flujo, utilizado para la educación y la investigación. Este software se utilizará para obtener mediciones de la velocidad instantánea en los fluidos, para lo cual se utilizarán las imágenes ya convertidas en este software, y mediante el mismo podremos obtener el campo de velocidades del fluido.

Las imágenes almacenadas se dividen en pequeñas zonas, las cuales serán tratadas por métodos estadísticos para determinar el desplazamiento  $\Delta X$  y un algoritmo basado en la Transformada de Fourier permite medir el desplazamiento y por consiguiente conocer la velocidad, ya que el intervalo de tiempo es programado con anterioridad (Ver Figura 1).



**Figura 1** Esquema de funcionamiento de la técnica PIV.

Fuente: (López Hinojosa, 2014)

## CAPITULO 2

### LA VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTÍCULAS: PIV

#### 2.1 Principios de la técnica PIV.

En 1984 se incorpora la idea de “esparcir” el fluido con las partículas para que estas sean iluminadas, bautizando la técnica como PIV, por sus siglas en inglés o en español que significa Velocimetría por imágenes de partículas. En un corto tiempo muchos grupos de investigación en fluido-dinámica adoptaron y mejoraron la técnica; motivados por resultar este tipo de Velocimetría una herramienta importante para los problemas de la turbulencia.

La técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas permite determinar el campo instantáneo de velocidades en fluidos. Para cumplir con este propósito se insertan partículas trazadoras en el flujo, las cuales adquieren la velocidad del flujo.

La óptica adecuada y un láser, permiten iluminar las partículas contenidas en el flujo. Las partículas dispersan la luz del láser indicando su posición dentro del flujo, la cual puede ser registrada por una cámara de alta velocidad (Ver Figura 2).

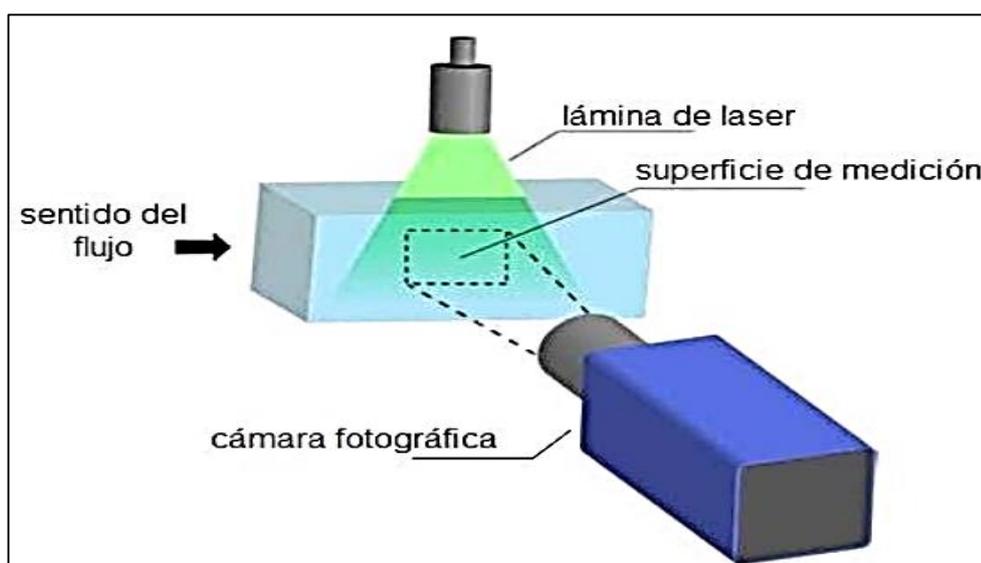


Figura 2 Esquema de funcionamiento de la técnica PIV.

Fuente: (Cingel, 2012)

De acuerdo a Bardera (2005) “Los registros de las imágenes de las partículas en dos instantes  $t$  y  $t'$ , separados un intervalo tiempo  $\Delta t$  permiten determinar el desplazamiento  $\Delta\vec{X}$  de las partículas. Así pues: la velocidad instantánea  $\vec{\mu}(\vec{X}, t)$  de un fluido es una medida del desplazamiento de las partículas trazadoras iluminadas por la luz láser”. (p. 3-5). El cuál utilizó la siguiente ecuación:

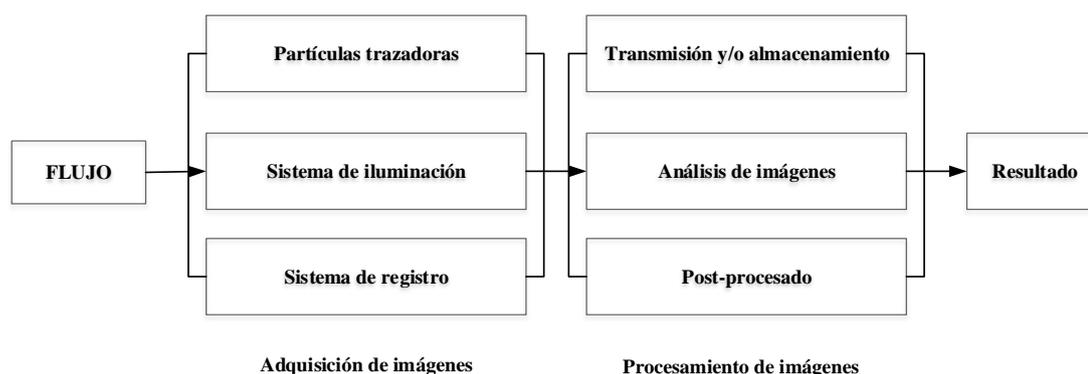
$$\vec{\mu}(\vec{X}, t) = \frac{\Delta\vec{X}(\vec{X}, t)}{\Delta t} \quad (2.1)$$

## 2.2 Aspectos de la técnica PIV.

La técnica de Velocimetría por imágenes de partículas demanda básicamente cinco componentes:

- Región ópticamente transparente que contenga el fluido con las partículas trazadoras.
- Sistema de iluminación, es decir, una fuente de luz para iluminar la zona de interés.
- Sistema de registro: Adquisición, transmisión y/o almacenamiento basado en una cámara de alta velocidad.
- Proceso de análisis de imágenes.
- Post-procesado de las medidas.

Los pasos a seguir para obtener la velocidad de un flujo mediante la técnica PIV (Ver Figura 3).



**Figura 3 Pasos para la medida de velocidad con PIV.**

Fuente: (Bardera, 2005)

### 2.2.1 Partículas trazadoras.

Las partículas trazadoras insertadas en el flujo deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- Seguir adecuadamente las líneas de corriente del flujo y una cantidad adecuada de partículas.
- Dispersar suficiente luz para poder ser registradas.

#### 2.2.1.1 Movimiento de partículas.

De acuerdo a Bardera (2005) “La diferencia entre la densidad de las partículas  $\rho_p$  y la del fluido  $\rho_f$  provoca una velocidad de sedimentación  $v_s$  en dirección de la gravedad. El movimiento de partículas pequeñas (diámetro  $d_p \sim 1\mu m$ ) se encuentra dentro del régimen donde es aplicable la ley de Stokes ( $R \ll 1$ )” (p. 3-6).

Las partículas al estar cayendo verticalmente en el fluido viscoso debido a su propio peso, para calcular la velocidad de sedimentación se iguala la fuerza de fricción con el peso aparente de la partícula en el fluido.

$$F_{Stokes} = 6\pi\eta r v_s \quad (2.2)$$

Donde  $r$  es el radio de la esfera y  $\eta$  es la viscosidad del fluido.

$$F_{peso} = V(\rho_p - \rho_f)g \quad (2.3)$$

Donde  $V$  es el volumen de la esfera y  $g$  es la gravedad. Al igual las ecuaciones (2.2 y 2.3) se obtienen la velocidad de sedimentación:

$$\begin{aligned} 6\pi\eta r v_s &= V(\rho_p - \rho_f)g \\ 6\pi\eta r v_s &= \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g \\ v_s &= \frac{4}{18} \frac{r^2}{\eta}(\rho_p - \rho_f)g \\ v_s &= \frac{(\rho_p - \rho_f)g d_p^2}{18\eta} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Para minimizar el efecto de sedimentación se deben elegir partículas de similar densidad que el fluido.

El movimiento de las partículas en la dirección del flujo se da por la siguiente ecuación (Bardera, 2005, citado en Merzkirch, 1987):

$$\frac{d\mu_p}{dt} = K(u_f - u_p) \quad (2.5)$$

Donde  $u_p$  y  $u_f$  son las velocidades de las partículas y del fluido respectivamente y  $K$  es una constante que depende del fluido y de las partículas, con la condición inicial de que las partículas estén en reposo,

$$\mu_p = \mu_f(1 - e^{-Kt}) \quad (2.6)$$

$K$  Se puede utilizar como tiempo de relajación  $t_s$ , que es su inverso (Bardera, 2005, citado en Hinsch, 1993),

$$\mu_p = \mu_f \left(1 - e^{-\frac{t}{t_s}}\right) \quad (2.7)$$

De acuerdo a Bardera (2005) “el tiempo de relajación es” (p. 3-7).

$$t_s = \frac{\rho_p d_p^2}{18\eta} \quad (2.8)$$

Por lo tanto el tiempo de relajación será tanto menor cuanto menores sean el diámetro y la densidad de las partículas utilizadas.

Los tamaños de las partículas utilizadas normalmente en la técnica PIV son entre 0,5 y 20  $\mu m$  (Bardera, 2005, citado en Lourenco, 1996). En el caso de que el fluido sea agua las partículas de poliestireno, nylon o poliestireno-látex (PSL) son buenos materiales.

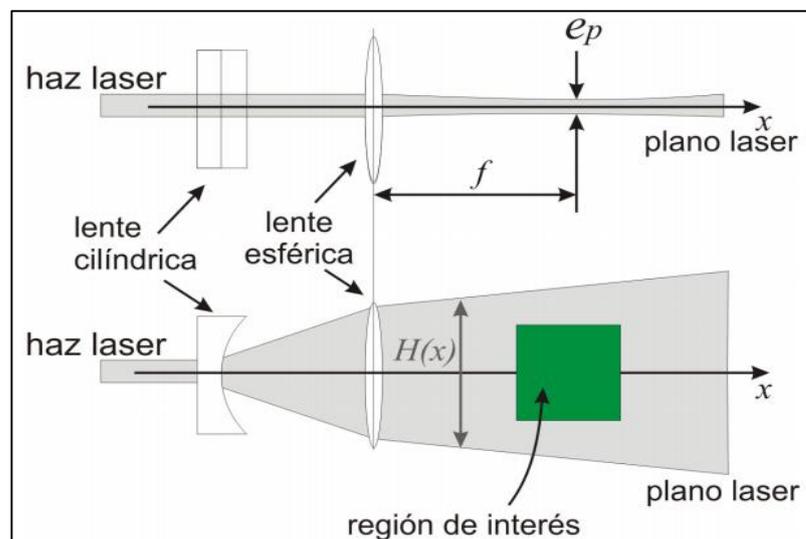
### ***2.2.1.2 Dispersión de luz.***

La mayoría de materiales con densidad  $\sim 1$  al igual que el agua poseen una refracción similar, por ende la capacidad de difractar es escasa. Para lo cual se puede conseguir partículas recubiertas con material fluorescente como rodamina o plateadas.

### ***2.2.2 Sistema de iluminación.***

Láseres continuos y pulsador han sido aplicados en PIV, pero los más aplicados son los de pulsador; “ofrecen la ventaja de que el pulso de luz es de muy corta duración (nanosegundos), de forma que las partículas parecen que están *congeladas*” (Bardera; 2005, p. 3-9), con lo que la imagen es nítida para ser registrada por la cámara de alta velocidad.

La fuente de láser es controlada electrónicamente para producir los cortos pulsos de luz, con un intervalo de separación conocido, de esta manera forma un plano o volumen de luz. La lámina de láser se obtiene haciendo pasar un rayo láser a través de un lente cóncavo y convexo correctamente posicionados. La lente cóncava hace que se expanda el láser en una dirección, mientras que la lente convexa hace converger hasta alcanzar un mínimo espesor. Cada lente tiene un efecto distinto (Ver Figura 4).



**Figura 4 Esquema de funcionamiento de la técnica PIV.**

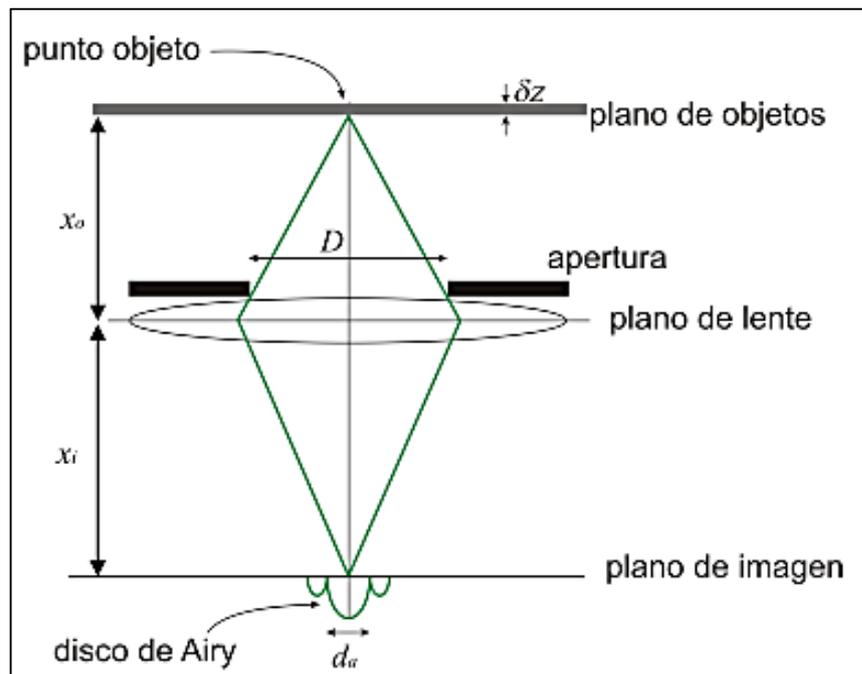
Fuente: (Iriarte, 2008)

### 2.2.3 Sistema de registro.

Las imágenes de PIV pueden ser capturadas en una filmación o con un sensor CCD (charged-coupled devise) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Algunas cámaras permiten capturar las imágenes sucesivas en tiempos muy cortos (microsegundos); esto resulta ideal para hacer PIV de alta velocidad, donde la captura se realiza para los dos pulsos de luz cercanos distante  $\Delta t$ .

La resolución de la cámara es muy importante, ya que las partículas al ser muy pequeñas solo pueden ser capturadas por este tipo de cámaras. De acuerdo con Bardera (2005) “Actualmente está generalizado el uso de cámaras CCD o CMOS de resolución cada vez mayor, para completar el análisis digital se hace uso de un algoritmo de la Transformada de Fourier (FFT), que ha ganado mucha rapidez, al momento de obtener resultados” (p-3-10).

El estudio del tamaño de imagen de la partícula en el plano imagen (sensor del sistema de registro) es importante; por lo tanto, una relación geométrica de la óptica se da entre la distancia del objeto ( $x_o$ ) y la distancia de la imagen ( $x_i$ ) al plano de la lente convexa (cilíndrica) (Ver Figura 5).



**Figura 5 Esquema de funcionamiento de la técnica PIV.**

Fuente: (Iriarte, 2008)

Para determinar el tamaño hay que considerar dos efectos; el de difracción y el geométrico. Bardera (citado en Prasat, 2000) sostiene que el diámetro de la partícula en la imagen será,

$$d_e = \sqrt{(Md_p)^2 + d_a^2} \quad (2.9)$$

La consideración geométrica viene dada por el factor  $Md_p$  y el efecto de difracción se evalúa mediante  $d_a$  y se considera igual al diámetro del disco de Airy (Bardera, 2005, citado en Adrian, Yao, 1985).

$$d_a = 2,44 (1 + M) \frac{f}{D} \lambda \quad (2.10)$$

Siendo  $\lambda$  la longitud de onda del láser,  $D$  la apertura de la lente, la relación  $f/D$  el número  $f$  ( $f^\#$ ) de la lente y  $M$  es la ampliación de la lente, es decir,

$$M = \frac{x_i}{x_o} \quad (2.11)$$

$$x_o = (1 + M^{-1})f$$

$$x_i = (1 + M)f$$

De acuerdo a Bardera (2005) “una estimación con valores habituales en PIV son:  $M \sim 0,2$ ;  $\lambda = 0,532 \text{ mm}$ ; el  $f^\# = 5.6$  y  $d_p \sim 1 \text{ mm}$ , por lo tanto el efecto de difracción domina respecto a la consideración geométrica” (p. 3-10).

#### **2.2.4 Proceso de análisis de imágenes.**

El proceso de análisis de imágenes tiene como fin determinar el desplazamiento de las partículas contenidas en el flujo, lo que nos conducirá a conocer la velocidad local del flujo. El método de análisis para una sola imagen doble pulso es la autocorrelación o sobre dos imágenes mono-pulso es la correlación cruzada. Para la evaluación las imágenes PIV son divididas en pequeñas áreas rectangulares llamadas “zonas de interrogación”.

##### **2.2.4.1 Autocorrelación.**

La autocorrelación es aplicada cuando dos imágenes consecutivas de las partículas se graban en un mismo fotograma. Esto puede generarse en un modo de grabación de la cámara. Bardera (citado en Adrian, 1991) sostiene que la función de correlación  $R(\vec{s})$  de la intensidad  $I(\vec{x})$  (fotograma) de la ventana de análisis ( $va$ ) viene dada por,

$$R(\vec{s}) = \int_{va} I(\vec{x}) I(\vec{x} + \vec{s}) d\vec{x} \quad (2.12)$$

Donde  $\vec{x}$  es la coordenada espacial en el plano de imagen y  $\vec{s}$  es la coordenada espacial en el plano de correlación. Usando el teorema de correlación mediante el símbolo  $\otimes$  y la operación de convolución por  $(*)$ , tenemos,

$$R(\vec{s}) = I(\vec{x}) \otimes I(\vec{x}) = I(i, j) I^*(-i, -j) \quad (2.13)$$

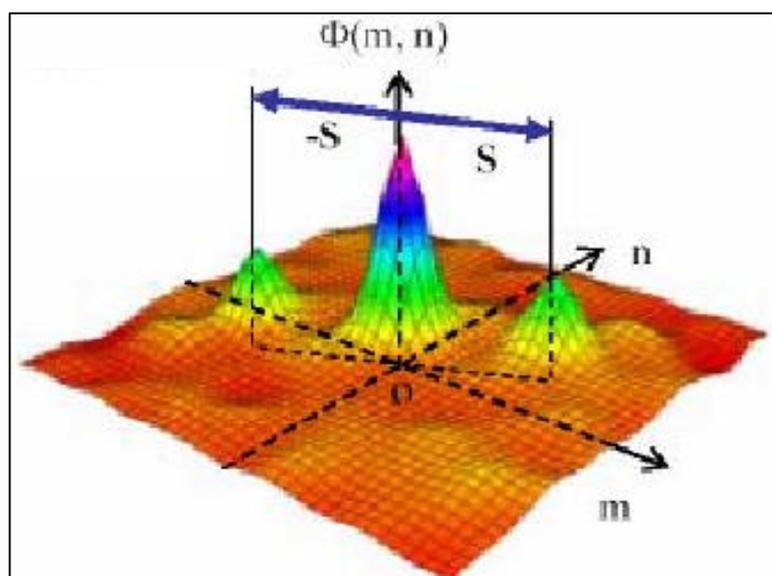
Tomando la transformada de Fourier, por el teorema de convolución:

$$\begin{aligned} F\{R(\vec{s})\} &= F\{I(\vec{x}) \otimes I(\vec{x})\} = F\{I(\vec{x})\} F^*\{I(\vec{x})\} = F|I(\vec{x})|^2 \\ R(\vec{s}) &= F^{-1}[F|I(\vec{x})|^2] \end{aligned} \quad (2.14)$$

De acuerdo a Bardera (2005) la función de autocorrelación “deberá utilizarse aplicada al campo bidimensional, teniendo en cuenta que son las mismas funciones, restringidas en una ventana rectangular  $M \times N$  pixeles. Los subíndices  $i, j$  indican la posición de cada pixel de la imagen” (p.3-12).

$$R(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j) g(i + m, j + n) \quad (2.15)$$

La función de autocorrelación tiene un máximo y un mínimo en  $(m = 0, n = 0)$  y dos máximos secundarios situados simétricamente. El máximo central indica el plano de correlación y los máximos secundarios indican el desplazamiento de las partículas (Ver Figura 6).



**Figura 6 Función de autocorrelación.**

Fuente: (Bardera, 2005)

### 2.2.4.2 Correlación cruzada.

Este tipo de correlación se establece entre dos imágenes de PIV, que corresponde cada una a un pulso de láser que tiene una imagen de cada partícula. Bardera (citado en Prasat, 2000) sostiene que la función de correlación  $C(\vec{s})$  de la intensidad  $I_1(\vec{x})$  y  $I_2(\vec{x})$  (fotograma) de la ventanas de análisis ( $va$ ) 1 y 2 viene dada por,

$$C(\vec{s}) = \int_{va} I_1(\vec{x})I_2(\vec{x} + \vec{s}) d\vec{x} \quad (2.16)$$

Usando el teorema de correlación para dos funciones mediante el símbolo  $\otimes$ , podemos pasar de correlación en el plano espacial a una multiplicación en el plano de frecuencia,

$$f(x, y) \otimes g(x, y) = F(x, h)G^*(x, h) \quad (2.17)$$

Donde:

$$\begin{aligned} F\{f(x, h)\} &= F(x, h) \\ F\{g(x, h)\} &= G(x, h) \end{aligned} \quad (2.18)$$

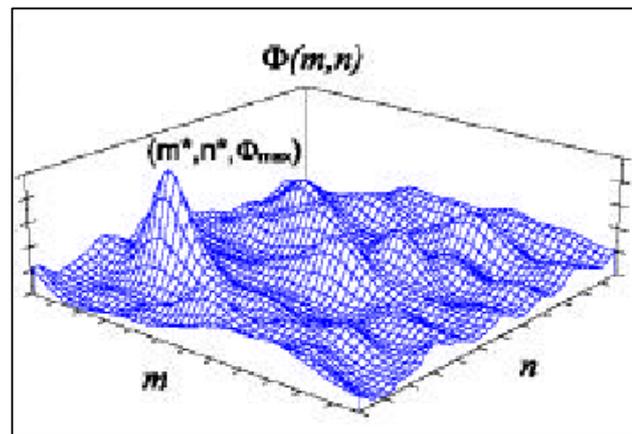
De acuerdo a Bardera et al. (2005) encontraron que mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre la imagen digital tenemos,

$$\begin{aligned} F\{C(\vec{s})\} &= F\{I_1(\vec{x}) \otimes I_2(\vec{x})\} = F(u, v)G^*(u, v) \\ C(\vec{s}) &= F^{-1}\{F(u, v)G^*(u, v)\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

De acuerdo a Bardera (2005) la función de autocorrelación “deberá utilizarse aplicada al campo discreto bidimensional, teniendo en cuenta que  $g_1(i, j)g_2(i, j)$  son dos muestras analizadas” (p. 3-12),

$$C(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i, j)g_2(i + m, j + n) \quad (2.20)$$

El desplazamiento de las partículas viene dado por la posición del máximo valor de la función (Ver Figura 7).



**Figura 7 Función de correlación cruzada.**

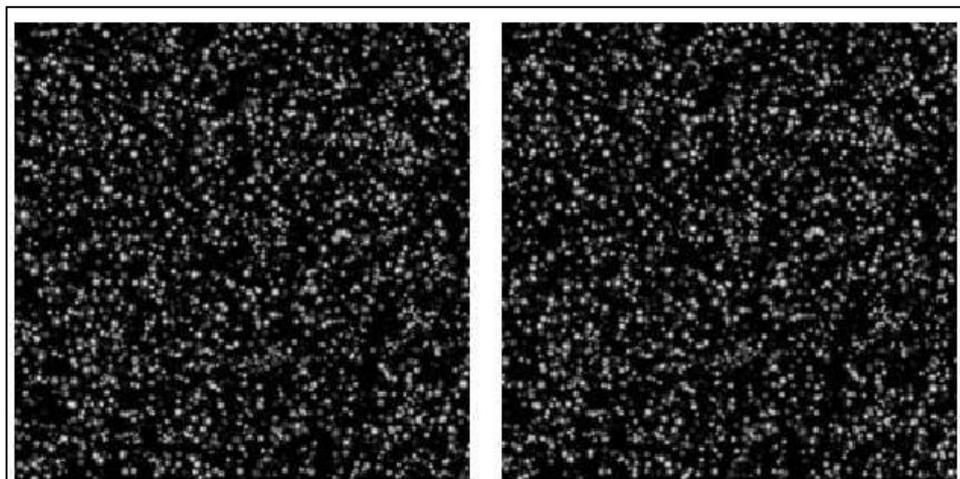
Fuente: (Bardera, 2005)

### **2.2.5 Post-procesados.**

Una vez conocido el desplazamiento de las partículas, la velocidad es calculada automáticamente en el software al que habrá que ingresar información de algunas variables requeridas. La presentación de resultados se podrá visualizar en mapas de vectores velocidad donde se puede apreciar claramente la tendencia del flujo, así como la velocidad en cada punto.

### **2.3 Imágenes de PIV.**

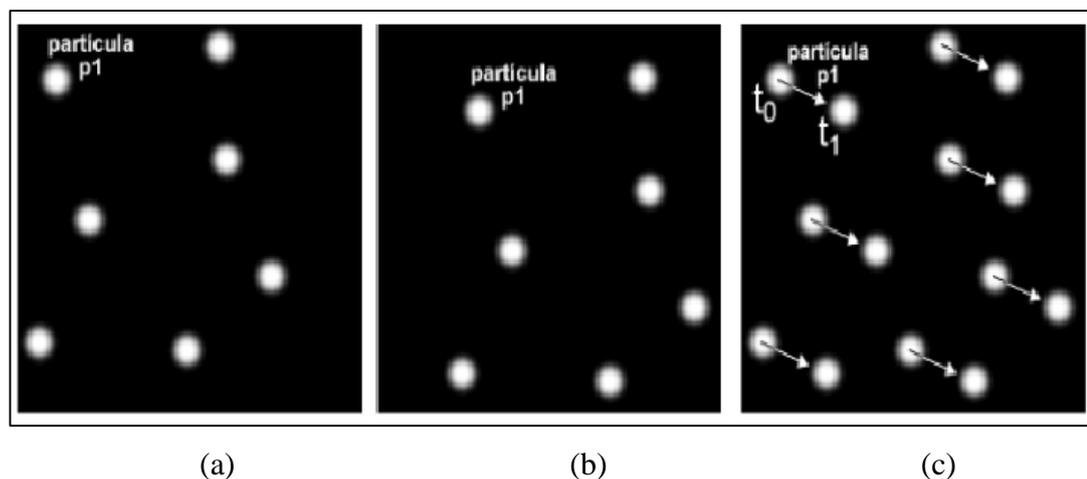
En esta etapa se va a mostrar ejemplos de imágenes de PIV (Ver Figura 8). Así en la figura se muestra dos imágenes de partículas generadas de forma artificial de 256 por 256 píxeles. Cada imagen tiene aproximadamente 4000 partículas; el desplazamiento medio de las partículas es de 7.5 píxeles aproximadamente.



**Figura 8** Imágenes de partículas tomadas en  $t_0$  y  $t_1$ .

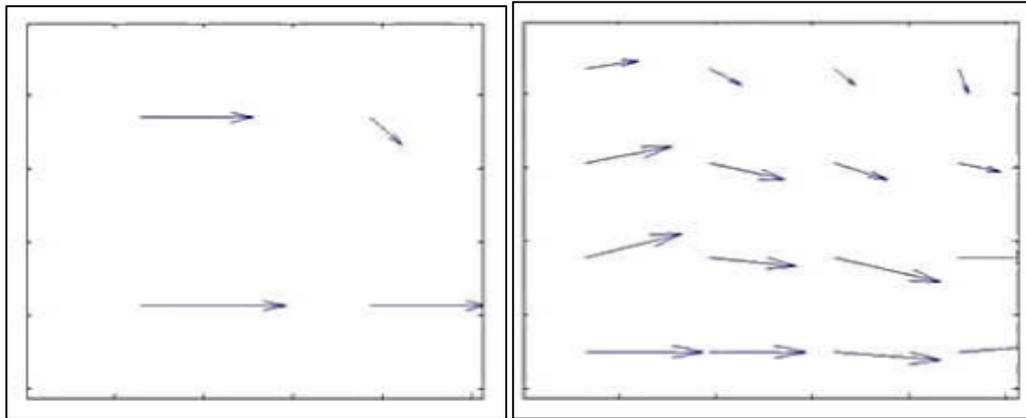
Fuente: (Cingel, 2012)

Para fines prácticos, todas las zonas de interrogación fueron cuadradas y de tamaño potencia 2. Bardera (citado en Prasad, 2000) sostiene que deben haber al menos 5 a 10 partículas en cada zona de interrogación y deben desplazarse más de 5 píxeles aproximadamente (Ver Figura 9).



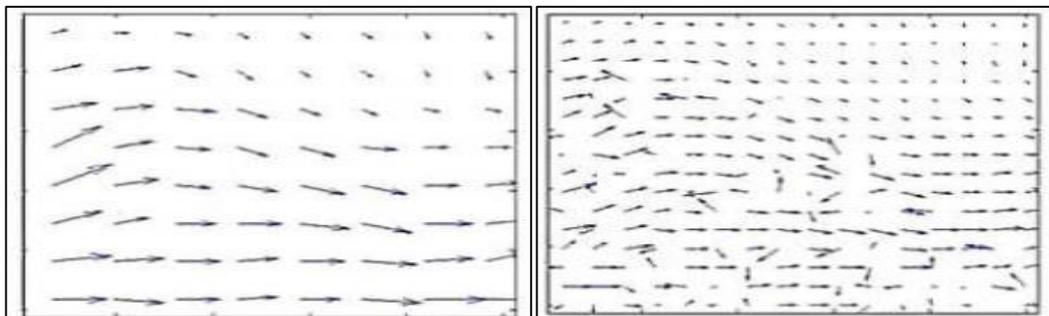
**Figura 9** Zonas de interrogación y desplazamiento de las partículas en el intervalo  $t_0 - t_1$ .

Fuente: (Cingel, 2012)



**Figura 10** Mapa de vectores de 128x128 pixeles y 64x64 pixeles respectivamente.

Fuente: (Cingel, 2012)



**Figura 11** Mapa de vectores de 32x32 pixeles y 16x16 pixeles respectivamente.

Fuente: (Cingel, 2012)

Es recomendable utilizar zonas de interrogación pequeñas para tener mayor resolución y detalle del fluido. Pero hay que tomar en cuenta que en zonas muy pequeñas la validez de resultados puede verse afectada (Ver Figura 11), aquí se puede ver que algunos vectores difieren considerablemente en magnitud y dirección de los otros vectores localizados en la zona de interrogación. En las orillas de las imágenes es más común tener vectores incorrectos. Por esta razón es importante elegir adecuadamente el tamaño de las zonas de interrogación, como una referencia se dice que el tamaño de la zona de interrogación deber ser cuatro veces el desplazamiento promedio de las partículas.

Por lo tanto la técnica PIV permite medir la velocidad local instantánea de un flujo a partir de las imágenes de partículas iluminadas Esta técnica está sustentada por varios estudios, tanto teóricos como experimentales.

## CAPITULO 3

### DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

#### 3.1 Características del diseño.

Para el diseño del equipo, es necesario definir las principales características que tendrá el sistema. Dado que el tutor a cargo de este proyecto, ya ha trabajado con un equipo de similares características, se tomará en cuenta las prioridades sobre el diseño que el tutor manifieste. Una vez consultadas las necesidades particulares sobre el equipo, se realiza un cuadro resumen sobre las principales especificaciones del mismo.

**TABLA 1**  
**Características del equipo.**

N°	Característica	Descripción	Importancia
1	Área de trabajo	Dimensiones 1050x1600 mm.	3
2	Sección de prueba	Sección cuadrada de 0,04x 0,04 mm.	4
3	Fluido	Agua.	4
4	Velocidad del fluido	Velocidad entre 0,5 a 1 m/s.	5
5	Diámetro accesorios hidráulicos.	Recomendación 1 pulgada.	2
6	Temperatura promedio del laboratorio.	18 ° C	4

La importancia de estas características se midió de acuerdo a una escala del 1 al 5, donde 5 es muy importante y 1 es no importante.

### 3.2 Selección de Alternativas de diseño.

En esta selección se considera los sistemas: hidráulicos, mecánicos, eléctricos/electrónicos y software más importantes para elaborar los respectivos cuadros de comparación y tablas de valoración de los accesorios que lo requieran.

#### 3.2.1 Sistema Hidráulico.

##### 3.2.1.1 Distribución del fluido.

Para la selección de las tuberías o mangueras a utilizar en el transporte del fluido se ha considerado dos opciones: instalación, flexibilidad y fluido a transportar agua.

- *Instalación.*- Utilizar del menor número de accesorios para la instalación del sistema, debido a su importancia se le pondera con un valor del 30%.
- *Flexibilidad.*- Mayor recorrido del líquido, por lo que se coloca una ponderación del 40%.
- *Costo.*- Costo bajo, por lo que se coloca una ponderación del 30%.

**TABLA 2**  
**Cuadro comparativo para la distribución del fluido.**

	<b>Tubería PVC</b>	<b>Manguera de hule sintético</b>	<b>Tubería transparente</b>
<b>Parámetros</b>			
Instalación	Roscado, uso de teflón y accesorios de unión.	Acoples adicionales y accesorios de unión.	Pega líquida y accesorios de unión
Flexibilidad	Bajo.	Alta.	Bajo.
Costo	Costo bajo	Costo medio	Costo alto

**TABLA 3**  
**Tabla de Valoración para la distribución del fluido.**

Parámetros	Ponderación	Tubería PVC		Manguera de hule sintético.		Tubería transparente	
		Valor	%	Valor	%	Valor	%
Instalación	30%	4	12%	5	15%	3	9%
Flexibilidad	40%	4	16%	9	36%	4	16%
Costo	30%	10	30%	5	15%	1	3%
Total	100%		58%		66%		28%

Las tuberías PVC y las mangueras de hule sintético son los medios que se eligen para la distribución del fluido; se han elegido los dos medios, ya que para la instalación de las mangueras se utiliza un menor número de accesorios.

La tubería de PVC que se utiliza es la tubería de cloruro de polivinilo que tienen un peso ligero, fácil instalación y resistentes a la corrosión; la manguera que se utiliza es de hule sintético ya que es de fácil instalación y flexible; los dos medios de distribución son los más utilizados para sistemas de distribución de agua.

En la norma *NTE INEN 2497:2009 (Tubería plástica. Tubos PVC rígido. Unión por Rosca para conducción de agua potable a presión. Cédula 80)*, se puede apreciar los diámetros nominales, velocidad y caudal de las tuberías; una de las características principales del equipo es: la velocidad que atraviesa la tubería debe ser entre 0,5 a 1 m/s y además se recomienda un diámetro de 1" (valor comercial), por lo cual se elige (Ver Tabla 4 y Tabla 5).

Como todo el sistema consta de un diámetro de 1" (valor comercial), de igual manera se elige una manguera de hule sintético de 1" (ver Tabla 6). Se utilizó este tipo de manguera por las características mencionadas anteriormente.

**TABLA 4**  
**Flujo de agua en tuberías de cédula 80.**

	Tubería 1/2"	Tubería 3/4"	Tubería 1"	Tubería 1 1/4"	Tubería 1 1/2"
<b>Caudal</b> (litros por minuto)	<b>Velocidad</b> (metros por segundo)	<b>Velocidad</b> (metros por segundo)	<b>Velocidad</b> (metros por segundo)	<b>Velocidad</b> (metros por segundo)	<b>Velocidad</b> (metros por segundo)
10	1,114	0,594	0,359	0,201	0,146
15	1,671	0,891	0,539	0,301	0,219
20	2,229	1,188	0,719	0,402	0,292
<b>30</b>	<b>3,343</b>	<b>1,782</b>	<b>1,078</b>	<b>0,603</b>	<b>0,439</b>
40	4,457	2,376	1,437	0,804	0,585
<b>50</b>	<b>5,571</b>	<b>2,970</b>	<b>1,797</b>	<b>1,005</b>	<b>0,731</b>

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

**TABLA 5**  
**Diámetro nominal de la tubería PVC.**

<b>Diámetro Nominal</b> <b>Externo del tubo DNE</b> <b>(mm)</b>	<b>Espesor de pared <sup>(b)</sup></b> <b>Mm</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Tolerancia</b>
<b>21,34</b>	3,73	+0,51
<b>26,67</b>	3,91	+0,51
<b>33,40</b>	<b>4,55</b>	<b>+0,53</b>
<b>42,16</b>	4,85	+0,58
<b>48,26</b>	5,08	+0,61
<b>60,32</b>	5,54	+0,66
<b>73,02</b>	7,01	+0,84
<b>88,90</b>	7,62	+0,91
<b>114,30</b>	8,56	+1,02

CONTINÚA →

<b>141,30</b>	9,52	+1,14
<b>168,28</b>	10,97	+1,31
<b>219,08</b>	12,7	+1,52
b) El mínimo es el menor espesor del tubo en cualquier sección transversal. El espesor de pared máximo permitido, en cualquier sección transversal, es el mínimo espesor de pared más la tolerancia establecida. Las tolerancias son únicamente positivas.		

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009).

**TABLA 6**  
**Diámetro nominal de una manguera de hule.**

<b>DI Nominal</b>		<b>DE Nominal</b>	
<b>pg.</b>	<b>mm.</b>	<b>pg.</b>	<b>mm.</b>
½	12,7	0,84	21,3
<b>5/8</b>	15,9	1,00	25,4
¾	19,1	1,17	29,7
<b>1</b>	25,4	1,47	37,3

Fuente: (GoodYear Manguera Industrial-Catálogo, 2010)

### **3.2.1.2 Accesorios hidráulicos.**

#### ***Válvula Check.***

Una válvula Check permite al fluido ir en una dirección y se cierra automáticamente en la otra dirección para prevenir el contra flujo. Para nuestro caso es necesario colocar la válvula Check ya que se necesita que el fluido vaya en una sola dirección, es decir, que el flujo no se regrese; ya que esto alteraría los datos tomados en la caja de prueba.

La válvula Check tendrá un diámetro de 1" (valor comercial) y será de cobre, esta última característica es más por el costo y la existencia del producto en el país.



**Figura 12 Válvula Check.**

Fuente: (EOPRENE , 2015)

### ***Accesorios.***



**Figura 13 Accesorios roscables (codos, Tes, neplos).**

Fuente: (PLASTIGAMA, 2015)

Los accesorios tendrán un diámetro de 1" (valor comercial) y son de PVC, esta última característica es más por el costo. Este tipo de accesorios tiene una máxima seguridad en la unión, fácil y rápida instalación.

### ***Válvula Esférica.***

En el presente sistema se debe regular el flujo del fluido para obtener varios datos de velocidades, debido a esto se utiliza una válvula esférica o válvula de bola, esta válvula se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior es una esfera perforada.



**Figura 14 Válvula esférica.**

Fuente: (TIGRE, 2015)

La válvula tiene un diámetro de 1" (valor comercial) y son de PVC, esta última característica es más por el costo. Son de fácil instalación y manejo.

### ***Reservorio.***

Los tanques tienen una capacidad de 20 litros cada uno de ellos, se eligió esta capacidad, ya que el equipo se utilizará para estudios posteriores, en los que se necesita tener mayor cantidad de agua en los reservorios.



**Figura 15 Reservorio.**

Fuente: (POWER, 2014)

Al solo tener que almacenar agua, no se necesita de características específicas de estos tanques, debido a esto, se eligió un tanque de plástico (Ver Figura 15).

### 3.2.1.3 Caja de pruebas.

Para la selección de la caja de pruebas se ha considerado dos opciones: acople al sistema, visibilidad del fluido.

- *Acople.*- Machuelar la entrada y salida de la tubería cuadrada para acoplar al sistema, debido a su importancia se le pondera con un valor del 40%.
- *Visibilidad.*- Tomar las fotografías del líquido, por lo que se coloca una ponderación del 50%.
- *Costo.*- Costo medio, por lo que se coloca una ponderación del 10%.

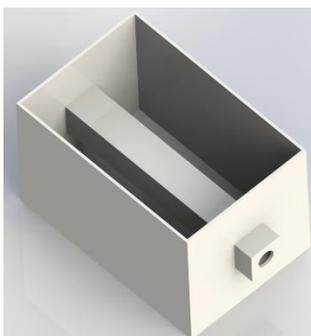
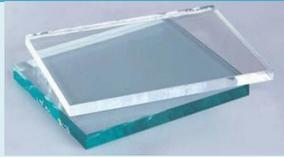


Figura 16 Caja de pruebas.

**TABLA 7**  
**Cuadro comparativo para la caja de pruebas.**

	Acrílico	Vidrio
Parámetros		
Acople	Machuelo para realizar la rosca de entrada y salida.	No se puede utilizar machuelo, necesita de una operación más avanzada.
Visibilidad	Alta	Alta
Costo	Costo bajo	Costo medio

**TABLA 8**  
**Tabla de Valoración para la caja de pruebas.**

Parámetros	Ponderación	Acrílico		Vidrio	
		Valor	%	Valor	%
Acople	40%	8	32%	2	8%
Visibilidad	50%	10	50%	10	50%
Costo	10%	10	10%	5	5%
Total	100%		92%		63%

El acrílico es el material que se elige para la fabricación de la caja de pruebas, ya que es un material en el que se puede trabajar, ya que uno de los requerimientos es que se pueda hacer rosca en la entrada y salida de la caja.

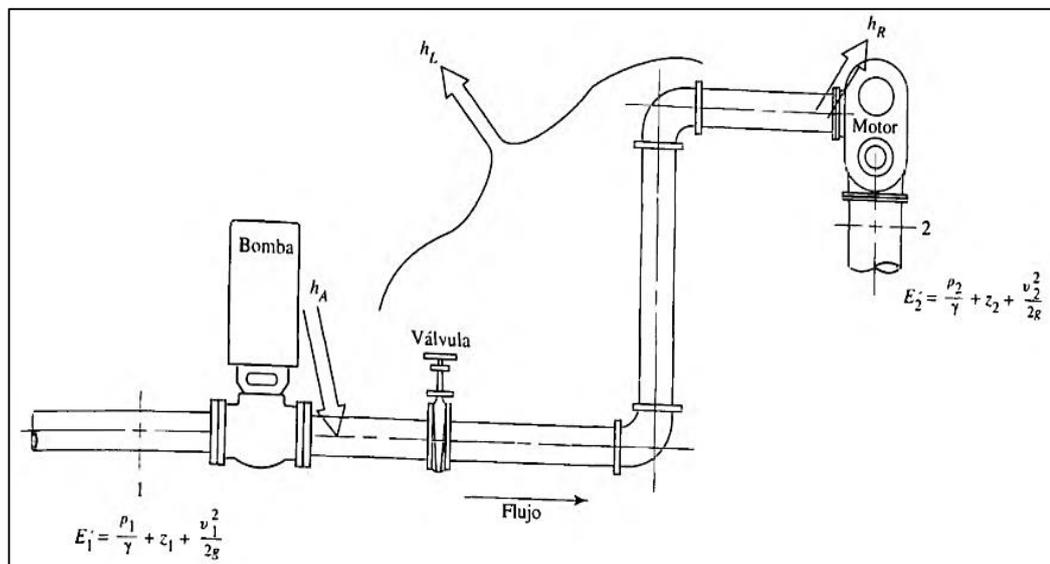
#### 3.2.1.4 Sistema de bombeo.

La bomba permite agregar una energía al sistema, la cual también se conoce como carga total. Para poder seleccionar la bomba se debe conocer la potencia, el caudal y la altura de elevación del fluido, para lo cual, se debe realizar los cálculos que se detallarán más adelante. Conforme el fluido fluye a lo largo de un tramo de tubería, manguera, codos, su presión disminuye debido a la pérdida de energía, por la fricción que se crea en la interacción del fluido de la pared estacionaria y la turbulencia interna. De acuerdo a Mott (2006) “La solución comienza con la ecuación de la energía de Bernoulli” (p. 198),

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.1)$$

Pero esta ecuación tiene restricciones, debido a que el sistema a analizar tiene bomba, pérdidas por la fricción: tanto en las tuberías, como accesorios. Se muestra además las energías agregadas, removidas y pérdidas  $h_A, h_R, h_L$ , por lo tanto la expresión a utilizar será la ecuación 3.2 (Ver Figura 16).

$$E_1' + h_A - h_R - h_L = E_2' \quad (3.2)$$



**Figura 17 Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de la energía.**

Fuente: (Mott, 2006)

Entonces la ecuación se convierte en:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.3)$$

Las unidades comunes del SI son  $N \cdot m/N$ , o metros. Donde específicamente, se manejará los siguientes términos:

$h_A$  = Energía que se entrega al fluido con un dispositivo mecánico, como una bomba, se le denomina como carga total el sistema.

$h_R$  = Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico, como un motor de fluido.

$h_L$  = Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías, válvulas y otros accesorios.

$P_{1,2}$  = Presiones del sistema.

$\gamma$  = Peso específico.

Como  $P_1 = P_2 = 0$ , la  $v_1$  y  $v_2$  son aproximadamente igual a cero y no tenemos energías que remuevan el fluido, por lo tanto, la ecuación 3.3 se simplifica a:

$$z_1 + h_A - h_L = z_2$$

Para calcular la potencia que suministra la bomba, se debe despejar  $h_A$ , por lo tanto la carga total es:

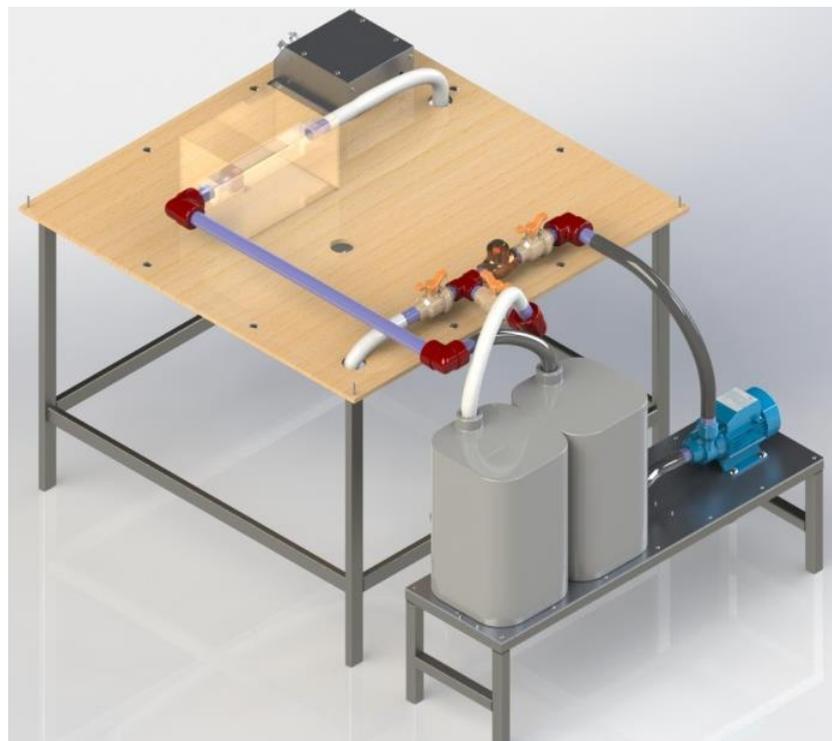
$$h_A = z_2 - z_1 + h_L \quad (3.4)$$

De acuerdo a Mott (2006) “la potencia de la bomba es:” (p. 207)

$$P_A = h_A \gamma Q \quad (3.5)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido que circula a través de la bomba y  $Q$  es el flujo volumétrico del fluido.

Hay diez componentes de la pérdida total de energía, a continuación se presenta una lista.



**Figura 18 Sistema hidráulico del sistema.**

$h_1 = K(V_s^2/2g)$	Pérdida en la entrada.
$h_2 = f(L/D)(V_s^2/2g)$	Pérdida por fricción en la línea de succión.
$h_3 = f(L/D)(V_s^2/2g)$	Pérdida por fricción en la línea de succión manguera.
$h_4 = f(L/D)(V_s^2/2g)$	Pérdida por fricción en la línea de succión 14 neplos.
$h_5 = Kc(V_d^2/2g)$	Cuatro codos.
$h_6 = Kte(V_d^2/2g)$	Te.
$h_7 = Kvb(V_d^2/2g)$	Tres válvulas de bola.
$h_8 = Kch(V_d^2/2g)$	Válvula Check.
$h_9 = f(L/D)(V_d^2/2g)$	Sección no circular.
$h_{10} = K(V_d^2/2g)$	Pérdida en la salida.

Antes de empezar con el diseño hay hacer una lista de los datos que se conocen con anticipación, los cuales son:

$Q = 30 \left[ \frac{lt}{min} \right] = 0,0005 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$	Caudal (Ver tabla 4).
$Dt = 0,0243 [m].$	Diámetro de la tubería (Ver tabla 5).
$Dm = 0,0254 [m].$	Diámetro de la manguera (Ver tabla 6).
$Lm = 3,60 [m].$	Longitud total de manguera.
$Lneplos = 0,06 [m].$	Longitud neplos.
$Lt = 0,80 [m].$	Longitud tubería.
$S = 0,04 [m].$	Longitud de los lados del cuadrado de acrílico.
$Lc = 0,36 [m].$	Longitud cuadrado de acrílico.
$v = 1,053 \times 10^{-6} [m^2/s].$	Viscosidad cinemática del agua a 18°C (Anexo A).
$K = 1,5 \times 10^{-3} [mm].$	Rugosidad absoluta del PVC (Anexo B).

La velocidad en la línea de succión y de descarga es la misma, ya que las mangueras utilizadas tienen igual área. De acuerdo a Mott (2006) “El flujo volumétrico es:” (p.154).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3.6)$$

Donde A es el área de la sección y V es la velocidad promedio del flujo.

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

$$V = \frac{0,0005m^3}{\pi * \frac{(0,0254m)^2}{4}}$$

Por lo tanto la velocidad de succión y descarga es:

$$V = 0,987 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

#### ***Pérdida de energía en la entrada.***

De acuerdo a Mott (2006) “La pérdida de la energía en la entrada se calcula con la ecuación 3.7:” (p. 294).

$$h_L = K \left( \frac{V_s^2}{2g} \right) \quad (3.7)$$

Donde K, es el coeficiente de resistencia de la entrada, este valor se puede ver en el ANEXO C. Este factor se basa en el tipo de configuraciones que se presenta en la entrada del sistema.

#### ***Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías.***

De acuerdo a Mott (2006) “Primero se debe evaluar el número de Reynolds para determinar si se trata de flujo laminar o turbulento” (p. 230). El autor plantea la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (3.8)$$

Donde D es el diámetro y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

$$Re = \frac{\frac{0,987m}{s} * 0,0243m}{\frac{1,053 \times 10^{-6} m^2}{s}}$$

$$Re = 2,28 \times 10^4$$

Si  $Re < 2000$ , *Flujo laminar.*  
 $Re > 4000$ , *Flujo turbulento.*

De acuerdo a Mott (2006) Como el flujo es turbulento, “para calcular la pérdida por fricción se debe usar la ecuación de Darcy” (p. 233).

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (3.9)$$

Además se debe calcular los factores de fricción para cada uno de los elementos que se encuentran en el sistema. De acuerdo a Mataix (1986) “Para calcular el factor de fricción se utiliza la ecuación de Colebrook-White” (p. 215).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{K/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.10)$$

### ***Pérdidas de energía del sistema por la fricción en válvulas y otros accesorios.***

Las pérdidas de energía en accesorios son proporcionales a la carga de velocidad de flujo, conforme pasa por un accesorio o por una válvula. De acuerdo a Mott (2006) “La pérdida de energía en accesorios se calcula mediante la ecuación 3.11” (p. 202).

$$h_L = K \times \frac{V^2}{2g} \quad (3.11)$$

De acuerdo a Mott (2006) “El coeficiente de resistencia, viene dado por K y se calcula mediante la ecuación 3.12” (p. 296).

$$K = \left(\frac{Le}{D}\right) f \quad (3.12)$$

En el Anexo D se presenta el valor de  $(Le/D)$ , llamado relación de longitud equivalente y se considera constante para un tipo dado de válvula o acoplamiento;  $f$  es el factor de resistencia de la tubería a la que está conectada la válvula o acoplamiento.

***Pérdidas de energía en secciones no circulares.***

De acuerdo a Mott (2006) la pérdida que se encuentra en la caja de acrílico de prueba es “de una sección no circular (ver Anexo E), por lo tanto se debe calcular el área mediante la ecuación 3.13” (p. 263).

$$A = S^2 \quad (3.13)$$

De acuerdo a Mott (2006) “A la dimensión característica de las secciones transversales no circulares se les denomina radio hidráulico” (p. 263) y se define,

$$R = \frac{A}{PM} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (3.14)$$

Para este caso particular PM, (Ver Anexo E).

$$PM = 4S \quad (3.15)$$

De acuerdo a Mott (2006) “El perímetro se le define como la suma de la longitud de las fronteras de la sección que están en contacto con el fluido” (p. 263).

**TABLA 9**  
**Datos calculados sección no circular.**

<b>Área neta del flujo</b> (ecuación 3.13)	$A = (0,04\text{m})^2$	$A = 0,0016 \text{ [m}^2\text{]}$
<b>Perímetro mojado</b> (ecuación 3.15)	$PM = 4(0,04\text{m})$	$PM = 0,16 \text{ [m]}$
<b>Radio hidráulico</b> (ecuación 3.14)	$R = \frac{0,0016 \text{ m}^2}{0,16 \text{ m}}$	$R = 0,01 \text{ [m]}$
<b>Velocidad</b> (ecuación 3.6)	$V = \frac{0,0005\text{m}^3}{0,0016 \text{ m}^2}$	$V = 0,3125 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

De acuerdo a Mott (2006) “El Número de Reynolds para flujo en secciones no circulares se calcula” (p. 264).

$$Re = \frac{V * 4R}{\nu} \quad (3.16)$$

$$Re = \frac{\frac{0,3125\text{m}}{\text{s}} * 4(0,01\text{m})}{\frac{1,053 \times 10^{-6} \text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$Re = 1,19 \times 10^4$$

Como el flujo es turbulento, se utiliza la ecuación 3.9 y ecuación 3.10, para calcular las pérdidas y el factor de fricción, tomando en cuenta que  $D = 4R$ .

#### **Pérdida de energía en la salida.**

Conforme el fluido pasa de una tubería a un depósito, la velocidad disminuye casi a cero. De acuerdo a Mott (2006) “La pérdida de la energía en la salida se calcula con la ecuación 3.17:” (p. 284).

$$h_L = K \left( \frac{V_d^2}{2g} \right) \quad (3.17)$$

El valor de  $K=0,1$  se emplea sin que importe la configuración de la salida.

**TABLA 10**  
**Factores de fricción.**

<b>Tubería, neplos, accesorios</b> (ecuación 3.10)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{1,5 \times 10^{-3}}{0,0243} \frac{1}{3,7} + \frac{2,51}{2,28 \times 10^4 \sqrt{f}} \right)$	$f = 0,0798$
<b>Manguera</b> (ecuación 3.10)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{1,5 \times 10^{-3}}{0,0254} \frac{1}{3,7} + \frac{2,51}{2,28 \times 10^4 \sqrt{f}} \right)$	$f = 0,0781$
<b>Sección no circular</b> (ecuación 3.10)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{1,5 \times 10^{-3}}{0,04} \frac{1}{3,7} + \frac{2,51}{1,19 \times 10^4 \sqrt{f}} \right)$	$f = 0,0649$

**TABLA 11**  
**Pérdida por fricción**

<b>Línea de succión</b> (ecuación 3.7)	$h_1 = 1,0 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_1 = 0,05 [m]$
<b>Tubería</b>	$h_2 = 0,0798 \times \frac{0,80m}{0,0243m} \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_2 = 0,130[m]$
<b>Manguera</b>	$h_3 = 0,0781 \times \frac{3,60m}{0,0254m} \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_3 = 0,550[m]$
<b>14 Neplos</b>	$h_4 = 14 \times 0,0798 \times \frac{0,06m}{0,0243m} \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_4 = 0,137[m]$

CONTINÚA →

<b>4 Codos</b>	$h_5 = 4 \times 50 \times 0,0798 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_5 = 0,792[m]$
<b>Tes</b>	$h_6 = 60 \times 0,0798 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_6 = 0,238[m]$
<b>3 Válvulas de Bola.</b>	$h_7 = 3 \times 150 \times 0,0798 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_7 = 1,783[m]$
<b>Válvula Check.</b>	$h_7 = 135 \times 0,0798 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_8 = 0,535[m]$
<b>Sección no circular.</b>	$h_9 = 0,0649 \times \frac{0,36m}{4 \times (0,01 m)} \times \frac{\left(0,3125 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_9 = 0,003[m]$
<b>Línea de descarga.</b>	$h_{10} = 1,0 \times \frac{\left(0,987 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81m}{s^2}\right)}$	$h_{10} = 0,05 [m]$

Ahora es posible determinar la pérdida total  $h_L$ .

$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10}$$

$$h_L = (0,05 + 0,130 + 0,550 + 0,137 + 0,792 + 0,283 + 1,783 + 0,535 + 0,003 + 0,05)[m]$$

$$\mathbf{h_L = 4,313 [m]}$$

De la ecuación de la energía 3.4, la carga total sobre la bomba es

$$h_A = (0,35 + 4,313)[m]$$

$$\mathbf{h_A = 4,663 [m]}$$

De acuerdo a Mott (2006) “Las bombas utilizadas sobre todo para transferir o hacer circular líquidos, la eficiencia va de 50 a 85%, mediante la ecuación 3.5., se calcula la potencia suministrada de la bomba” (p. 208).

$$P_A = \frac{h_A \rho g Q}{e_M}$$

Siendo  $\rho = 998,5 \text{ kg/m}^3$  a  $18^\circ\text{C}$ , esta es la temperatura promedio del Laboratorio donde se encuentra ubicado el equipo.

$$P_A = \frac{4,663\text{m} \times 998,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{0,0005\text{m}^3}{\text{s}}}{0,85}$$

$$P_A = 26,88 \text{ [W]}$$

Con esto concluimos que se necesita una bomba con una potencia aproximada de 27 [W] y un caudal de 30 lt/min. Para investigaciones futuras se ha seleccionado una bomba de mayor potencia, la bomba seleccionada es una bomba periférica las cuales son diseñadas para extraer agua limpia y recircularlas. A continuación se muestra las características de la bomba seleccionada.

**TABLA 12**  
**Datos técnicos de la bomba.**

Características a 60 Hz	QB60	QB70	QB80	QB90
<b>Entrada</b>	Ø25	Ø25	Ø25	Ø25
<b>Salida</b>	Ø25	Ø25	Ø25	Ø25
<b>Potencia (kW)</b>	0,55	0,55	0,75	0,75
<b>Q máx. (lt/min)</b>	20	30	45	50
<b>H máx. (m.c.a)</b>	35	40	50	60
<b>Peso (kg)</b>	5,8	9,7	10,5	11,5
<b>Grado de protección</b>	IP 44	IP 44	IP 44	IP 44
<b>Temperatura máx. Del agua</b>	40° C	40° C	40° C	40° C

Fuente: (Datos técnicos Motoresczerweny, 2016)

Esta bomba es de alta presión y son económicas; han sido diseñadas para bombear agua limpia. El cuerpo está construido en fundición gris y el impulsador de latón, confiriéndole robustez y un buen comportamiento a las presiones desarrolladas por estas bombas.



**Figura 19 Bomba periférica QB-70 (Datos técnicos).**

La bomba de menor potencia que se adquirió (Ver Figura 19). Se eligió la bomba de menor potencia, ya que nuestro sistema según los cálculos realizados necesita de una potencia de 21.40 [W].

### **3.2.2 Sistema Mecánico.**

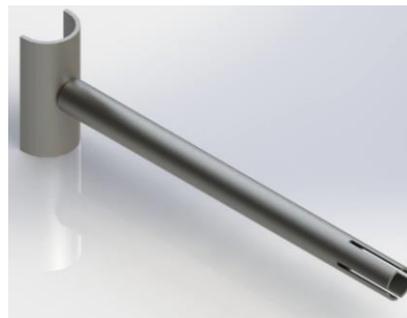
#### **3.2.2.1 Sistema de iluminación y ampliación de luz.**

Para el diseño de esta parte del equipo, nos basamos en que debe ser desmontable, tiene que girar y trasladarse de arriba abajo. Esto se debe a que para obtener el plano de luz, el láser y los lentes deben estar ubicados estratégicamente (Ver figura 20).



**Figura 20 Sistema para el láser y ampliación de la luz.**

Los tres sistemas constarán del mismo diseño principal, anteriormente ya se explicó en que se basó para este diseño.



**Figura 21 Soporte principal.**

Para el diseño de los soportes del láser y del lente, se tomó en cuenta que el soporte secundario debe salir aproximadamente 20 [cm] y además debe girar.

**TABLA 13**  
**Soportes secundarios del sistema.**

Soportes	Sistema de sujeción	Ensamble
Láser		



### 3.3 Selección de la instrumentación del sistema.

#### 3.3.1 Láser.

De acuerdo con Bardera (2005) “Las características que el láser debe tener son:” (p. 3-10).

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): 380 - 780 nm, visible al ojo humano.
- Energía (J).- 150 – 450 mJ, energía necesaria del láser para iluminar las partículas correctamente.

Para el cálculo de la potencia del láser comenzamos con la energía necesaria que necesitamos para iluminar las partículas y el tiempo en que se demora en dar su máxima potencia el láser es de 80ms, utilizando la ecuación de la energía eléctrica se calcula.

$$P = \frac{E}{t} \quad (3.18)$$

#### *Potencia mínima*

$$P = \frac{0,150 \text{ [J]}}{0,08 \text{ [s]}}$$

$$P = 1875 \text{ [mW]}$$

#### *Potencia máxima*

$$P = \frac{0,450 \text{ [J]}}{0,08 \text{ [s]}}$$

$$P = 5625 \text{ [mW]}$$



**Figura 22 Láser TYLaser 303.**

Fuente: (TYLASER, 2012)

Por esta razón se eligió el TYLaser 303, el cual tiene una potencia de salida menor a  $3000[mW]$ .

### **3.3.2 Cámara.**

De acuerdo con Iriarte (2008) “Las características de la cámara son” (p. 11)

- Mínimo 1000 fps.
- Sensor CCD o CMOS.

Por este motivo la cámara que se utiliza para este proyecto es una CASIO Exilim EX-FH20.



**Figura 23 Cámara CASIO Exilim EXFH20.**

Fuente: (CASIO, 2013)

**TABLA 14**  
**Características técnicas de la cámara.**

CAPTACIÓN DE LA IMAGEN		
Sensor de imagen	Tipo	CMOS
	Tamaño	1/2,3 pulgadas
Resolución	Total	10,3 MP
	Efectiva	9,1 MP
Filtro de color	RGB	

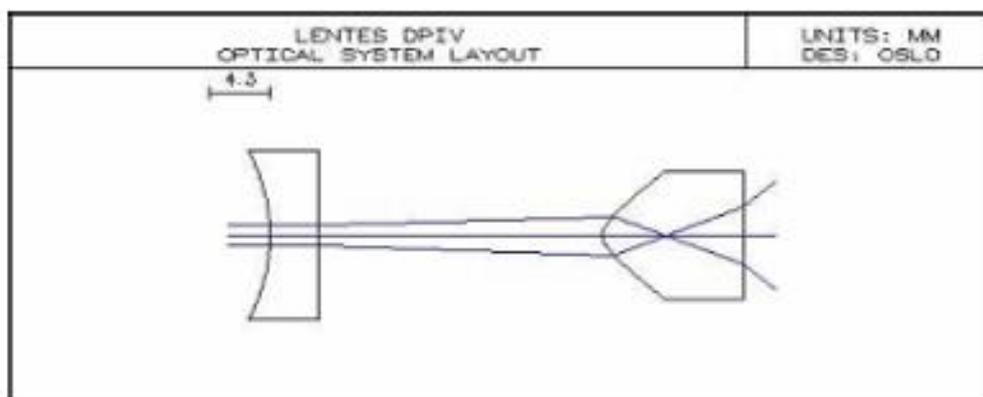
  

CONTROL DEL DISPARO		
Vídeo	Archivo	AVI
	Formato de compresión	
	Tipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 1.280 x 720 píxeles, 30 fps, 10 min</li> <li>· 640 x 480 píxeles, 30 fps, 10 min</li> <li>· 480 x 360 píxeles, 210 fps, 10 min</li> <li>· 224 x 168 píxeles, 420 fps, 10 min</li> <li>· 224 x 56 píxeles, 1.000 fps, 10 min</li> </ul>

Fuente: (CASIO, 2013)

### 3.3.3 Óptica.

La fuente de luz utilizada más comúnmente en PIV para iluminar la superficie de medición es el láser.



**Figura 24 Simulación de las 2 lentes utilizadas en el sistema PIV.**

Fuente: (Martínez, 2010)

Para obtener la lámina del láser se obtiene haciendo pasar un rayo láser a través de un juego de lentes esféricas permitiendo ajustar la anchura (enfoque) del plano y una

lente cilíndrica divergente que determinan el ángulo de apertura del haz (con focales respectivas de -20mm y -18 mm) (Ver Tabla 15).



**Figura 25 Lente cóncavo BK7.**

Fuente: (OPTIANDES, 2013)

**TABLA 15**  
**Características técnicas del lente.**

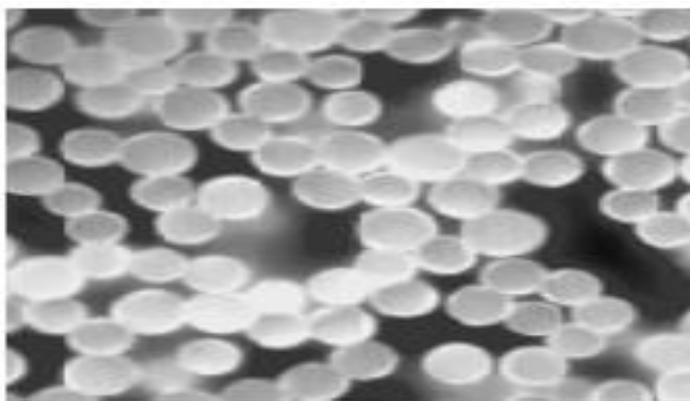
Lente	Lente óptico cóncavo.
Medida	-18
Material	Vidrio BK7.
Forma	Esférico.
Diámetro	65 mm.
Apertura clara	>80%.
Uso	Ampliación de la luz.
Revestimiento	Sin revestir.

Fuente: (OPTIANDES, 2013)

### **3.3.4 Partículas.**

Las partículas trazadoras insertadas en el flujo deben seguir adecuadamente el mismo, para lo cual es muy importante su densidad y el tamaño de la partícula. Los tamaños y materiales de las partículas recomendados para realizar esta técnica son de

entre 0.5 y 20  $\mu\text{m}$  (Bardera, 2005, citado en Lourenco, 1996); donde el material de las partículas puede ser de poliestireno o nylon. Las partículas utilizadas para este sistema son las que se muestran en la siguiente figura.



**Figura 26 Partículas trazadoras.**

Fuente: (FLUORSTAR, 2014)

Las características técnicas de las partículas adquiridas para este proyecto se muestran en la siguiente tabla. Las partículas deben ser fluorescentes, ya que esto permitirá que puedan ser detectadas por la luz del láser.

**TABLA 16**  
**Características técnicas de las Partículas.**

<b>Partículas</b>	Partículas fluorescentes.
<b>Material</b>	Resina de acrilato modificado con carboxilo para la formulación de pinturas y acabados.
<b>Visibilidad de partículas</b>	Emisión fluorescente.
<b>Fuente de luz</b>	Láser.
<b>Temperatura</b>	Resistente hasta 100° C.
<b>Densidad</b>	1,1 g/cm <sup>3</sup> .
<b>Diámetro</b>	15 $\mu\text{m}$ .
<b>Fecha de expiración</b>	>24 meses.
<b>Almacenamiento</b>	Almacenar a temperatura ambiente en un lugar seco. La botella debe ser cerrada herméticamente.

<b>Manejo</b>	Se recomienda utilizar guantes y protección respiratoria
<b>Cámara</b>	Sensor CMOS o CCD.
<b>Suministro</b>	Polvo seco.

Fuente: (FLUORSTAR, 2014)

### 3.4. Dimensionamiento y selección de componentes eléctricos y/o electrónicos.

#### 3.4.1 Controlador.

Para la selección del controlador debemos tomar en cuenta tres factores que son muy importantes:

- *Programación.*- Programación en lenguaje C, gran variedad de librerías para su uso, por lo que se coloca una ponderación del 30%.
- *Funcionamiento y Acople para accesorios.*- Utilización del menor número de elementos electrónicos para el acople de los demás dispositivos, debido a su importancia se le pondera con un valor del 40%.
- *Costo.*- Costo bajo, por lo que se coloca una ponderación del 30%.

**TABLA 17**  
**Cuadro comparativo de controladores.**

	PIC		ARDUINO		RASPBERRY PI	
<b>Parámetros</b>						
<b>Programación</b>	Utiliza	una	Utiliza	una	Utiliza	una
	programación	en	programación	en	programación	en
	lenguaje	C,	lenguaje	C,	lenguaje	C,

	variedad de librerías media,	de variedad de librerías alta.	de variedad de librerías media.
<b>Funcionamiento y acoples para accesorios.</b>	Necesita un programador y circuito adicional para funcionamiento y circuitos de acople para los periféricos de salida.	Solo se necesita alimentación de 6 a 12 V para su funcionamiento y conecta directamente a los periféricos de salida	Solo se necesita alimentación de 5V. y necesita circuitos externos para acople para las periféricos de salida
<b>Costos</b>	Bajo	Bajo	Medio

**Tabla 18**  
**Tabla de Valoración del controlador.**

Parámetros	Ponderación	PIC		ARDUINO		RASPBERRY Y PI	
		Valor	%	Valor	%	Valor	%
<b>Programación</b>	30%	5	15%	10	30%	5	15%
<b>Funcionamiento</b>	40%	2	8%	8	32%	5	20%
<b>Costo</b>	30%	10	30%	8	24%	2	6%
<b>Total</b>	100%		53%		86%		41%

El controlador Arduino se elige por mejor cumplimiento de las características necesarias para el proyecto, el consumo energético aproximado indicado en la hoja técnica es de 100mA.

### **3.4.2. Pantalla de Visualización.**

Para la selección de la pantalla de visualización debemos tomar en cuenta 3 factores que son muy importantes:

- *Programación y Visualización.*- Compatible con el controlador seleccionado, mayor visualización de escritura y ayuda con figuras gráficas para mejorar la apariencia visual, por lo que se coloca una ponderación del 50%.
- *Acople para el controlador.*- Utilizar el menor número de elementos electrónicos para el acople de la pantalla de visualización con el controlador, debido a su importancia se le pondera con un valor del 30%.
- *Costo.*- Costo bajo, por lo que se coloca una ponderación del 20%.

**TABLA 19**  
**Cuadro comparativo de controladores.**

	LCD 16x2	PANTALLA TFT 2,4''
<b>Parámetros</b>		
<b>Programación y Visualización</b>	Compatible con Arduino, 32 caracteres de visualización como máximo en la pantalla, solo representa letras.	Compatible con Arduino, 320x240 pixeles tamaño de pantalla para visualizar, 262000 colores, puede utilizar hasta imágenes.
<b>Acople para el controlador.</b>	Necesita potenciómetro para la regulación del contraste de la pantalla, y resistencias para encender el led de la pantalla.	Solo se necesita conectar directamente con el Arduino, debido a que se tiene una Shield para uso del mismo
<b>Costos</b>	Bajo	Medio - Bajo

**TABLA 20**  
**Tabla de Valoración del controlador.**

Parámetros	Ponderación	LCD 16x2		TFT 2,4''	
		Valor	%	Valor	%
<b>Programación</b>	50%	2	10%	10	50%
<b>Acople</b>	30%	7	21%	10	30%
<b>Costo</b>	20%	10	20%	8	16%
<b>Total</b>	100%		51%		96%

Se elige la Pantalla TFT 2,4'' por mejor cumplimiento de las características necesarias para el proyecto, el consumo energético aproximado indicado en la hoja técnica es de 100mA.

### **3.4.3. Módulo de Relé**

#### ***Cálculo de la corriente del motor***

Para poder el dimensionamiento del relé, hay que tener principalmente en cuenta la corriente que pasara por el mismo. Los datos eléctricos obtenidos de la bomba son (Ver Tabla 12):

$$\text{Potencia (P)} = 550[\text{Watt}]$$

$$\text{Voltaje de alimentación (V)} = 110[\text{V}]$$

$$\text{Factor de potencia (cos } \varphi) = 0.85$$

$$P = V * I * \cos\varphi \quad (3.19)$$

$$I = \frac{P}{V * \cos\varphi}$$

$$I = \frac{550 [\text{watt}]}{110[\text{V}] * 0,93}$$

$$I = 5.37 [\text{A}]$$

#### ***Calculo de la corriente del láser***

Los datos eléctricos obtenidos del láser son:

$$\text{Potencia (P)} = 3[\text{Watt}]$$

$$\text{Voltaje de alimentación (V)} = 3.7 [\text{V}]$$

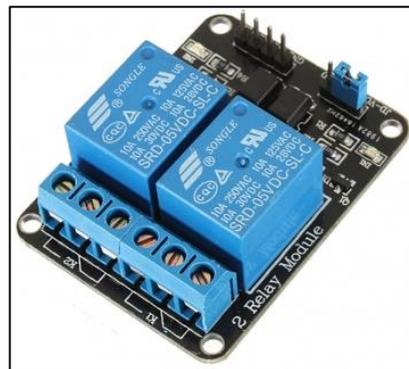
$$P = V * I \quad (3.20)$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{3 [\text{Watt}]}{3.7 [\text{V}]}$$

$$I = 0.81[\text{A}]$$

Por esta razón se eligieron módulos de relé que soporta hasta 10 A debido que la corriente más crítica es de la bomba eléctrica.



**Figura 27** Modulo Relé para Arduino.

Fuente: (ARDUINO, 2015)

**TABLA 21**

**Especificaciones del módulo Relé.**

<b>Modelo:</b>	SRD-05VDC-SL-C
<b>Tensión de operación</b>	5VDC
<b>Permite controlar cargas</b>	de 220V AC
<b>Corriente típica de operación</b>	15~20mA
<b>Componentes</b>	LED indicador de status
<b>Tensión de salida:</b>	(30 VDC a 10A) o (250VAC a 10A)

Fuente: (APM, 2015)

### 3.4.4. Fuente de alimentación para el sistema electrónico de control.

La capacidad de la fuente de alimentación está dada por los componentes electrónicos que estarán alimentados por la misma (Ver Tabla 22).

**TABLA 22**  
**Capacidad de la fuente de alimentación.**

Cant.	Descripción	Consumo C/U [mA]	Consumo Total [mA]
1	Arduino Mega	100	100
3	Entradas Arduino	40	120

CONTINÚA →

1	Pantalla TFT 2,4"	100	100
2	Módulo Relé	20	40
<b>TOTAL [mA]</b>			<b>360</b>

Como el consumo es de 360 [mA] aproximadamente, a un voltaje de 5V, utilizaremos una fuente de alimentación con las siguientes características.

Voltaje de Entrada = 110 [VAC]

Voltaje de Salida = 5.5 [VDC]

Corriente de Salida = 500 [mA]



### Figura 28 Fuente de alimentación.

Fuente: (MOTOROLA, 2014)

#### 3.4.5. Fusible.

Para la selección del fusible, se suma la corriente que utilizara todo el sistema eléctrico y electrónico, para nuestro caso, el consumo de la bomba de agua y la parte de control del Arduino con la pantalla y sus respectivas entradas, que viene dado por la capacidad del cargador.

El consumo de la bomba es de 5.37 [A] y de la fuente de alimentación del sistema electrónico y de control es de 0.5 [A] lo que nos da un total de 5.87 [A] de consumo. Por este motivo se elige el valor comercial superior siguiente de fusible que nos da de 10[A] para la protección de sobrecargas del sistema.

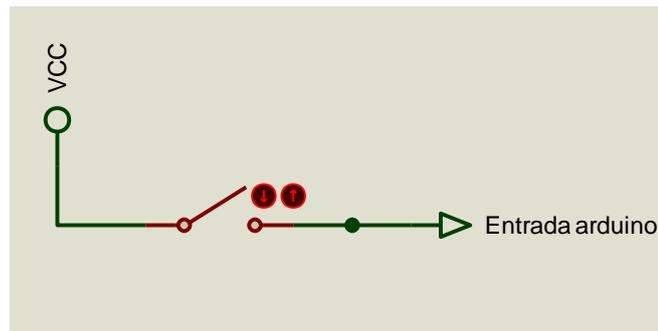


Figura 29 Fusible - Portafusible.

Fuente: (APM, 2015)

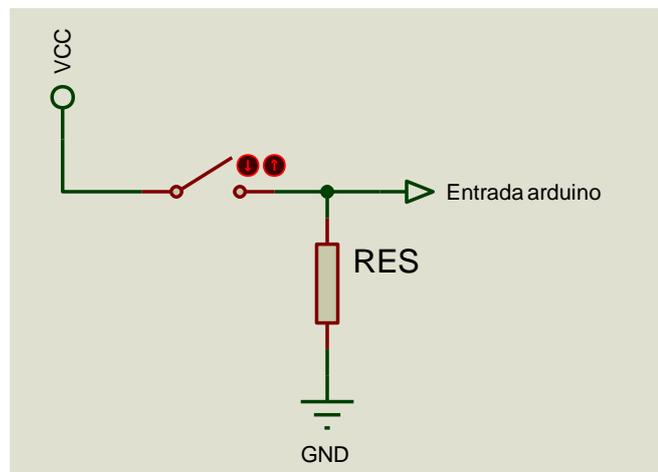
### 3.5. Diseño Electrónico y de control.

Para el ingreso de datos, como son las entradas digitales se utiliza la comunicación binaria, la que consta de 2 valores, el 0 lógico (0 [V]) y el valor de 1 lógico (5 [V]). El problema que se tiene, es debido que si se tiene conectado directamente (Ver Figura 30), no se obtiene un 0 lógico constante, debido a que la entrada en primer inicio no se encuentra conectado a ningún estado (VCC o GND), y el valor de voltaje puede pasar fluctuando debido agentes externos como los ruidos eléctricos y las variaciones de tensiones de las fuentes de alimentaciones, por lo que podría interpretar el controlador un valor no deseado.



**Figura 30 Circuito Ingreso de datos.**

Por este motivo se utiliza un circuito de resistencia en Pull-Down (Ver Figura 31), lo que si el switch se encuentra desactivado, siempre obtendremos un 0 lógico en la entrada de nuestro Arduino, debido que la entrada se encuentra conectado a una resistencia, y esta a su vez se conecta a GND para obtener siempre un 0 lógico en la entrada del Arduino, y a su vez si el switch se encuentra activado se obtendrá siempre el 1 lógico.



**Figura 31 Circuito de resistencia en Pull-Down.**

El valor de resistencia común para este circuito es de  $220\Omega$  debido que permite controlar el ingreso de corriente hacia la entrada del Arduino que es de  $40[\text{mA}]$  y mediante los cálculos podemos obtener la potencia de la resistencia.

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.21)$$

$$I = \frac{5 [V]}{220 [\Omega]}$$

$$I = 22.7 \text{ [mA]}$$

Como se observa en los cálculos, la resistencia permite un paso de 22.7 [mA] que es menor a la recomendada por el fabricante del controlador Arduino.

$$P = V * I \quad (3.22)$$

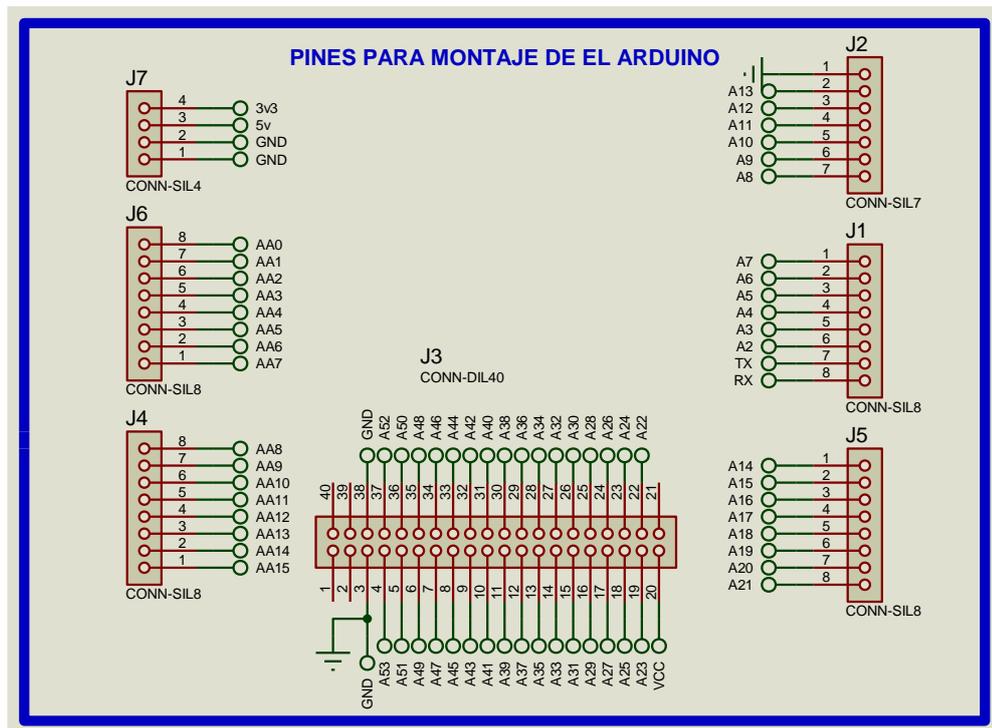
$$P = 5[V] * 22.7[mA]$$

$$P = 0,11[Watt]$$

Así se obtiene que la resistencia a utilizar es una de valor de  $220\Omega$  y una potencia de  $\frac{1}{4}$  Watt para evitar sobrecalentamiento en la misma y proteger a las entradas del Arduino.

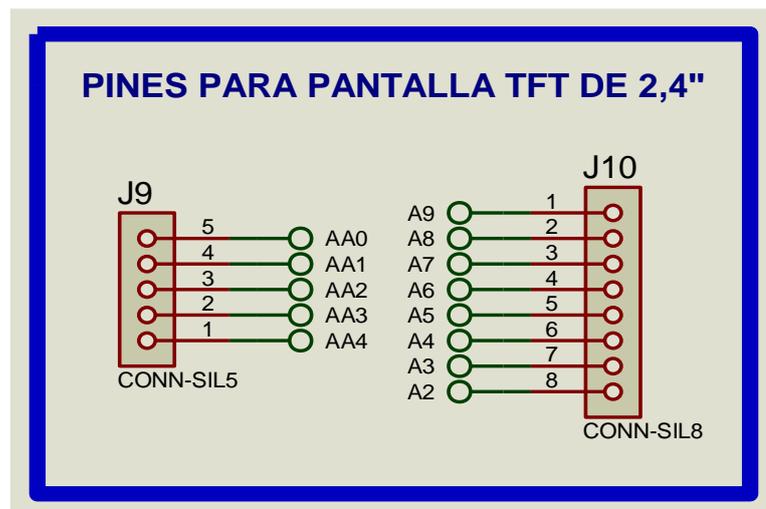
Para las salidas, como se utilizó un módulo de relés para Arduino las protecciones ya se encuentran diseñadas en las mismas por tal motivo solo se necesita conectar al pin de salida del Arduino con el módulo, y lo mismo ocurre con la pantalla TFT de 2.4'', debido que son placas electrónicas listas para funcionar directamente con el controlador Arduino.

El circuito electrónico consta de espadines macho – macho para el montaje del micro controlador Arduino, el cual tiene la forma y las distancias para que se pueda montar a la placa de Arduino como un Shield, así se obtiene el circuito electrónico (Ver Figura 32).



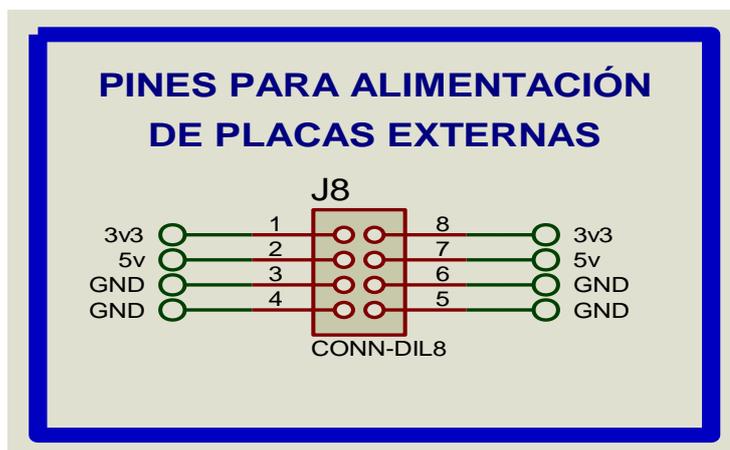
**Figura 32 Pines para montaje del Arduino.**

También consta de espadines macho – macho para la conexión con la pantalla TFT de 2.4” que nos ayudó para una mejor visualización del proceso, los pines que utiliza la pantalla son los pines analógicos A0, A1, A2, A3, A4, y los pines digitales 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 (Ver Figura 33).



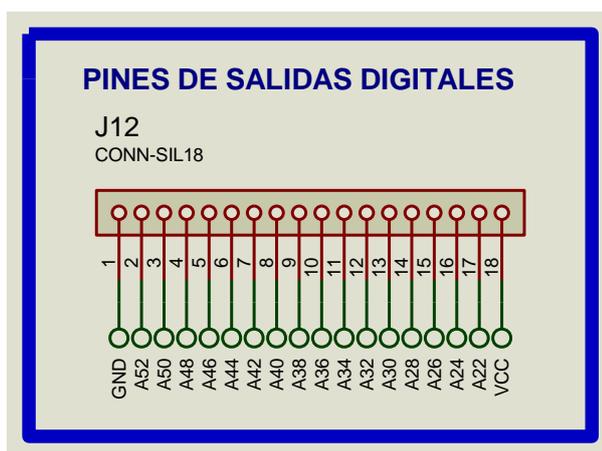
**Figura 33 Pines para Pantalla TFT de 2.4 “.**

La pantalla y el módulo de relé utilizan alimentación de 5V, el cual se obtuvo de la placa electrónica del Arduino, por lo que se sacó 2 de pines de salidas de cada alimentación (5 [V] y GND) (Ver Figura 34).



**Figura 34 Pines para alimentación de placas externas.**

Las pines de salida que se utilizó para manejar el módulo relé será de los pines del Arduino del pin 22 al pin 52 los números pares, estos pines podrán ser configurados como salida para manejar todo tipo de elemento electrónico (Ver Figura 35).



**Figura 35 Pines de salidas digitales.**

Los pines de entrada que se utilizaron para el uso de pulsadores y switch, cada uno de ellos están dados por el circuito de pull-down, al inicio de éste capítulo se observa el cálculo los valores de resistencia (Ver Figura 36).

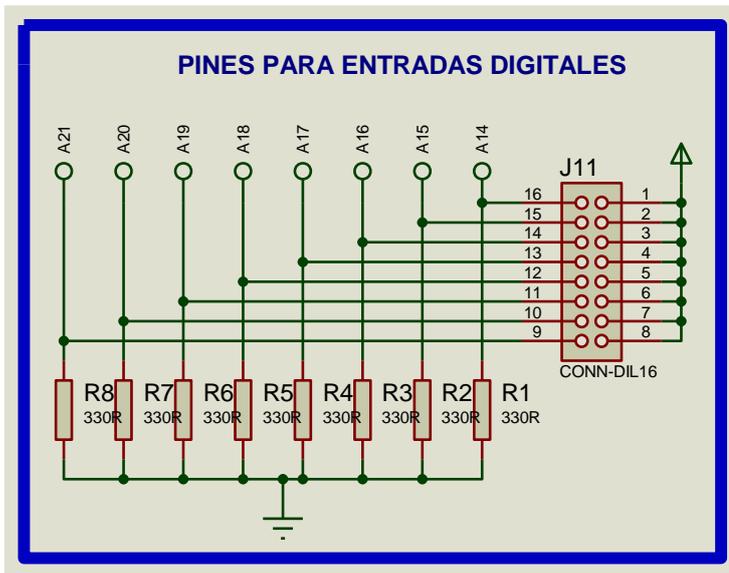


Figura 36 Pines para entradas digitales.

Así se obtuvo el circuito electrónico total (Anexo F), el cual se procedió a realizar en una placa de circuito electrónico regidas bajo normas IPC-2221.

En esta placa como se mencionó anteriormente tendrá los pines para el montaje de la placa electrónica, salida para la conexión con la pantalla TFT de 2,4'', pines de salida para conexión al módulo de relés y entadas para pulsadores y switch (Ver Figura 37).

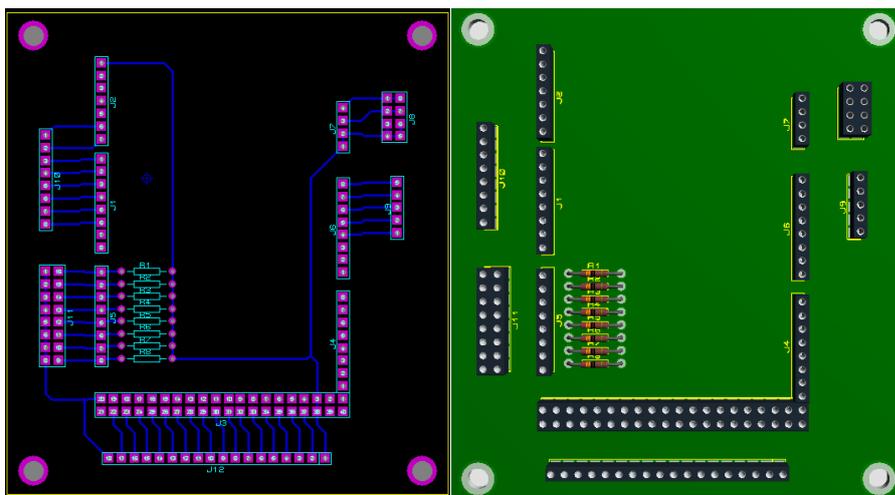


Figura 37 Placa electrónica routeada.

### **3.5. Programación y Control.**

La programación que controla todo el sistema eléctrico y electrónico, como también la pantalla para la visualización se la realizo en el software libre Arduino, se programa mediante código de lenguaje C, utilizando los parámetros necesarios para su uso (Anexo H).

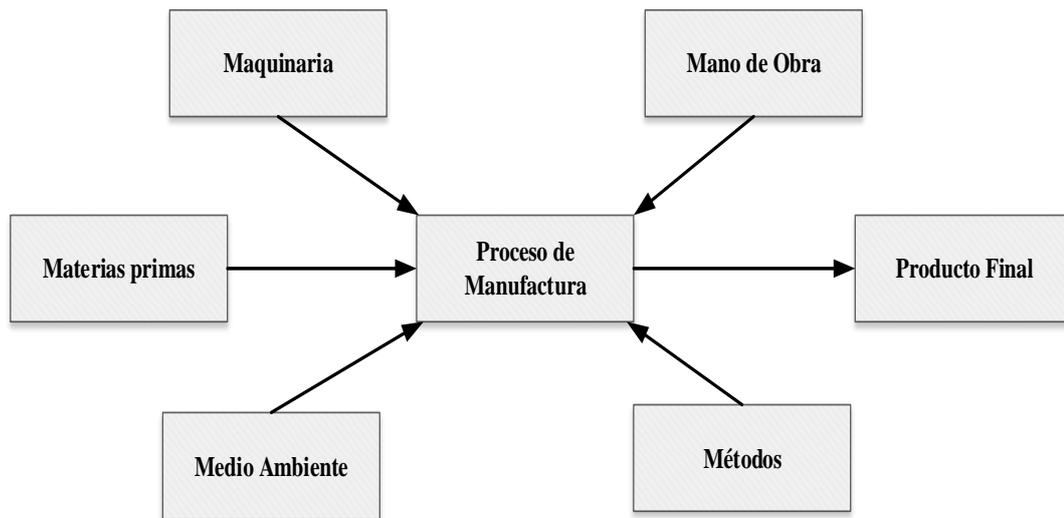
## **CAPITULO 4**

### **IMPLEMENTACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.**

#### **4.1 Estructura mecánica.**

Para la fabricación de cada una de las piezas que conforman la estructura mecánica, primero se debe saber que es un proceso de fabricación. Un proceso de fabricación no es más que un conjunto de operaciones individuales necesarias, para la obtención de producto determinado, a partir de la modificación de la materia prima.

En un proceso de fabricación se utilizan los diagramas de proceso; estos diagramas son una forma gráfica de presentar las actividades necesarias para la elaboración de un bien determinado.



**Figura 38 Esquema de un proceso de fabricación.**

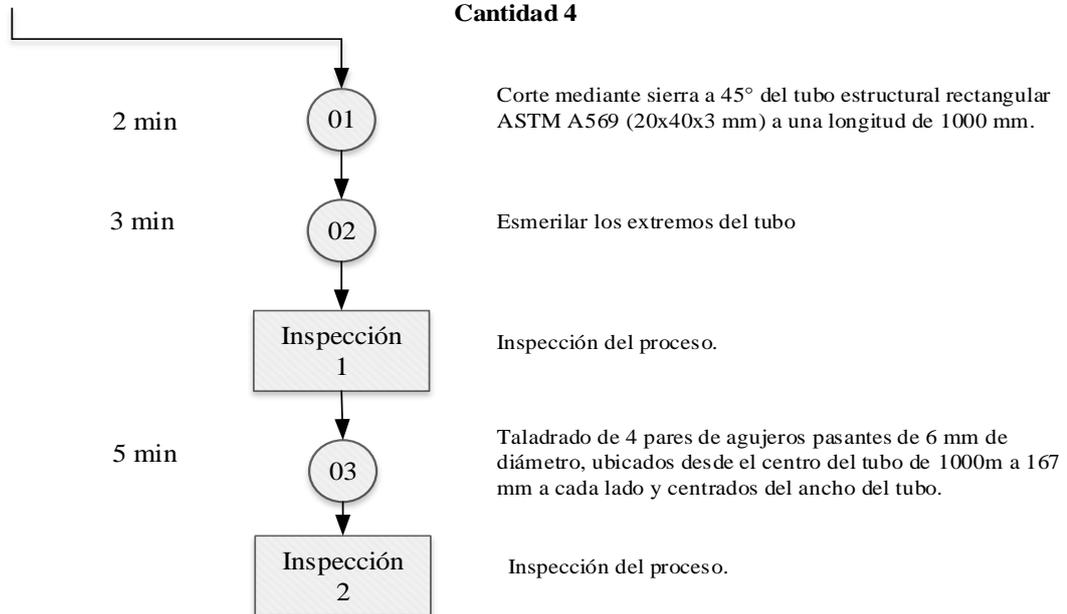
Un diagrama de proceso nos permite optimizar los recursos económicos, recursos de mano de obra, materia prima; además de distribuir los tiempos adecuados para cada una de las actividades que se deba ejecutar.

#### ***4.1.1. Diagrama de procesos de fabricación.***

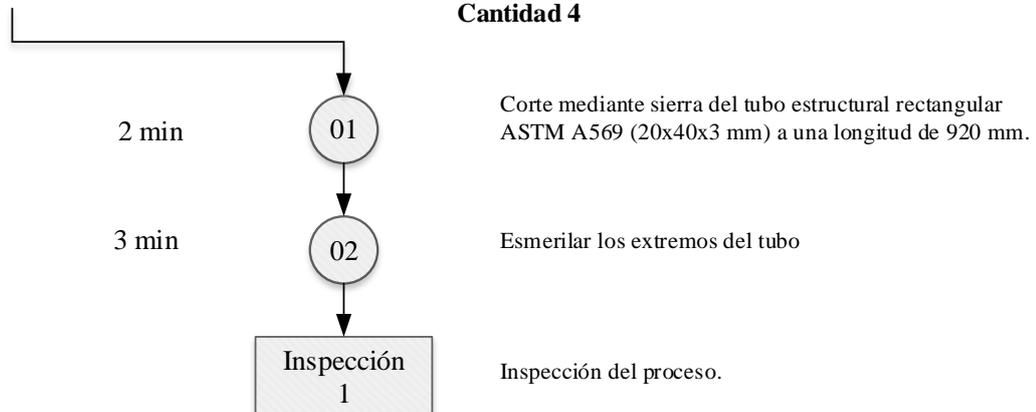
A continuación se presentan los diagramas de procesos de fabricación de cada una de las piezas que componen el sistema de PIVlab.

##### ***4.1.1.1. Mesa Principal y estructura de madera.***

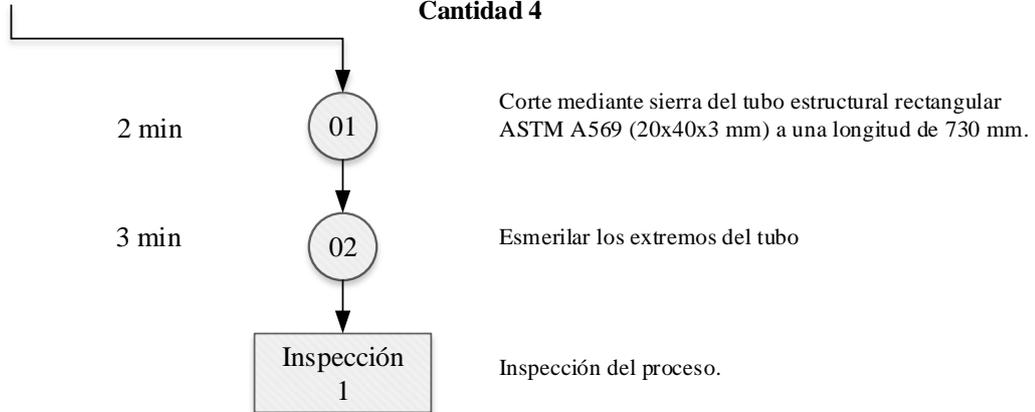
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Tubo horizontal rectangular**  
**Código 1101**  
**Cantidad 4**



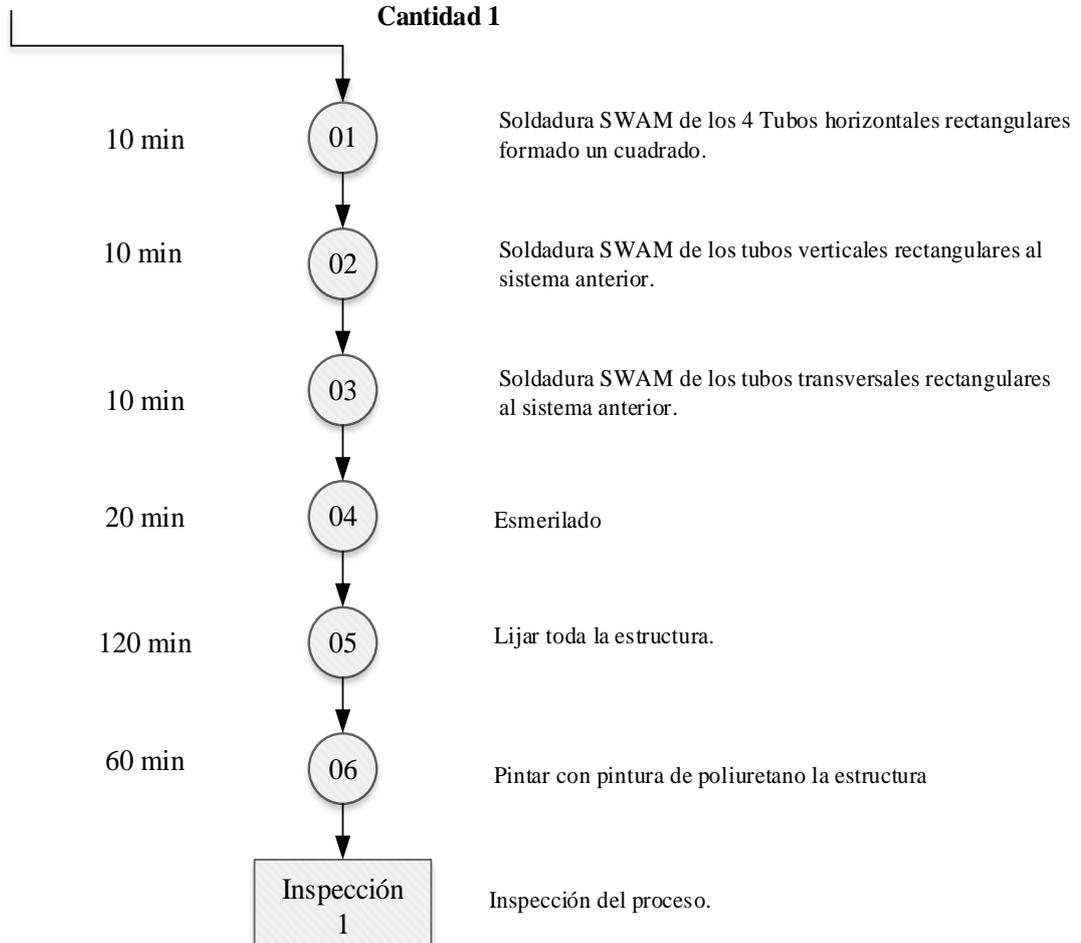
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Tubo transversal rectangular**  
**Código 1102**  
**Cantidad 4**



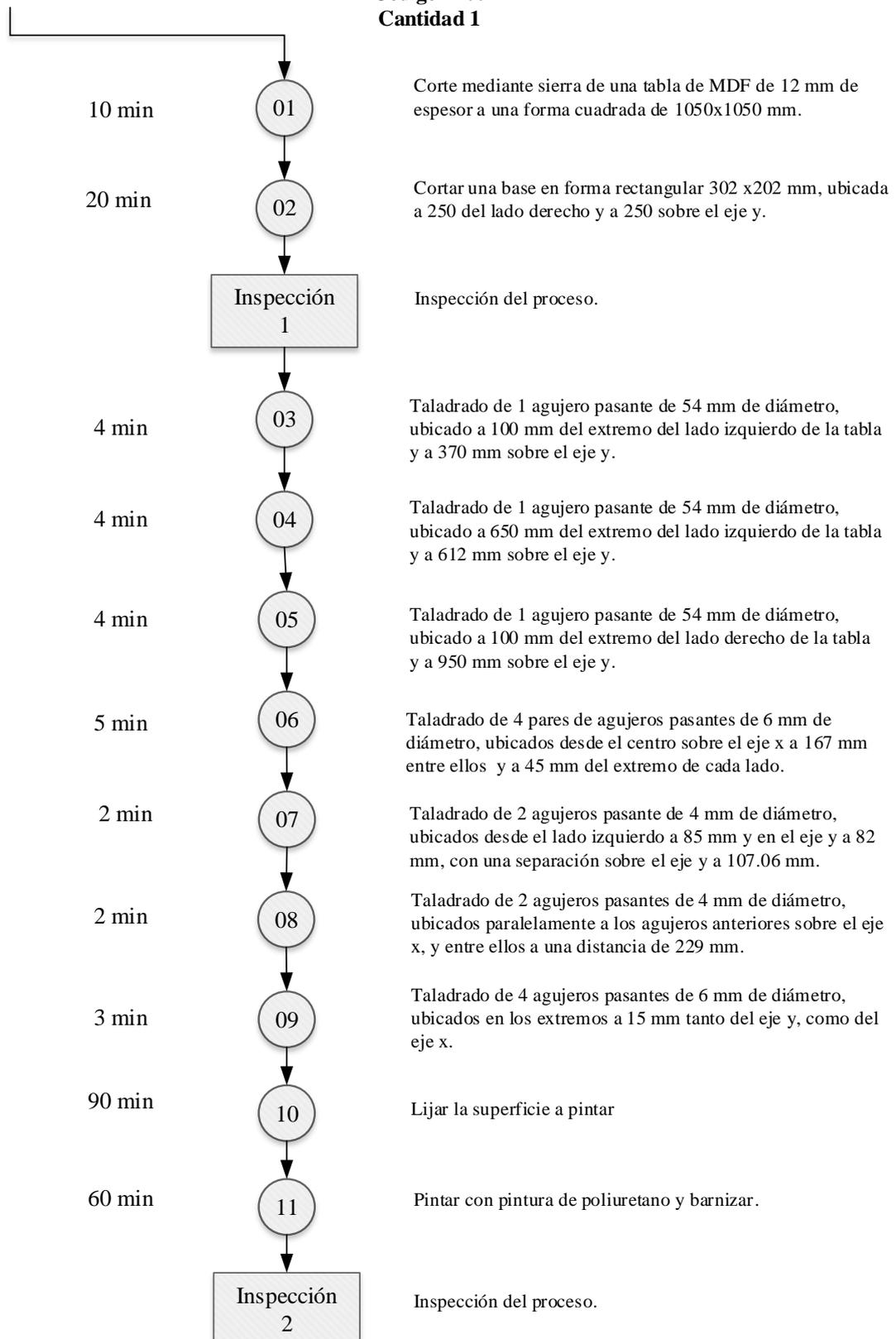
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Tubo vertical rectangular**  
**Código 1103**  
**Cantidad 4**



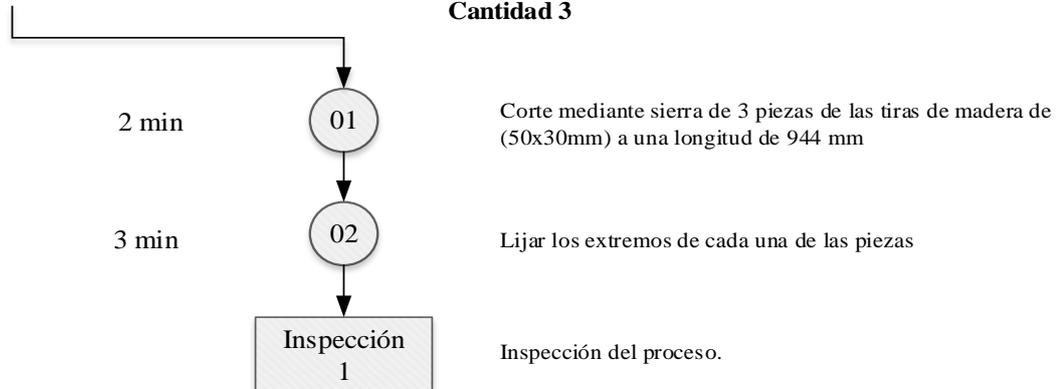
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Estructura principal**  
**Código 1100**  
**Cantidad 1**



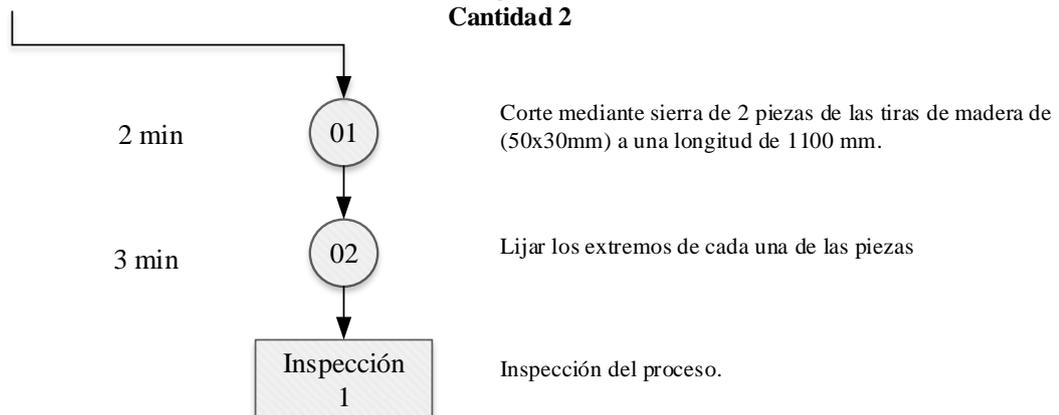
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Soporte Madera**  
**Código 1200**  
**Cantidad 1**



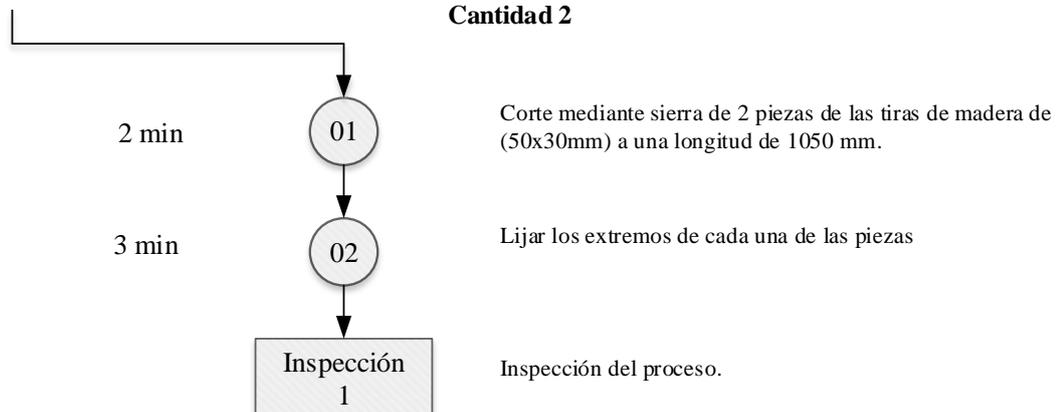
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Postes transversales**  
**Código 1301**  
**Cantidad 3**



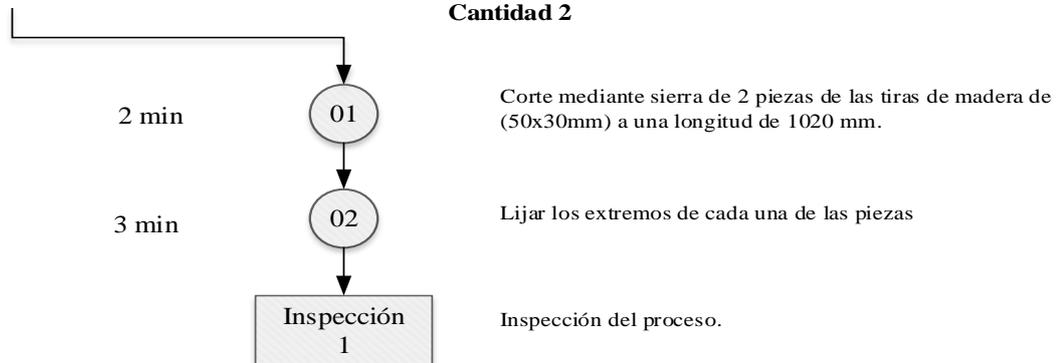
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Postes horizontales**  
**Código 1302**  
**Cantidad 2**



**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Postes Verticales**  
**Código 1303**  
**Cantidad 2**

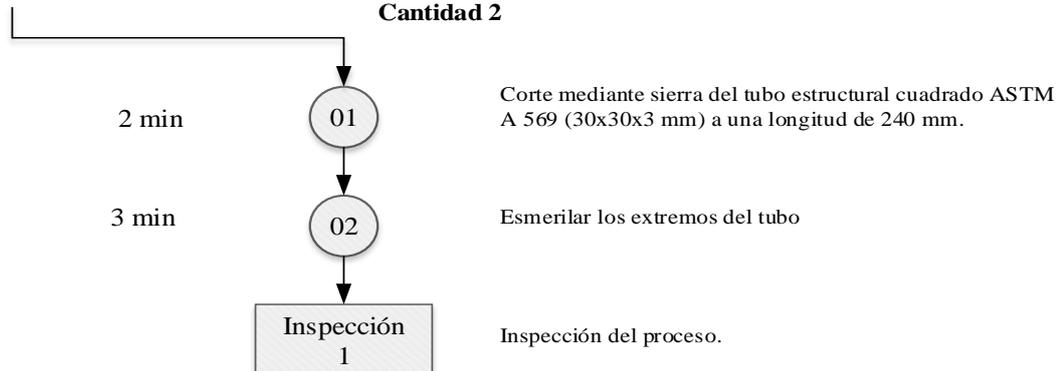


**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Principal y estructura de madera**  
**Postes Verticales delanteras**  
**Código 1304**  
**Cantidad 2**

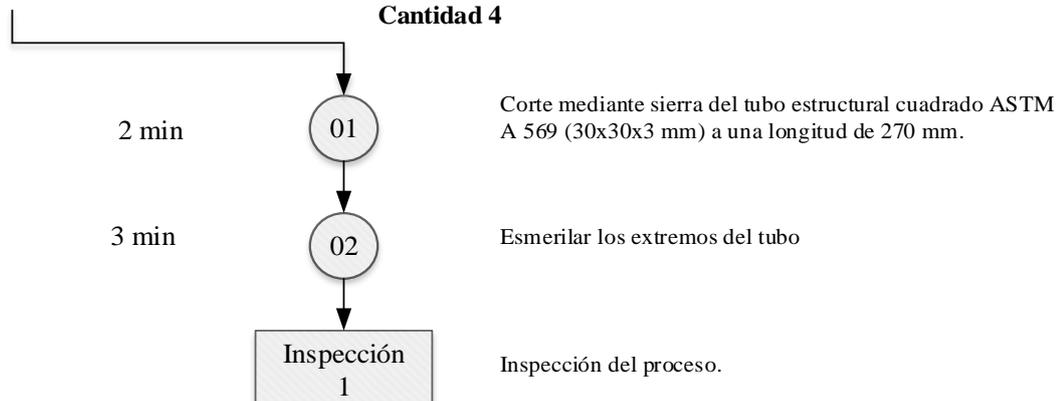


**4.1.1.2. Mesa bomba-Tanques.**

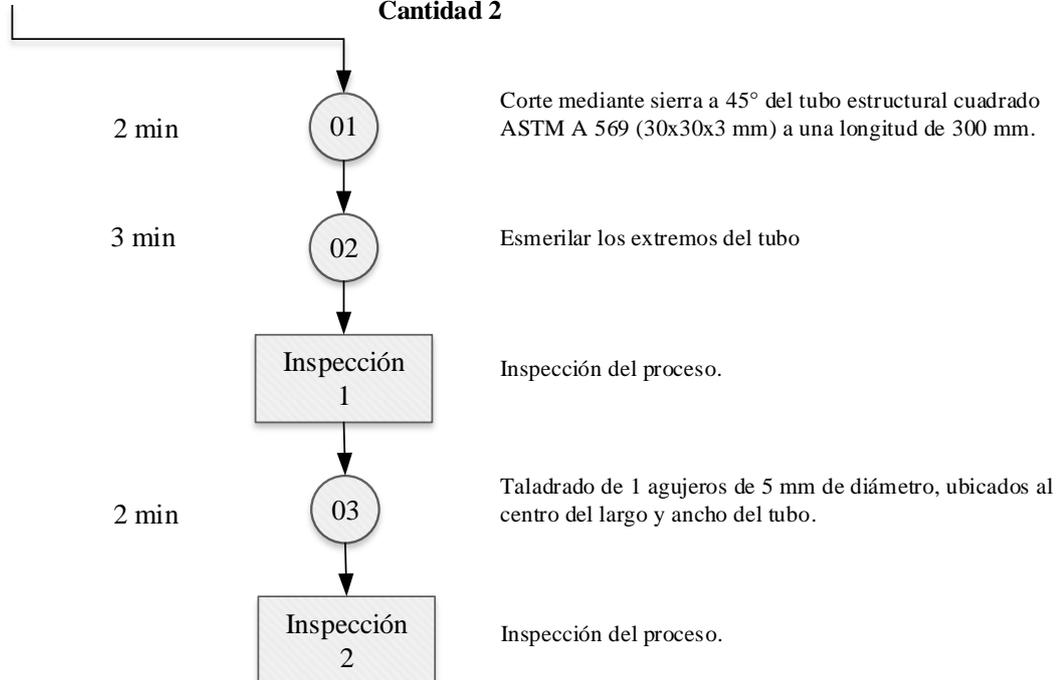
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Tubo transversal cuadrado**  
**Código 2101**  
**Cantidad 2**



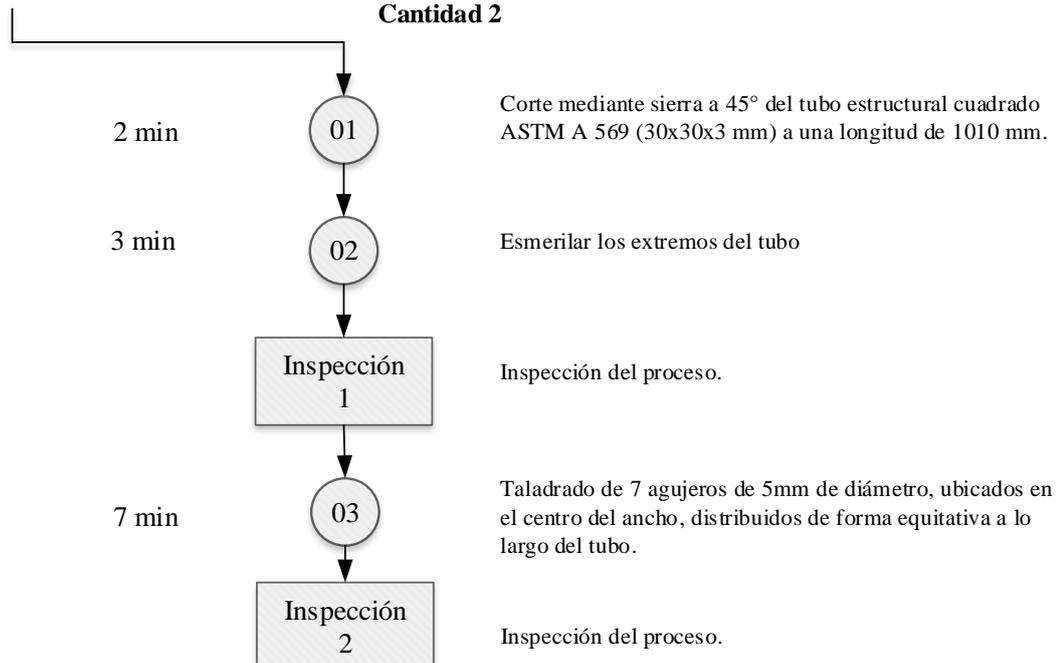
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Tubo vertical cuadrado**  
**Código 2102**  
**Cantidad 4**



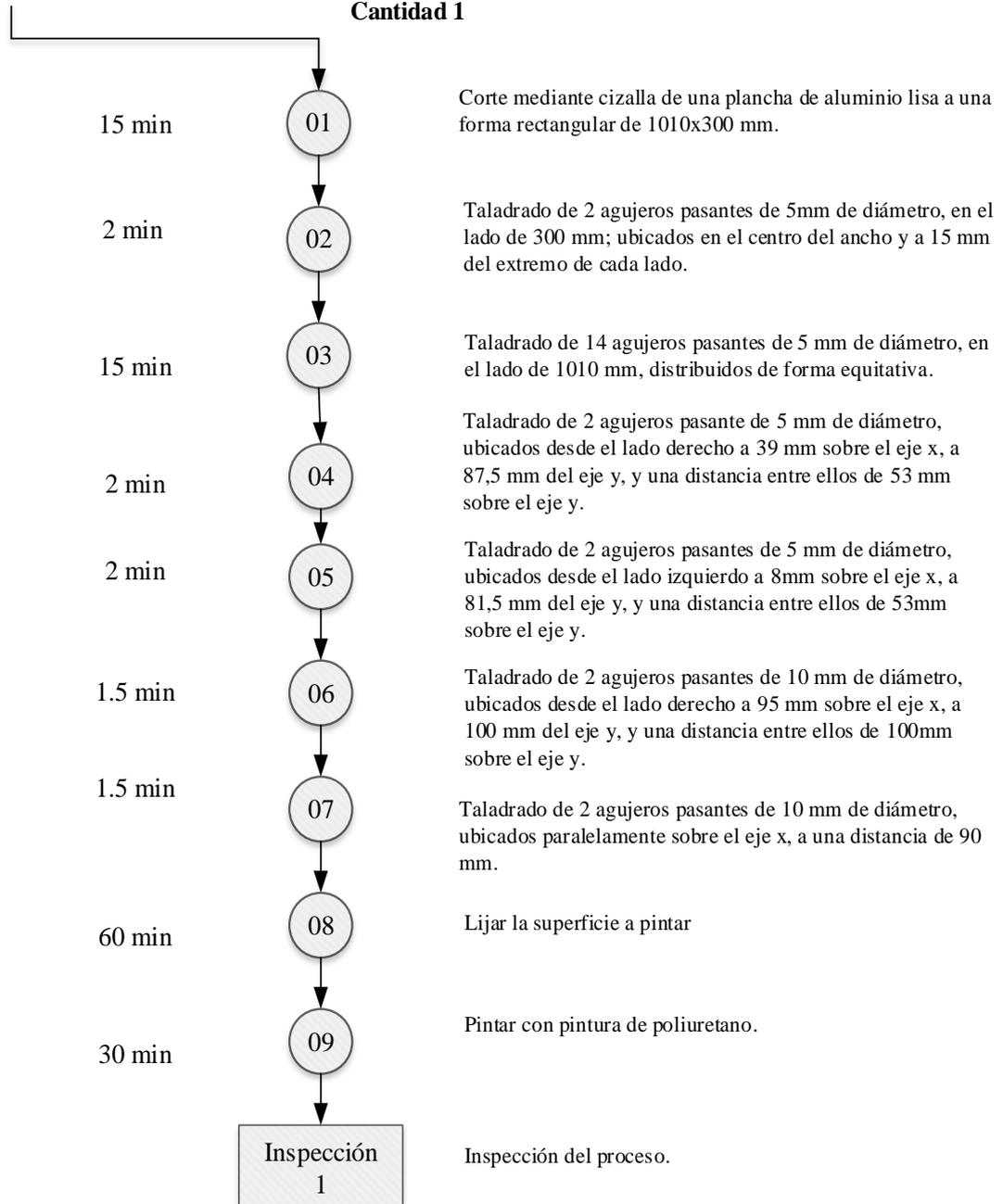
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Tubo horizontal cuadrado 1**  
**Código 2103**  
**Cantidad 2**



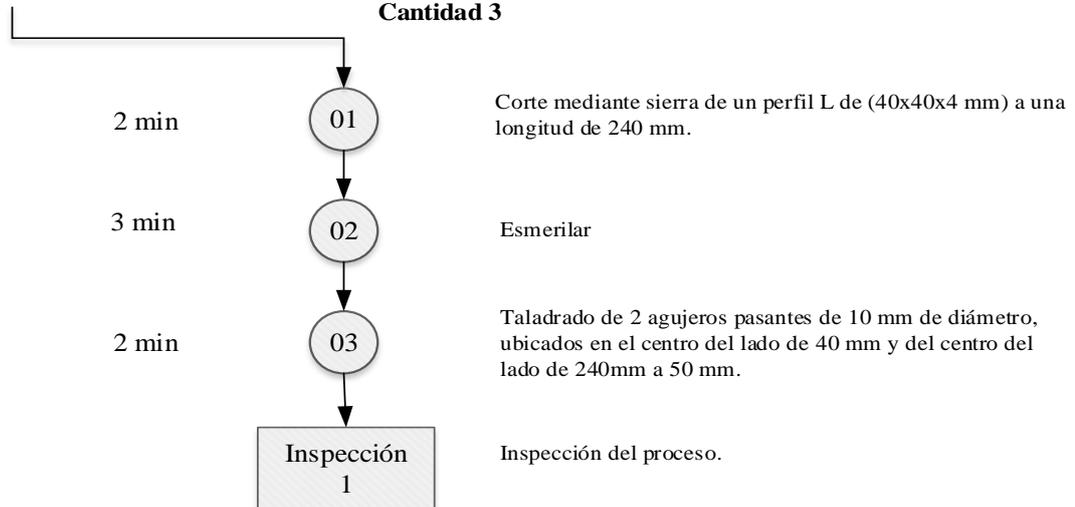
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Tubo horizontal cuadrado 2**  
**Código 2104**  
**Cantidad 2**



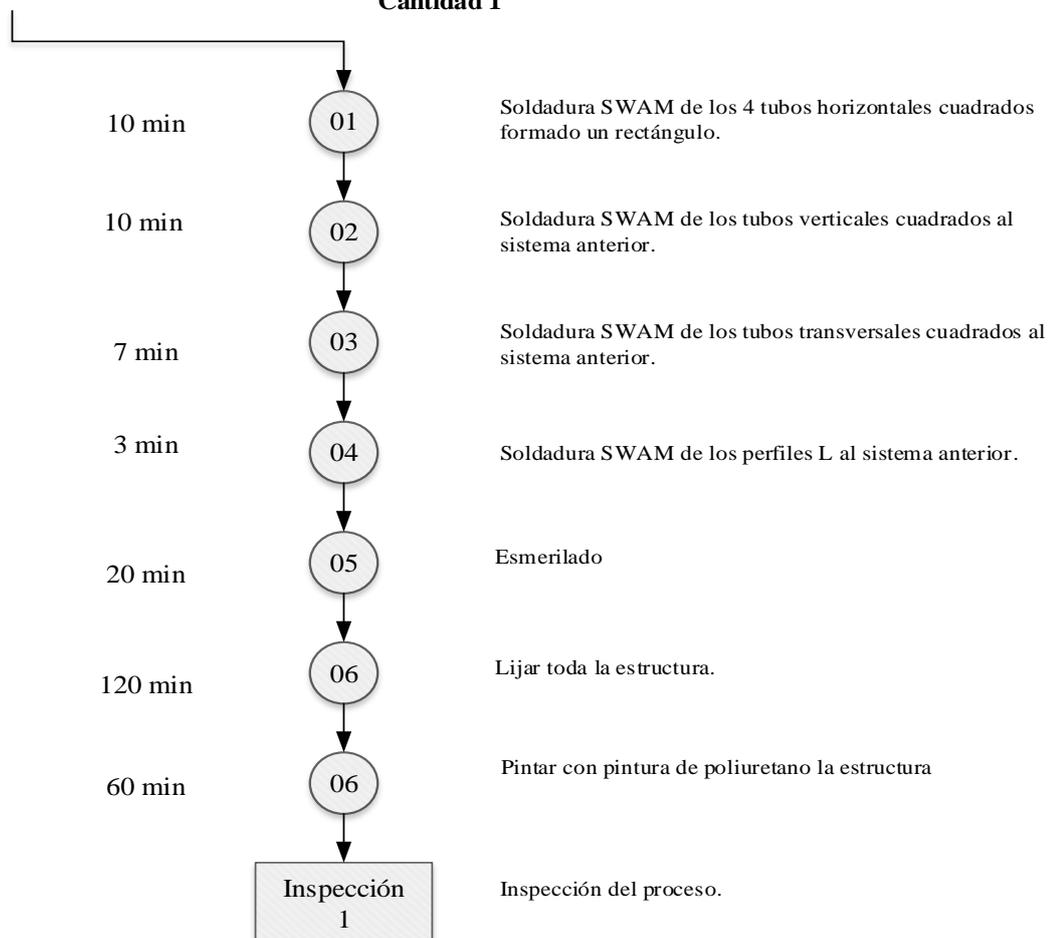
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Soporte aluminio**  
**Código 2200**  
**Cantidad 1**



**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba-Tanques**  
**Perfil L**  
**Código 2300**  
**Cantidad 3**

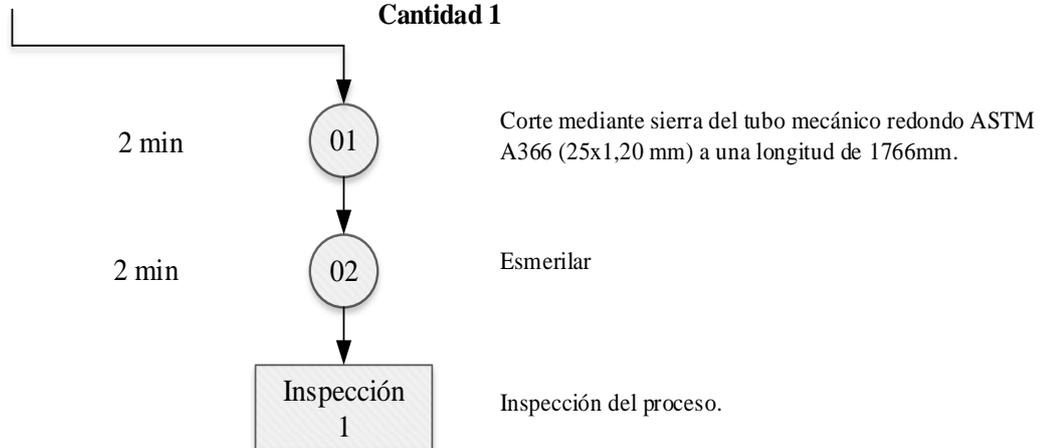


**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Mesa Bomba**  
**Código 2100**  
**Cantidad 1**

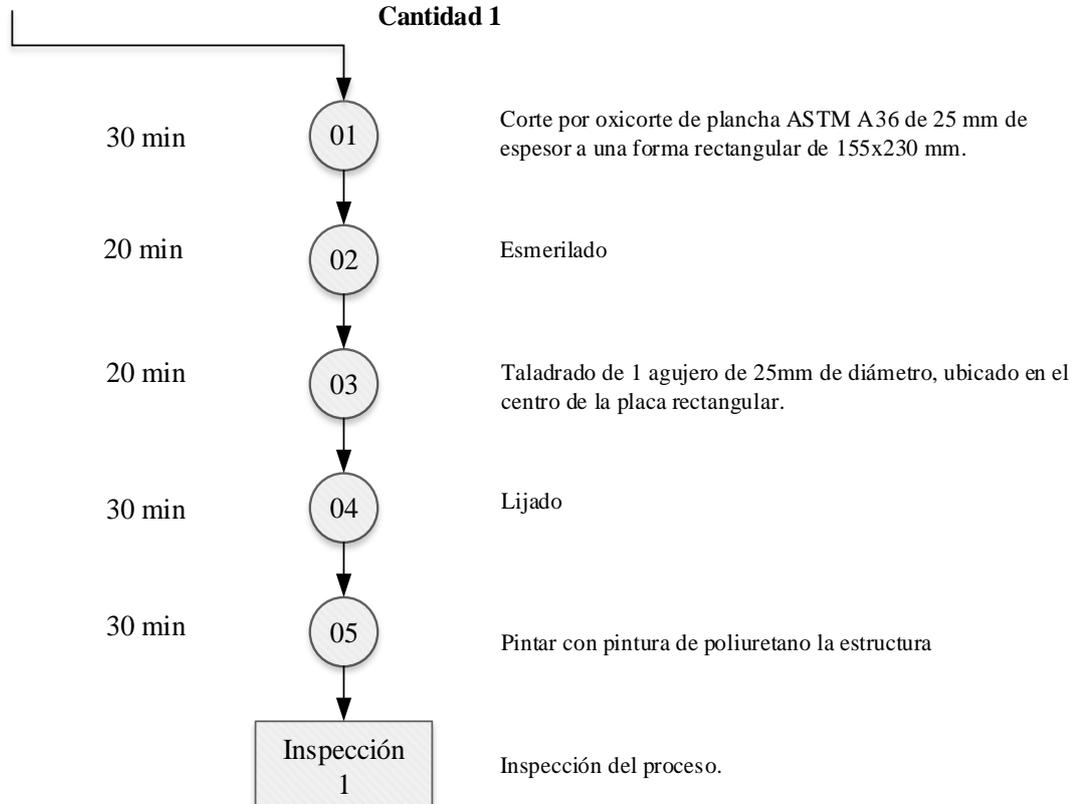


#### 4.1.1.3. Soporte láser, lente y cuadrado.

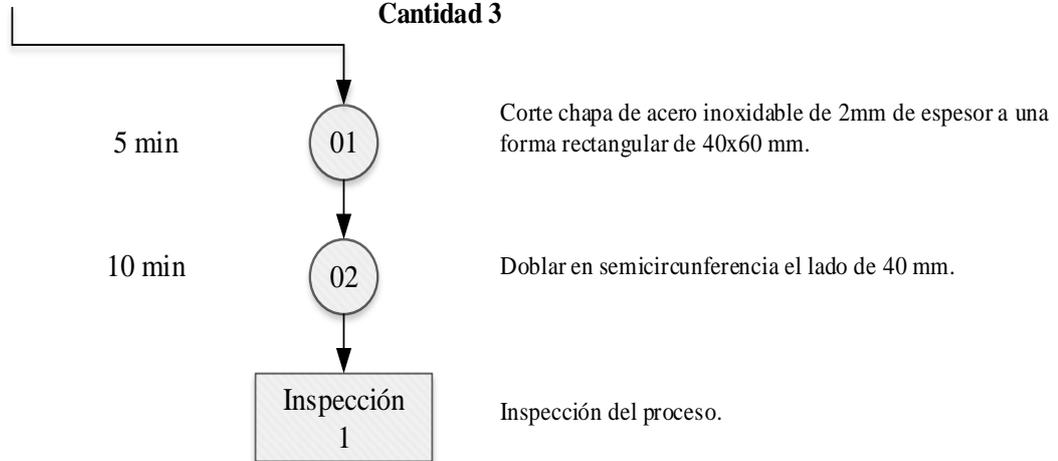
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Tubo Redondo**  
**Código 3101**  
**Cantidad 1**



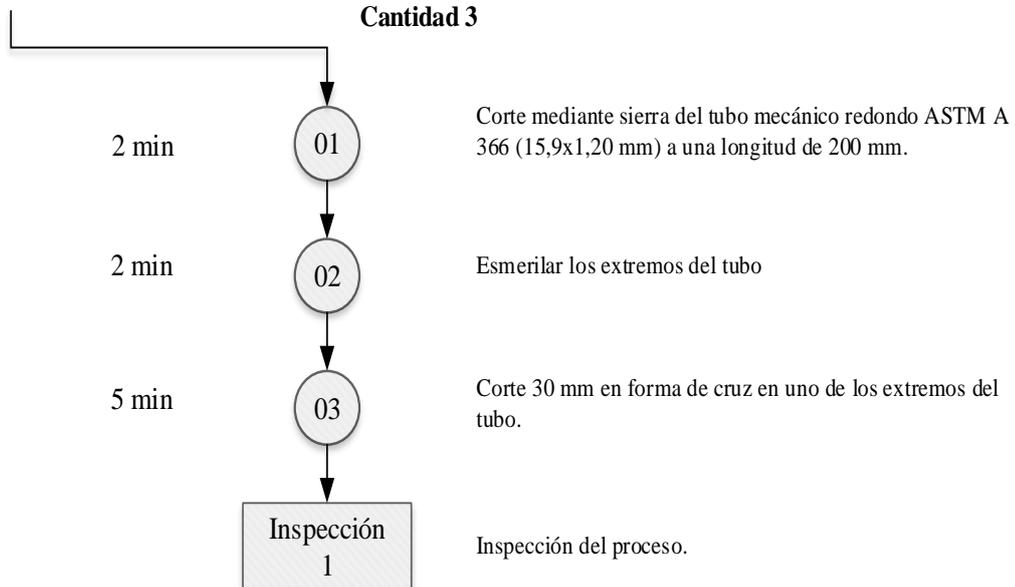
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte Láser, lente y cuadrado**  
**Placa base**  
**Código 3102**  
**Cantidad 1**



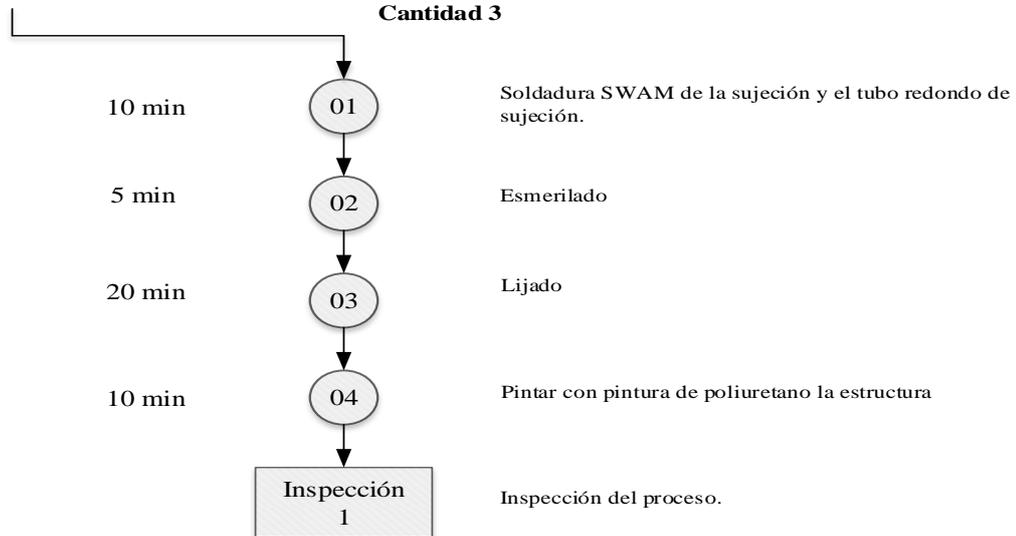
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte Láser, lente y cuadrado**  
**Sujeción**  
**Código 3201**  
**Cantidad 3**



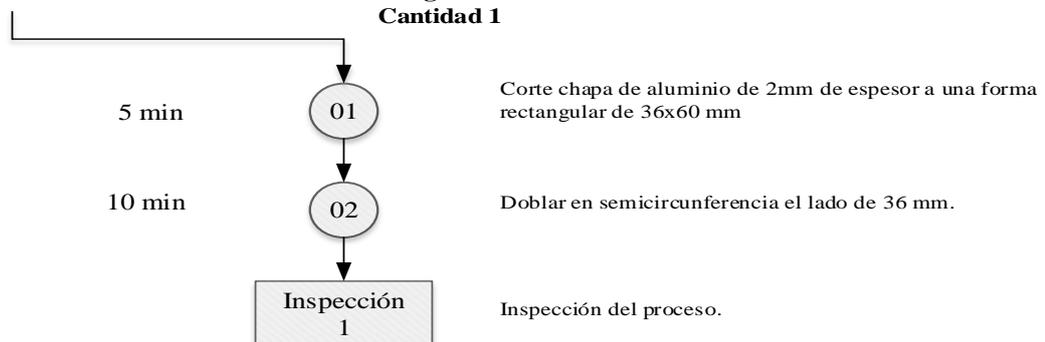
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte Láser, lente y cuadrado**  
**Tubo Redondo Sujeción**  
**Código 3202**  
**Cantidad 3**



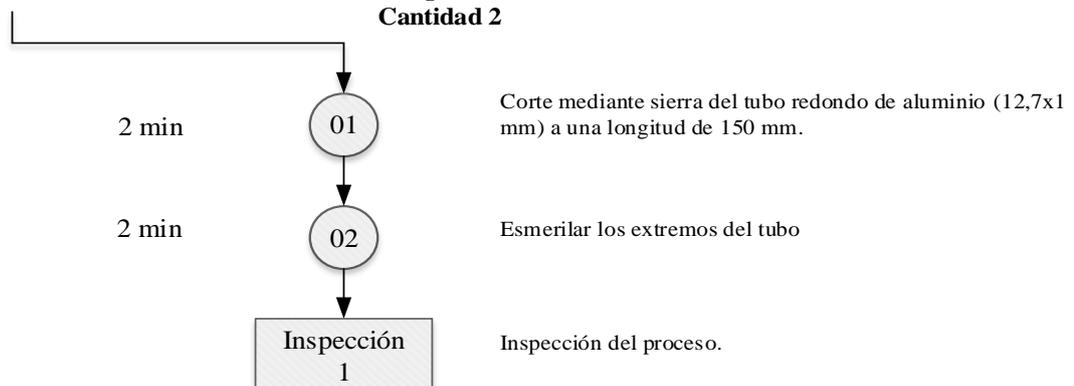
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Soporte secundario**  
**Código 3200**  
**Cantidad 3**



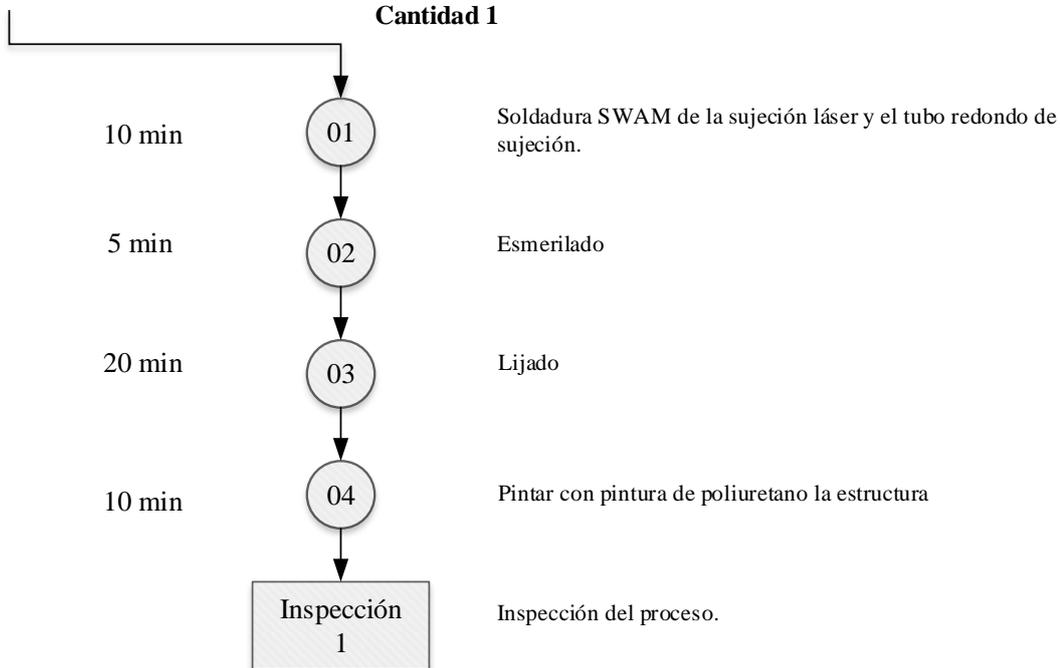
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Sujeción láser.**  
**Código 3301**  
**Cantidad 1**



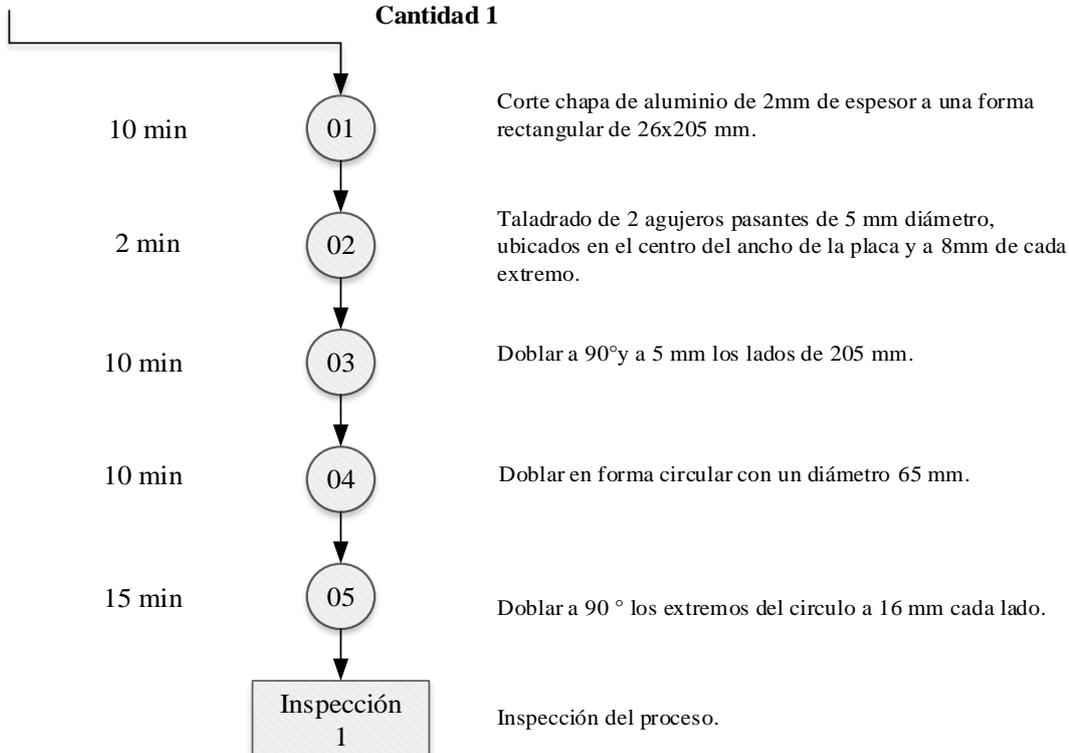
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Tubo Redondo Sujeción láser.**  
**Código 3302**  
**Cantidad 2**



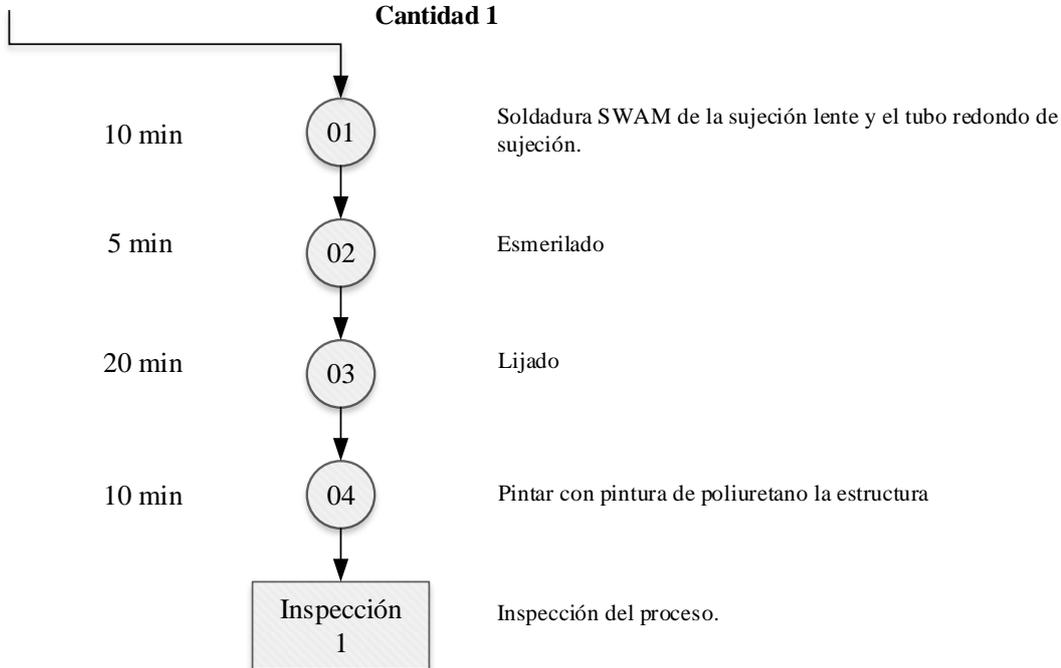
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Soporte láser.**  
**Código 3300**  
**Cantidad 1**



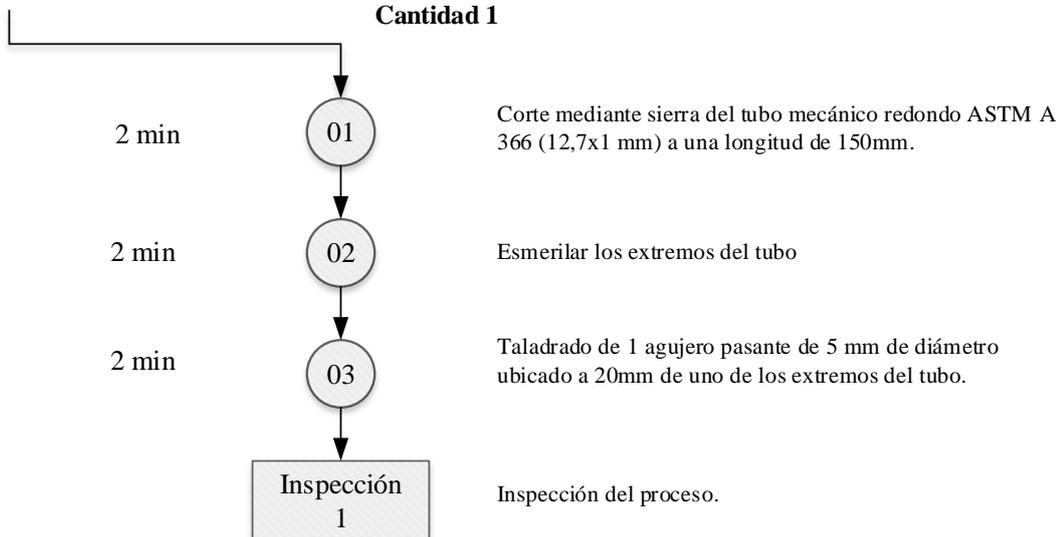
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Sujeción lente**  
**Código 3401**  
**Cantidad 1**



**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Soporte lente**  
**Código 3400**  
**Cantidad 1**



**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Soporte láser, lente y cuadrado**  
**Soporte cuadrado**  
**Código 3500**  
**Cantidad 1**



#### 4.1.1.4. Caja Circuito eléctrico.

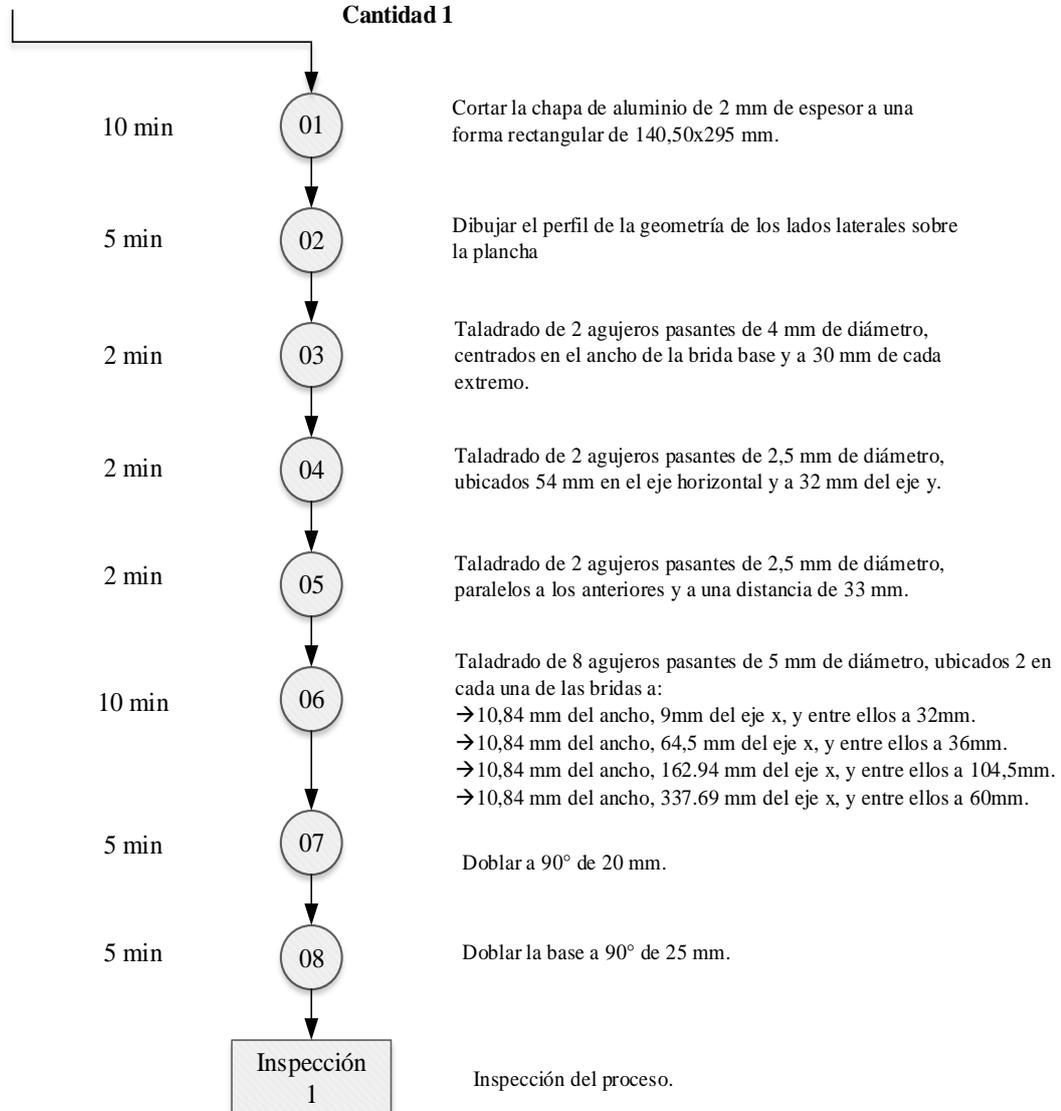
##### Diagrama de Operación de Procesos

##### Caja circuito eléctrico

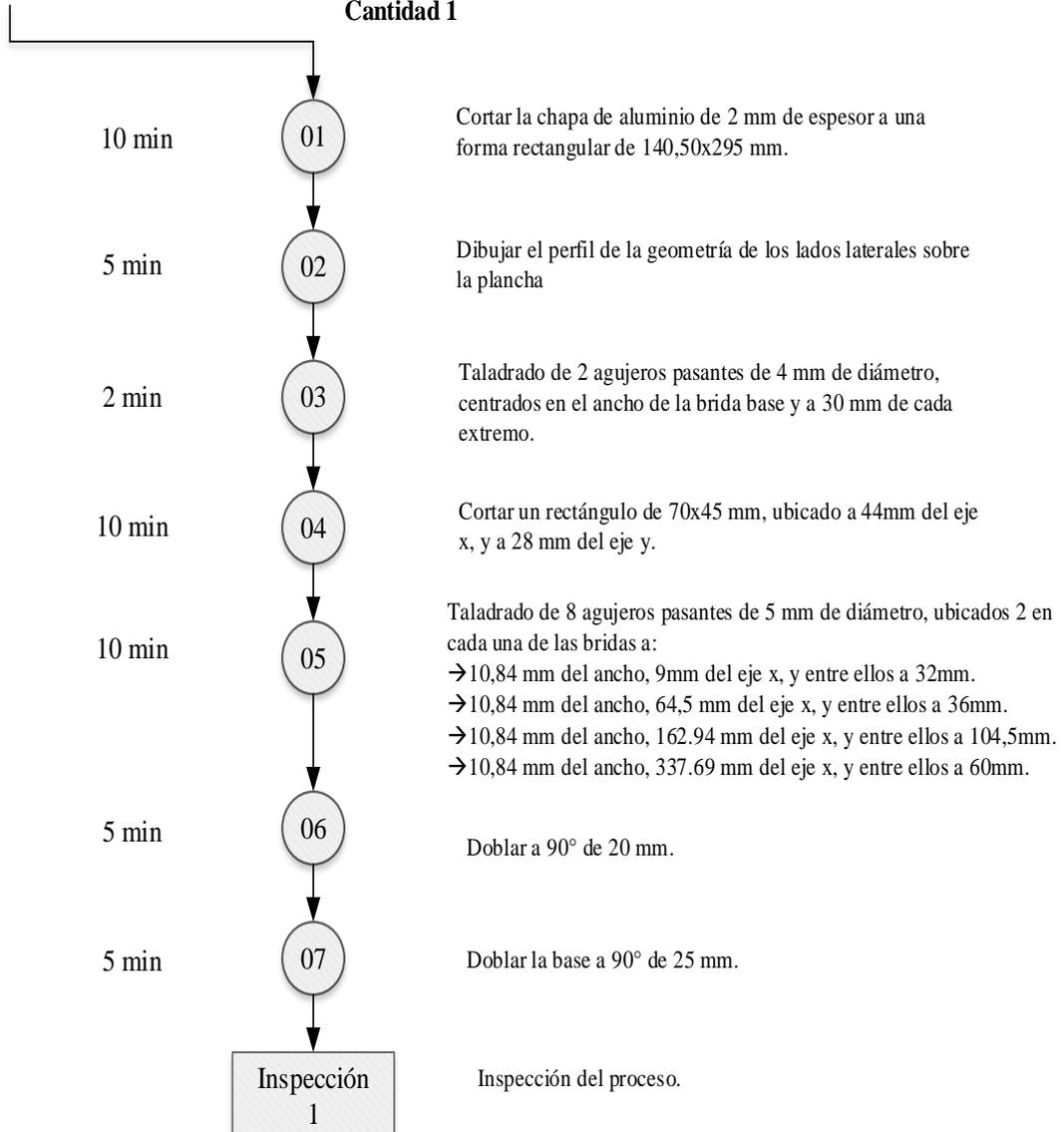
##### Chapa Lateral derecho

Código 4100

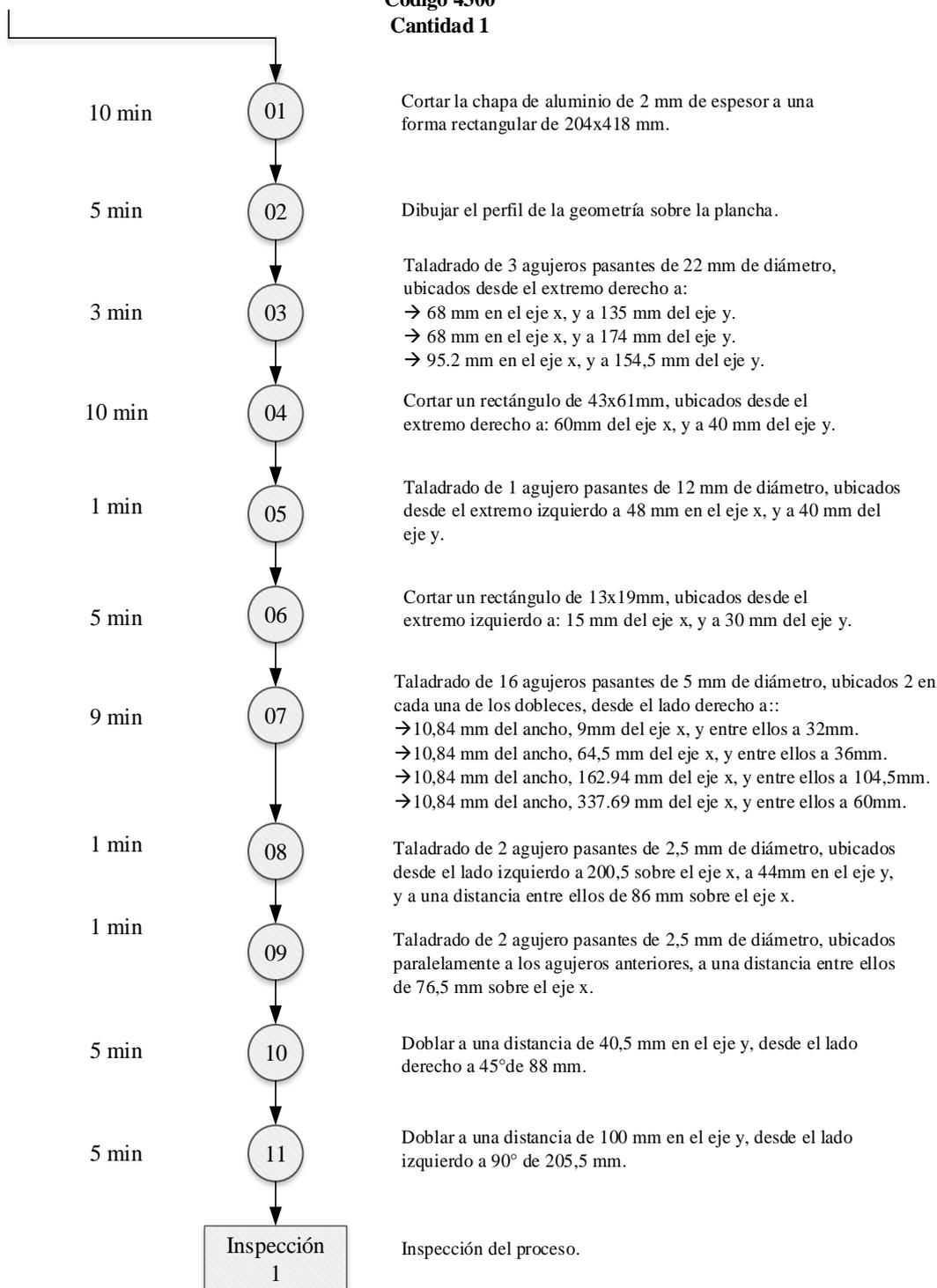
Cantidad 1



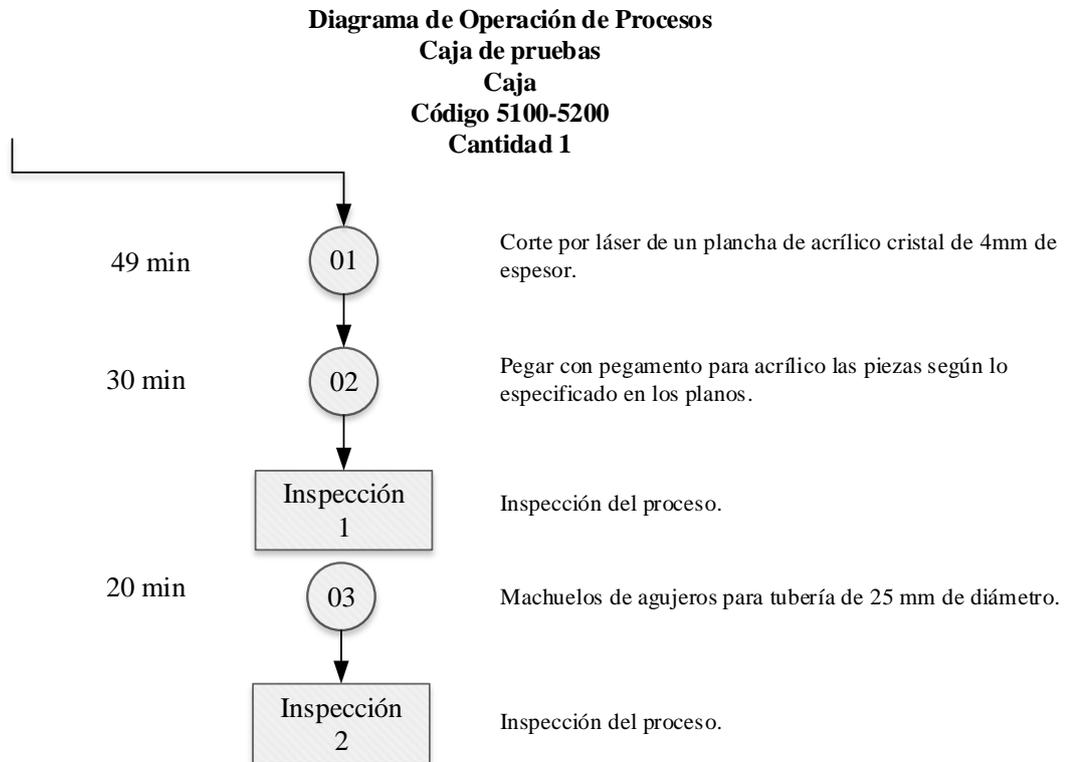
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Caja circuito eléctrico**  
**Chapa Lateral izquierdo**  
**Código 4200**  
**Cantidad 1**



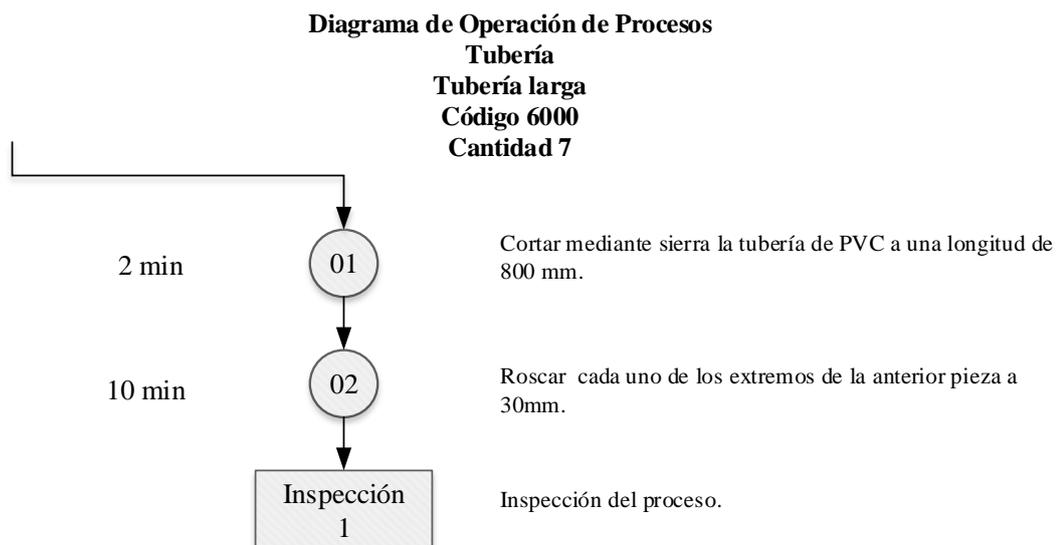
**Diagrama de Operación de Procesos**  
**Caja circuito eléctrico**  
**Chapa Superior.**  
**Código 4300**  
**Cantidad 1**



#### 4.1.1.5. Caja de Pruebas.



#### 4.1.1.6. Tubería.



#### 4.1.2. Operaciones tecnológicas.

Las operaciones tecnológicas que se llevaron a cabo en la construcción del sistema de medición de campos de velocidades son para construcción y acabado (Ver Tabla 23).

**TABLA 23**  
**Operaciones tecnológicas.**

<b>Operación Tecnológica</b>	<b>Máquinas</b>	<b>Símbolos</b>
<b>Corte</b>	Láser.	CL
	Oxicorte	CO
	Sierra de banco.	CSB
	Sierra manual.	CSM
	Tijera de metal.	CTM
<b>Taladrado</b>	Taladro manual.	TM
<b>Machuelado</b>	Machuelado manual.	MM
<b>Soldadura</b>	Soldadura eléctrica.	SE
<b>Formado</b>	Dobladora.	FD
<b>Acabado</b>	Amoladora	AA
	Lijadora manual	ALM
	Compresor	AC
<b>Roscado</b>	Terraja	RT

#### 4.1.3. Tiempos de fabricación.

Los tiempos de fabricación son aquellos que nos ayuda a ver el tiempo que se demora en realizar cada producto, esto nos ayudara para tener más claro el tiempo de fabricación de cada uno de los procesos que componen la máquina (Ver Tabla 24).

**TABLA 24**  
**Tiempos de fabricación.**

Partes	Cantidad	Proceso											Total (min)		
		CL	CO	CSB	CSM	CTM	TM	MM	SE	FD	AA	ALM		AC	RT
<b>Tubo vertical rectangular</b>	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20
<b>Tubo transversal rectangular</b>	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20
<b>Tubo horizontal rectangular</b>	4	0	0	2	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	40
<b>Soporte madera</b>	1	0	0	30	0	0	24	0	0	0	0	90	60	0	204
<b>Estructura principal</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	30	0	20	120	60	0	230
<b>Postes verticales</b>	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	10
<b>Postes verticales delanteras</b>	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	10
<b>Postes horizontales</b>	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	15
<b>Postes transversales</b>	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	10
<b>Tubo vertical cuadrado</b>	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20
<b>Tubo transversal cuadrado</b>	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	10
<b>Tubo horizontal cuadrado 1</b>	2	0	0	2	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	14
<b>Tubo horizontal cuadrado 2</b>	2	0	0	2	0	0	7	0	0	0	3	0	0	0	24
<b>Soporte aluminio</b>	1	0	0	15	0	0	24	0	0	0	0	60	30	0	129

**CONTINUA →**

<b>Perfil L</b>	3	0	0	2	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	21
<b>Estructura bomba</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	30	0	20	120	60	0	230
<b>Tubo redondo</b>	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4
<b>Placa base</b>	1	0	30	0	0	20	0	0	0	0	20	30	30	0	130
<b>Tubo redondo sujeción</b>	3	0	0	0	7	0	0	0	0	0	2	0	0	0	27
<b>Sujeción</b>	3	0	0	0	0	5	0	0	0	10	0	0	0	0	45
<b>Soporte secundario</b>	3	0	0	0	0	0	0	0	10	0	5	20	10	0	135
<b>Tubo redondo sujeción láser</b>	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	8
<b>Sujeción láser</b>	1	0	0	0	0	5	0	0	0	10	0	0	0	0	15
<b>Soporte láser</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	10	0	5	20	10	0	45
<b>Sujeción lente</b>	1	0	0	0	0	10	2	0	0	35	0	0	0	0	47
<b>Soporte lente</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	10	0	5	20	10	0	45
<b>Soporte cuadrado</b>	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	2	0	0	0	6
<b>Chapa lateral derecho</b>	1	0	0	15	0	0	16	0	0	10	0	0	0	0	41
<b>Chapa lateral izquierda</b>	1	0	0	15	0	10	12	0	0	10	0	0	0	0	47
<b>Chapa superior</b>	1	0	0	15	0	15	15	0	0	10	0	0	0	0	55
<b>Caja</b>	1	49	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	69
<b>Uniones</b>	7	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10	84
<b>Tubería larga</b>	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	10	12
<b>Total (h)</b>		0,82	0,50	2,63	0,75	1,25	2,32	0,33	1,83	1,75	2,90	9,12	4,83	1,33	<b>30,37</b>

#### 4.2. Implementación electrónica.

Para los circuitos electrónicos se hizo una caja de aluminio en donde estarán montadas las placas electrónicas, tanto las de potencia como las de control. Se ajustaron las placas electrónicas a las alzas y estas a su vez se sujetaban a la caja de control (Anexo H).

Se utilizó fusibles para la protección sobre corrientes y se colocó un switch para el encendido del equipo, la conexión eléctrica se muestra en el plano eléctrico. Se dejó un tomacorriente para la alimentación de la cámara el cual también se protegió contra sobre corrientes. Se conectó y ubico todos los elementos eléctricos / electrónicos y se sujetó los cables (Anexo H).



Figura 39 Conexión eléctrica / electrónica.

### **4.3. Software.**

#### ***4.3.1. Total Video Converter.***

Software que nos permite convertir cualquier tipo de video (Ver Figura 42), se utiliza comúnmente para convertir formatos de videos más de moda para diversos reproductores, así también presentaciones de diapositivas, entre los formatos que puede convertir encontramos:

##### ***Formatos de Pocket Player:***

Formatos que permiten la reproducción en los videos en dispositivos como IPod, iPhone, Apple Tv, Xbox 360, PSP, Play Station 3, celulares entre otros.

##### ***Formatos Convert y Burn.***

Formatos que permite ser leídos por DVD, VCD, Audio CD.

##### ***Formatos Web.***

Formatos que permiten ser utilizados en páginas Web, entre los formatos tenemos a los GIF, SWF, FLV.

##### ***Formatos de Video.***

Transforma al formato de video deseado, entre los formatos que puede convertir tenemos formatos, 3GP, AVI, MP4, MPEG, WMV, JPEG Imágenes, MOV, entre otros.

##### ***Formatos de Audio.***

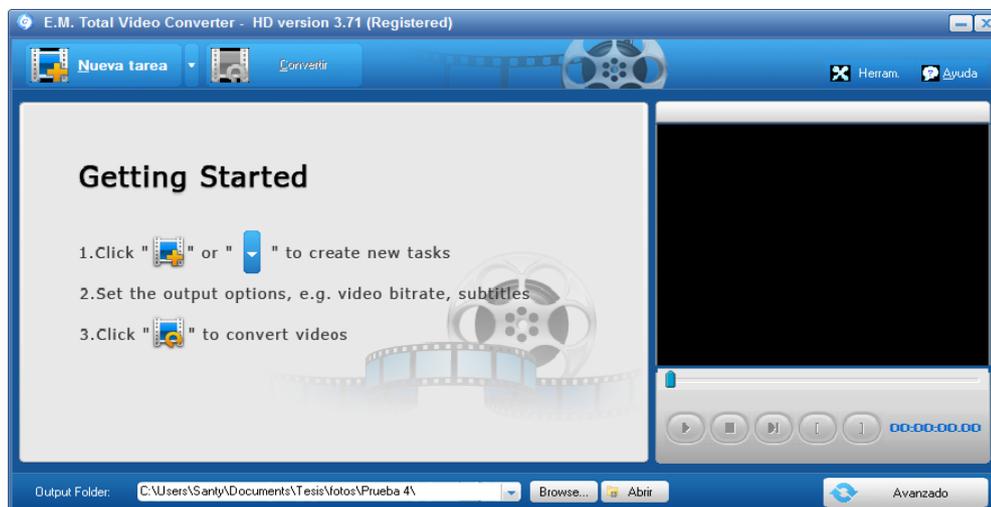
Transforma a formatos de audio, entre los más comunes tenemos a formatos MP3, AAC, AC3, WAV, WMA, entre otros.

##### ***Formatos de video HD.***

Transforma a formatos de videos con calidad HD, entre los formatos tenemos a WMV-HD, FLV-HD, MOV-HD, entre otros.

Otras actividades que se pueden utilizar el programa son:

- Importar ficheros multimedia.
- Descargar video flash.
- Editor de video.
- Convertir de fotos a video.
- Realizar un video de la captura de la pantalla.
- Copiar discos de CD de audio
- Etc.

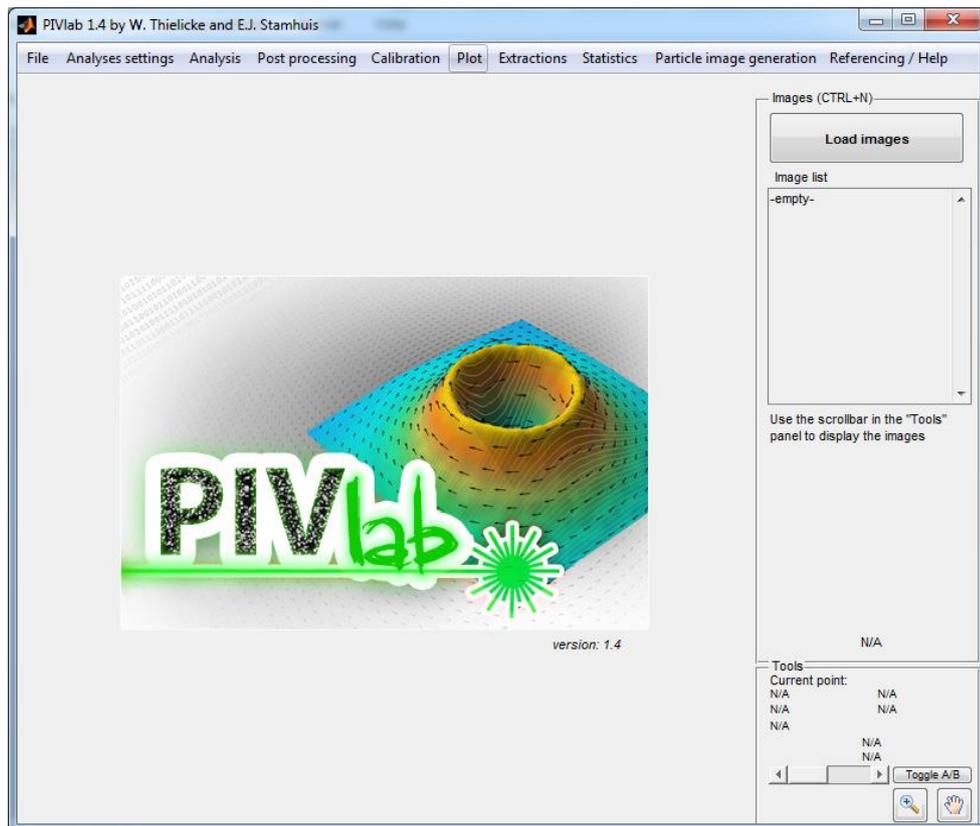


**Figura 40 Conexión eléctrica / electrónica**

#### **4.3.2. PIVlab.**

Es un software de código abierto utilizado para el PIV, el cual no solo nos ayuda a calcular la distribución de velocidad en un par de imágenes, también puede ser utilizado, para derivación, visualización y exportación de varios parámetros del flujo patrón.

Tiene una interfaz gráfica (Ver Figura 41) de fácil uso, para que el usuario no tenga ningún problema al momento de su uso, y así poder realizar análisis PIV, datos de post-procesamiento rápido y eficiente.



**Figura 41 Entorno del software PIVlab.**

El programa consta con un menú:

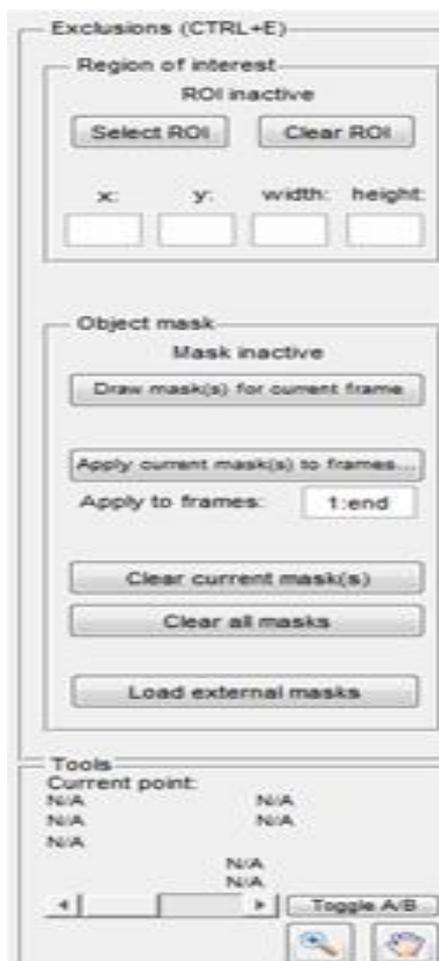
**File.-** En este menú, se puede encontrar sub-menús, el cual nos permiten crear una nueva sesión de estudio, cargar una sesión de estudio previamente guardada, guardar cambios realizados en una sesión de estudio y salir del programa.

**Analyses Settings.-** Es un menú opcional en donde podemos realizar configuración de pre-procesamiento para configurar las imágenes, podemos encontrar los siguientes sub-menús:

- **Exclusions (ROI, Mask).-** Este sub menú ayuda a excluir secciones de la imagen donde que se encuentren dañadas, para evitar que estas áreas no afecte en el procesamiento de la imagen. Consta de 7 botones (Ver Tabla 16 y Figura 44):

**TABLA 25**  
**Especificaciones del Sub-menú Exclusions.**

NOMBRE DEL BOTÓN	FUNCIÓN
Select ROI	Selecciona la región de interés
Clear ROI	Borra la región de interés realizada previamente
Draw mask(s) for current frame	Permite dibujar la sección que vamos a excluir del análisis
Apply current mask(s) to frame	Aplica la sección dibujada en una o todas las imágenes
Clear current mask(s)	Borra la máscara de una imagen
Clear all masks	Borra la máscara de todas las imágenes
Toggle AB	Cambia de imagen

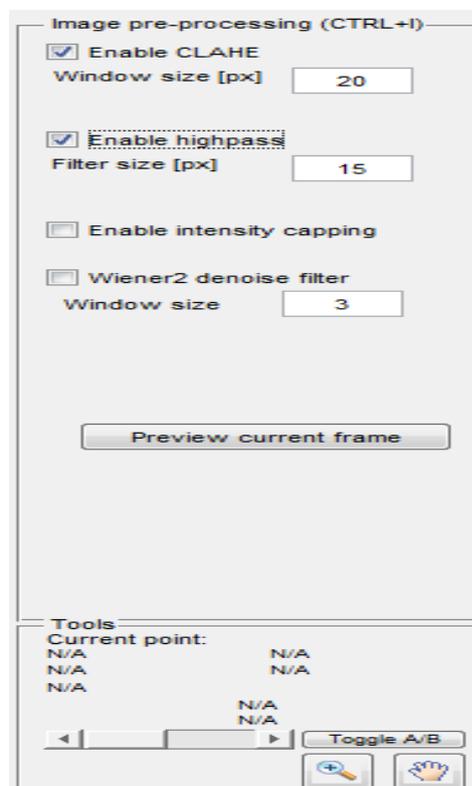


**Figura 42** Sub-menú Exclusions.

- **Image pre-processing.-** Este submenú ayuda a mejorar significativamente la calidad de la imagen para las imágenes de pre-procesamiento técnico, consta de 4 opciones y un botón (Ver Tabla 26 y Figura 43).

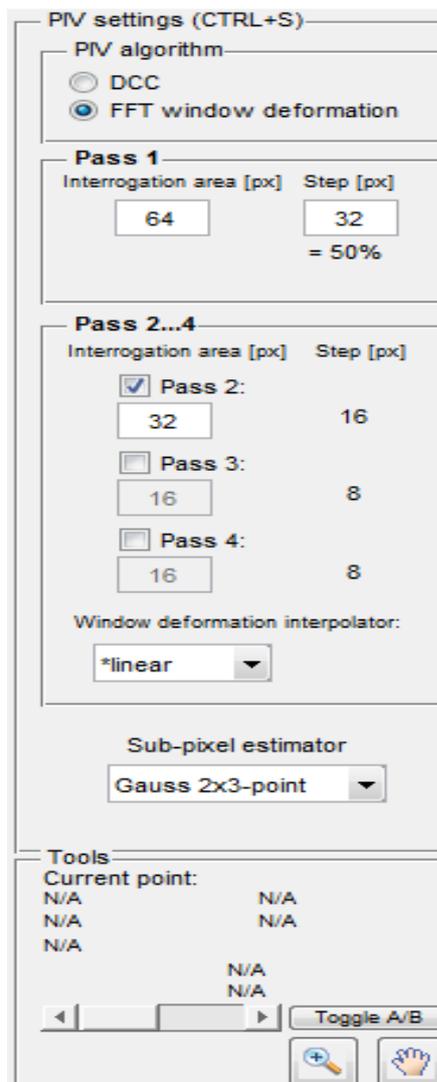
**TABLA 26**  
**Especificaciones del Sub-menú Image pre-processing.**

OPCIONES	FUNCIÓN
<b>Enable CLAHE</b>	Mejora localmente el contraste de las imágenes
<b>Enable highpass</b>	Filtrado de paso alto ajusta la imagen y elimina la señal de fondo
<b>Enable intensity capping</b>	Reduce el impacto de partículas muy brillantes
<b>Wiener2 denoise filter</b>	Filtro adaptativo para eliminación del ruido
<b>Preview current frame</b>	Realiza los cambios efectuados en las opciones anteriores



**Figura 43 Sub-menú Image pre-processing.**

- **PIV Settings.-** Configura la correlación cruzada de los datos de la imagen, PIVlab cuenta con 2 diferentes algoritmos de correlación, el DCC (Correlación cruzada de un solo paso directo) y FFT (Transformada de Fourier con correlación directa en múltiples pasos y ventanas deformantes) (Ver Figura 44).



**Figura 44 Sub-menú PIV setting.**

**Analysis.-** Permite analizar las fotografías, en cada pasada se puede observar como la resolución vectorial aumenta con cada pasada, en este sub-menú se encuentra 4 botones (Ver Tabla 27 y Figura 45).

**TABLA 27**  
**Especificaciones del Sub-menú Analysis.**

OPCIÓN	FUNCIÓN
<b>Analyze current frame</b>	Analiza la fotografía actual.
<b>Analyze all frame</b>	Analiza todas las fotografías cargadas.
<b>Cancel</b>	Detiene el proceso de análisis que se encuentre realizando.
<b>Clear all results</b>	Borra los resultados obtenidos de un análisis.

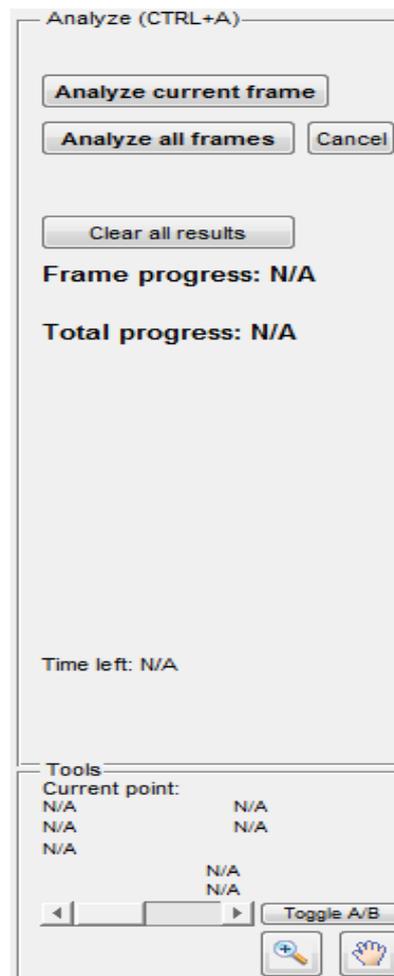


Figura 45 Sub-menu Analysis.

**Post- Processing.** - Nos permite corregir los vectores erróneos que se tiene debido a zonas mal iluminadas en la imagen o su vez debido a la fuerza del flujo de da hacia afuera del plano. Costa de 6 botones y 4 opciones (Ver Tabla 28 y Figura 46).

**TABLA 28**  
**Especificaciones del Sub-menú Post-processing.**

OPCIÓN	FUNCIÓN
<b>Select velocity limits</b>	Selecciona los límites de velocidad para el filtro.
<b>Display all frames in scatterplot</b>	Muestra todos los fotogramas en el diagrama de dispersión.
<b>Clear limits</b>	Elimina límites puestos anteriormente.
<b>Stdev filter</b>	Filtros de desviación de velocidad estándar.
<b>Local median filter</b>	Filtro de mediana local.
<b>Manually reject vector</b>	Permite seleccionar los vectores manualmente.
<b>Interpolate missing data</b>	Permite interpolar los vectores que se eliminaron.
<b>Apply to current frame</b>	Aplica los cambios para la imagen actual.
<b>Apply to all frame</b>	Aplica los cambios para todas las imágenes.
<b>Undo all validations (all frames)</b>	Elimina todos los filtros de velocidad.

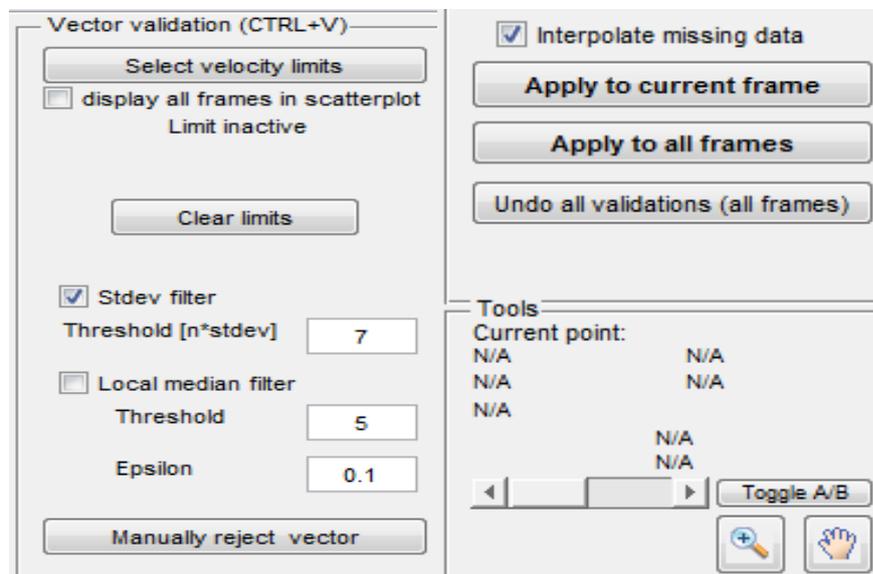


Figura 46 Sub-menu Post Processing.

**Calibration.-** Permite calibrar cuantos pixeles son un metro y el intervalo de tiempo entre las imágenes de un fotograma, con medidas reales, es recomendado realizar la calibración antes del Post-processing. Costa de 4 botones y 2 ingresos de datos (Ver Tabla 29 y Figura 47).

**TABLA 29**  
**Especificaciones del Sub-menú Calibration.**

OPCIÓN	FUNCIÓN
<b>Load calibration image</b>	Permite cargar la calibración de una imagen que se tiene.
<b>Select reference distance</b>	Permite seleccionar 2 puntos en los cuales se sabe la distancia real entre esos puntos.
<b>Real distance (mm)</b>	Se coloca la distancia real que existe en la distancia de los puntos seleccionados en mm.
<b>Time step (ms)</b>	Se coloca el tiempo real entre imágenes del fotograma.
<b>Clear calibration</b>	Elimina una calibración realizada.
<b>Apply calibration</b>	Aplica en las imágenes la calibración realizada.

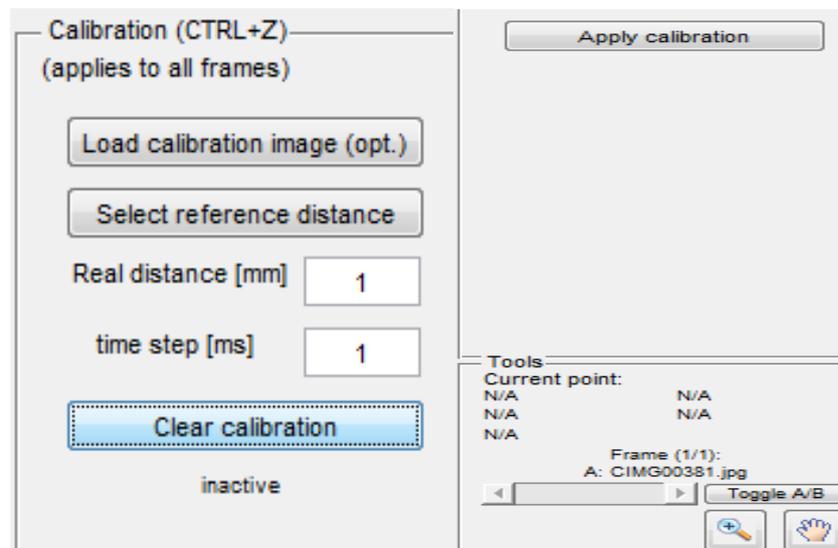


Figura 47 Sub-menu calibration.

**Plot.-** Permite realizar gráficas y tener medidas de la velocidad media de los flujos. Existen varias opciones en este sub-menú pero las que se utilizan son las siguientes:

- **Derive parameters /modify data.-** Permite mostrar la vorticidad del flujo, Costa de 5 botones y 3 opciones (Ver Tabla 21 y Figura 50).

**TABLA 30**  
**Especificaciones del Sub-menú Derive Parameters.**

OPCIÓN	FUNCIÓN
<b>Display parameters</b>	Permite seleccionar el tipo de parámetro
<b>Mean u</b>	Calcula el promedio de la velocidad u
<b>Mean v</b>	Calcula el promedio de la velocidad v
<b>Autoscale map</b>	Coloca automáticamente el mapa de colores de un min a un max de los datos.
<b>Highpass vector field</b>	Activar un filtro de paso alto para el campo vectorial. Útil para visualizar el vórtice con diferentes velocidades de traslación. Solo se visualiza si el vector es modificado.
<b>Apply to current frame</b>	Aplica los cambios para la imagen actual.
<b>Apply to all frame</b>	Aplica los cambios para todas las imágenes.
<b>Calculate mean vectors</b>	Calcula el caudal promedio.

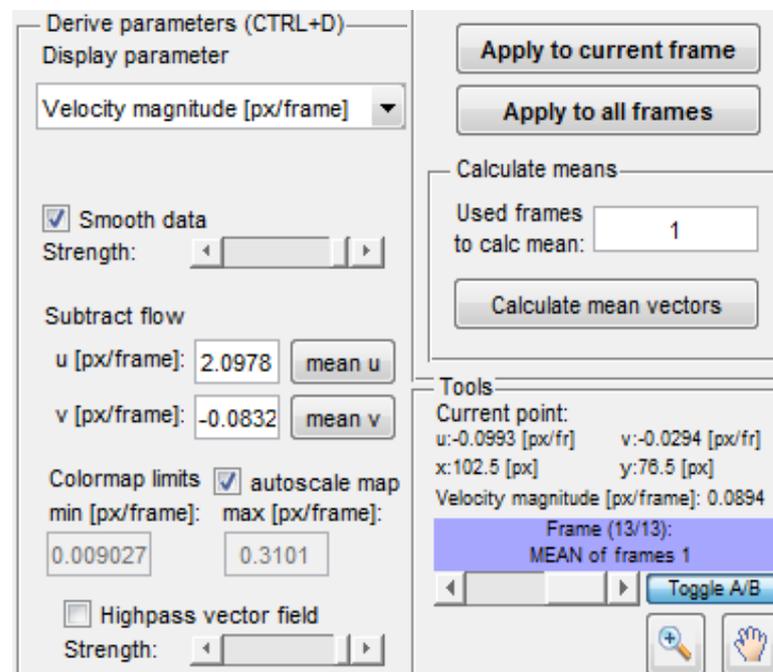


Figura 48 Sub-menu derive parameters.

- ***Modify plot appearance.***- Permite modificar la escala de los vectores, también puede ser ajustado de modo automático y cambiar los colores de los vectores.

***Extraction.***- Permite obtener gráficos entre la velocidad vs. La distancia en líneas o áreas.

- ***Parameters from poly-line.***- Permite obtener una gráfica de la velocidad vs distancia de una línea dibujada previamente
- ***Parameters from área.***- Permite obtener los datos de una velocidad promedio en una área seleccionada que se maneja a un mismo nivel.

#### 4.4. Montaje.

El montaje constituye la asociación de los tiempos totales del montaje de la parte mecánica y Electrónico/Eléctrico.

**TABLA 31**  
**Tiempos de Ensamblaje Mecánico.**

<b>Sistema</b>	<b>Mecánico [min]</b>	<b>Total [h]</b>
<b>Mesa Principal y Estructura de madera</b>	60	1
<b>Mesa Bomba-Tanques</b>	65	1,08
<b>SopORTE Láser, lente y cuadrado</b>	20	0,33
<b>Caja Circuito eléctrico</b>	30	0,50
<b>Caja de Pruebas</b>	180	3
<b>Tubería</b>	240	4
<b>Total [min]</b>	595	9,92

**TABLA 32**  
**Tiempos de Ensamblaje Eléctrico/Electrónico.**

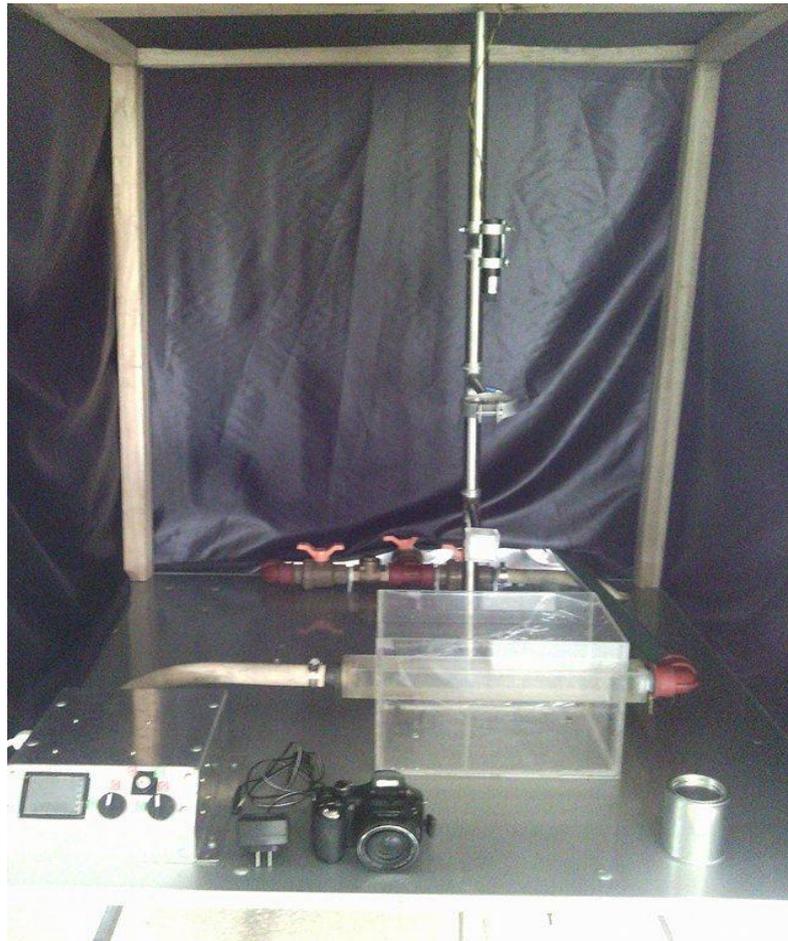
<b>Sistema</b>	<b>Mecánico</b>	<b>Total [h]</b>
	<b>[min]</b>	
<b>Gabinete eléctrico</b>	180	3
<b>Circuito eléctrico</b>	Placa	8
	Electrónica	
	Montaje	1
	Cableado	2
<b>Total [h]</b>		<b>14</b>

**TABLA 33**  
**Tiempo total de ensamblaje.**

<b>Sistema</b>	<b>Total [h]</b>
<b>Ensamblaje Mecánico</b>	9,92
<b>Ensamblaje Eléctrico/Electrónico</b>	14
<b>Total [h]</b>	<b>23,92</b>

El tiempo de ensamblaje mecánico es de 9,92 [h] (Ver Tabla 31), mientras que el tiempo en ensamblar la parte eléctrica/electrónica es de 14 [h] (Ver Tabla 32), donde el tiempo total de ensamblaje es de 23,92 [h] (Ver Tabla 33).

Después de realizar los diagramas de procesos de cada una de las piezas, se procede a ensamblar el equipo de pruebas (Ver Figura 49), este equipo está cubierto por un manto negro; este manto nos ayuda a que el lugar donde serán tomadas las fotografías se encuentre oscuro, para no tener problemas a contra luz con las imágenes tomadas. Así luego del tiempo de ensamblaje total podemos obtener el equipo de pruebas para tomar las imágenes que serán procesadas en el software libre PIVlab y calcular el campo de velocidades mediante la técnica del PIV.



**Figura 49 Equipo de medición.**

#### **4.5. Manual de Usuario.**

El Manual de Usuario nos muestra los principales aspectos del sistema como: especificaciones, conexiones, seguridad, además de detallar las funciones necesarias del programa PIVlab, que permitirán trabajar de una manera adecuada con el sistema. El documento se detalla en el ANEXO I.

## CAPITULO 5

### PRUEBAS Y RESULTADOS.

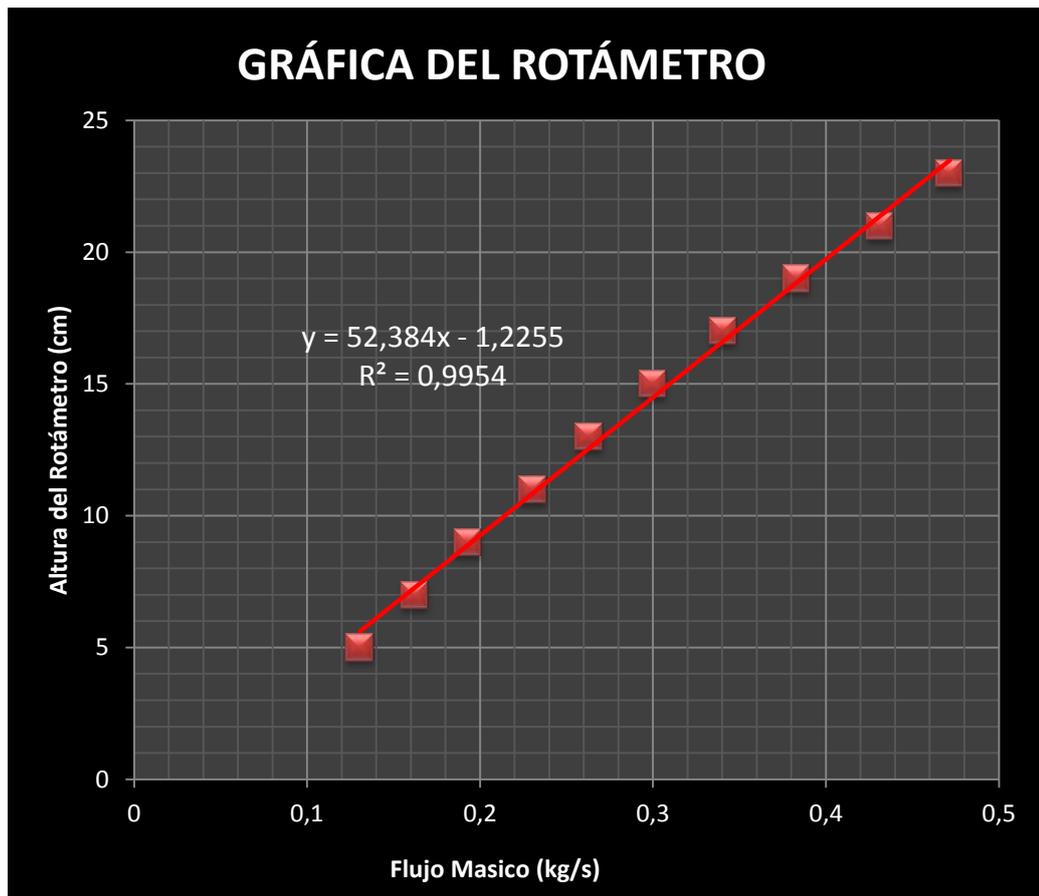
#### 5.1. Calculo de la velocidad experimental mediante un rotámetro.

Para verificar la efectividad de esta técnica de medición de campos de velocidad en fluidos, se procede a realizar pruebas y calcular la velocidad promedio en diferentes caudales, con la ayuda de un instrumento de medición llamado rotámetro (Figura 50), con este podremos tener el caudal que circula por la tubería, este elemento será colocado a la salida del flujo y se procederá a tomar las mediciones de la altura del rotámetro.



Figura 50 Equipo de medición (Rotámetro)

Para poder obtener el caudal mediante el rotámetro, se procedió a obtener la gráfica del instrumento para poder obtener la ecuación que rige al instrumento de medición (Figura 51), esto se pudo obtener mediante los equipos del laboratorio de fluidos de la universidad, se obtuvo la gráfica con una relación  $R^2 = 0,9954$ .



**Figura 51 Gráfica del Rotámetro**

$$Y = 52,384X - 1,2255 \quad (5.1)$$

La ecuación 5.1,  $X$  representa el flujo másico y  $Y$  a la altura del rotámetro ( $y$ ), esta nos ayudara a calcular el flujo másico que utilizaremos para el cálculo del caudal del flujo en la tubería.



**Figura 52 Temperatura del laboratorio**

### ***5.1.1 Rotámetro en 10cm.***

De la ecuación 5.1 calculamos X (flujo másico), teniendo en el rotámetro una altura de 10cm (Figura 53).

$$X = \frac{Y - 1,2255}{52,384}$$

$$X = \frac{10 - 1,2255}{52,384}$$

$$X = 0,214 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$



**Figura 53 Rotámetro a 10cm**

Las pruebas se realizó en el laboratorio con una temperatura de 22°C (Figura 52), en el Anexo A, se observa que el agua a esa temperatura tiene una densidad de 997,7 [Kg/m<sup>3</sup>], con estos datos si se divide la densidad del agua, del flujo másico se obtiene el caudal en m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{X}{\delta}$$

$$Q = \frac{0,214 \left[ \frac{Kg/s}{Kg/m^3} \right]}{997,7 \left[ \frac{Kg/m^3}{Kg/m^3} \right]}$$

$$Q = 0,0002148 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Con el caudal del sistema calculamos la velocidad promedio del fluido que atraviesa la caja de pruebas cuya área mojada es de 0,0016 [m<sup>2</sup>].

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0,0002148 \left[ \frac{m^3/s}{m^2} \right]}{0,0016 \left[ \frac{m^2}{m^2} \right]}$$

$$V = 0,13 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### 5.1.2 Rotámetro en 15cm

De la ecuación 5.1 calculamos X (flujo másico), teniendo en el rotámetro una altura de 15cm (Figura 54).

$$X = \frac{Y - 1,2255}{52,384}$$

$$X = \frac{15 - 1,2255}{52,384}$$

$$X = 0,309 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$



**Figura 54 Rotámetro a 15cm**

Las pruebas se realizó en el laboratorio con una temperatura de 22°C (Figura 52), en el Anexo A, se observa que el agua a esa temperatura tiene una densidad de 997,7 [Kg/m<sup>3</sup>], con estos datos si se divide la densidad del agua, del flujo másico se obtiene el caudal en m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{X}{\delta}$$

$$Q = \frac{0,309 \left[ \frac{Kg/s} \right]}{997,7 \left[ \frac{Kg/m^3} \right]}$$

$$Q = 0,0003104 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Con el caudal del sistema calculamos la velocidad promedio del fluido que atraviesa la caja de pruebas cuya área mojada es de 0,0016 [m<sup>2</sup>].

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0,0003104 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,0016 \left[ m^2 \right]}$$

$$V = 0,19 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### 5.1.3 Rotámetro en 20cm

De la ecuación 5.1 calculamos X (flujo másico), teniendo en el rotámetro una altura de 20cm (Figura 55).

$$X = \frac{Y - 1,2255}{52,384}$$

$$X = \frac{20 - 1,2255}{52,384}$$

$$X = 0,405 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$



**Figura 55 Rotámetro a 20cm**

Las pruebas se realizó en el laboratorio con una temperatura de 22°C (Figura 52), en el Anexo A, se observa que el agua a esa temperatura tiene una densidad de 997,7 [Kg/m<sup>3</sup>], con estos datos si se divide la densidad del agua, del flujo másico se obtiene el caudal en m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{X}{\delta}$$

$$Q = \frac{0,405 \left[ \frac{Kg}{s} \right]}{997,7 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]}$$

$$Q = 0,0004061 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Con el caudal del sistema calculamos la velocidad promedio del fluido que atraviesa la caja de pruebas cuya área mojada es de 0,0016 [m<sup>2</sup>].

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0,0004061 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,0016 \left[ m^2 \right]}$$

$$V = 0,25 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

#### **5.1.4 Rotámetro en 25cm**

De la ecuación 5.1 calculamos X (flujo másico), teniendo en el rotámetro una altura de 20cm (Figura 56).

$$X = \frac{Y - 1,2255}{52,384}$$

$$X = \frac{25 - 1,2255}{52,384}$$

$$X = 0,500 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$



**Figura 56 Rotámetro a 25cm**

Las pruebas se realizó en el laboratorio con una temperatura de 22°C (Figura 52), en el Anexo A, se observa que el agua a esa temperatura tiene una densidad de 997,7 [Kg/m<sup>3</sup>], con estos datos si se divide la densidad del agua, del flujo másico se obtiene el caudal en m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{X}{\delta}$$

$$Q = \frac{0,500}{997,7} \left[ \frac{Kg/s}{Kg/m^3} \right]$$

$$Q = 0,0005018 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Con el caudal del sistema calculamos la velocidad promedio del fluido que atraviesa la caja de pruebas cuya área mojada es de 0,0016 [m<sup>2</sup>].

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0,0005018}{0,0016} \left[ \frac{m^3/s}{m^2} \right]$$

$$V = 0,31 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

## 5.2. Calculo de la velocidad del fluido mediante la técnica PIV.

Se procede a realizar las pruebas en el equipo de medición construido con los 4 caudales diferentes en los que se realizó la medición del caudal en el literal anterior.

### 5.2.1 Rotámetro en 10cm.

Utilizando el equipo de medición se captura el video y siguiendo los pasos como se indica en el manual de usuario (Anexo I), se obtiene las velocidades y las gráficas del campo de velocidades del fluido el cual se observe un flujo turbulento que circula en la caja de pruebas y mediante el menú extractions se obtiene la gráfica distancia vs la velocidad.

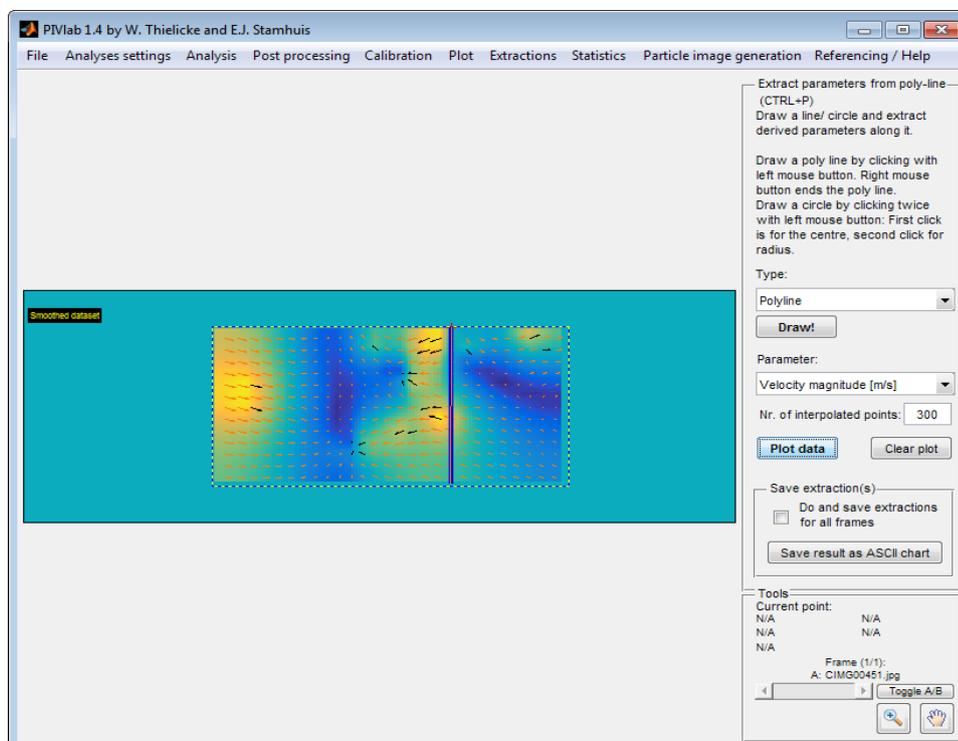
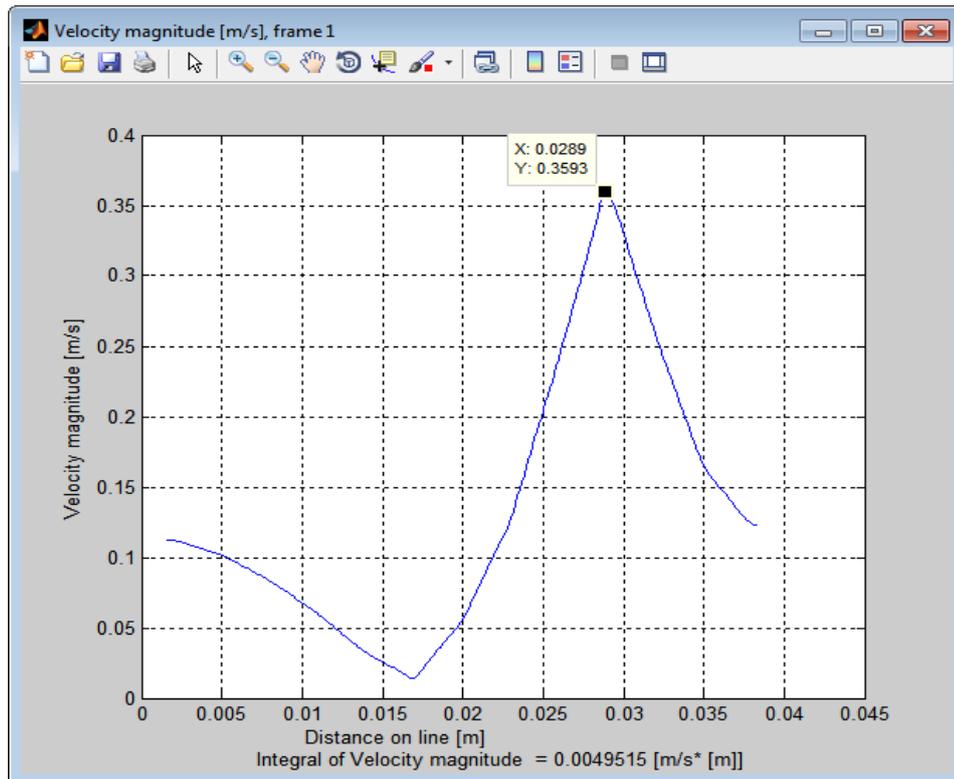


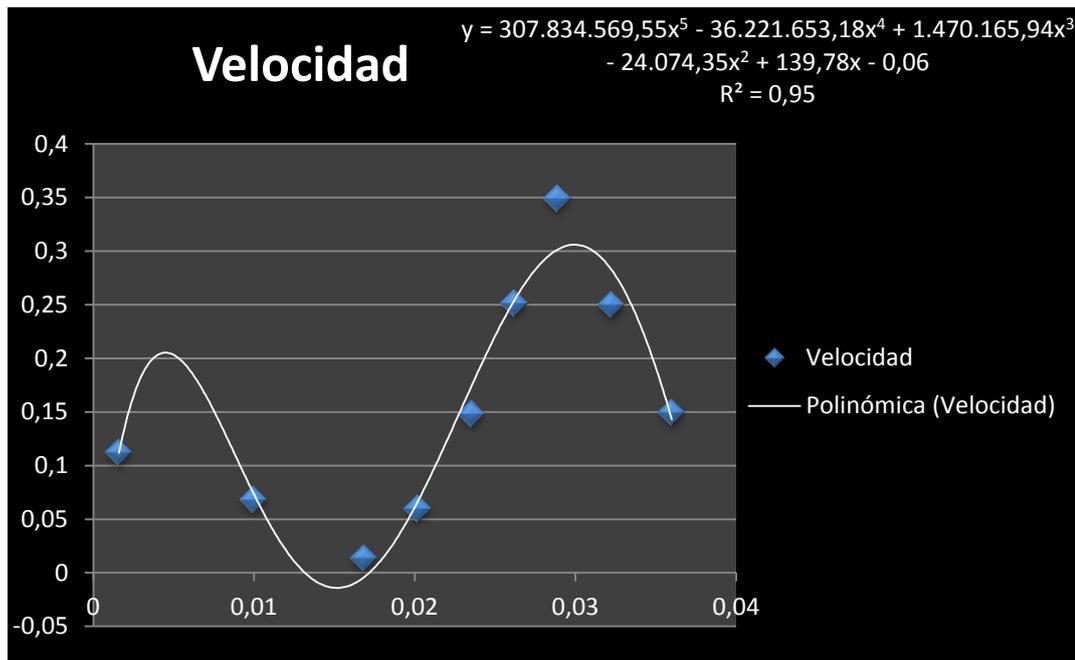
Figura 57 Campo de velocidad del fluido mediante el software PIVlab.



**Figura 58 Grafica Velocidad vs Distancia mediante el software PIVlab.**

Para poder obtener la velocidad promedio mediante la técnica PIV, se procede a sacar datos de la gráfica en el eje X y Y (Ver Figura 58), ingresamos los datos a Excel y obtenemos la gráfica Velocidad vs Distancia, y mediante la opción Agregar línea de tendencia (Ver Figura 59), obtenemos la ecuación de quinto grado la cual nos da una relación  $R^2 = 0,95$ . De acuerdo a Cengel (2006) “para calcular la velocidad promedio teniendo la ecuación de la velocidad respecto a una distancia se utiliza la ecuación 5.2” (p. 174), obtenemos la velocidad promedio del software PIVlab, en donde la altura es de 4 [cm], y la profundidad es de 4 [cm], que son las distancias de la tubería donde se realizan las pruebas.

$$V(y) = 307834569,55y^5 - 36221653,18y^4 + 1470165,94y^3 - 24074,35x^2 + 139,78x - 0,06$$



**Figura 59 Grafica Velocidad VS Distancia en Excel.**

$$V_{Prom} = \frac{Profundidad * \int_0^{Altura} f(y)dy}{\hat{A}rea} \quad (5.2)$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * \int_0^{0,04} (307834569,55y^5 - 36221653,18y^4 + 1470165,94y^3 - 24074,35x^2 + 139,78x - 0,06) dy}{0,04^2}$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * 0,0050 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,04^2}$$

$$V_{prom} = 0,127 [m/s]$$

### 5.2.2 Rotámetro en 15cm.

Utilizando el equipo de medición se captura el video y siguiendo los pasos como se indica en el manual de usuario (Anexo I), se obtiene las velocidades y las gráficas del campo de velocidades del fluido el cual se observe un flujo turbulento que circula en la caja de pruebas y mediante el menú extractions se obtiene la gráfica distancia vs la velocidad.

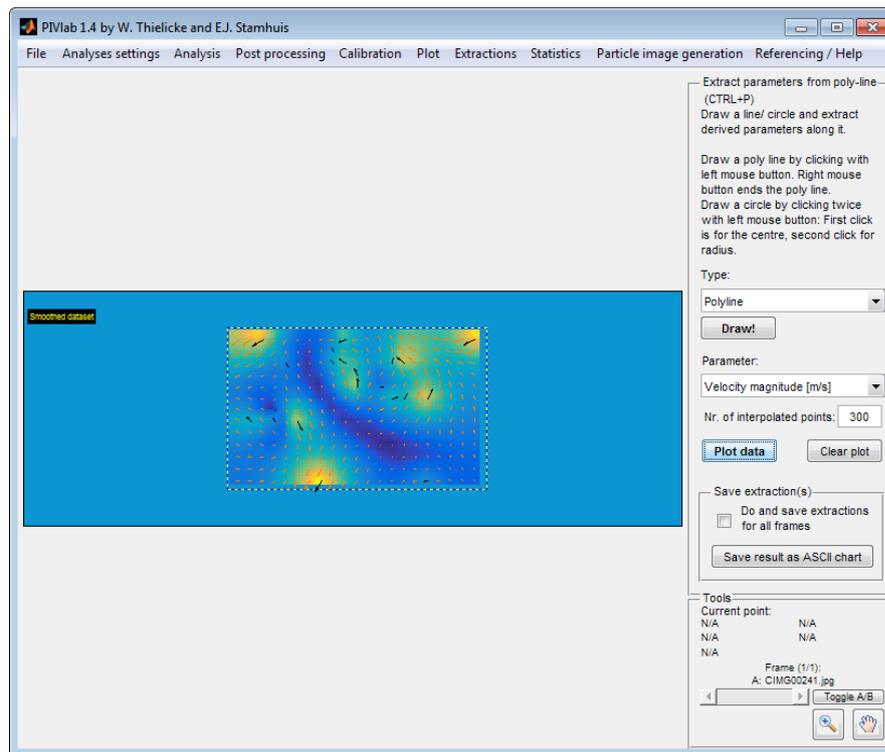


Figura 60 Campo de velocidad del fluido mediante el software PIVlab.

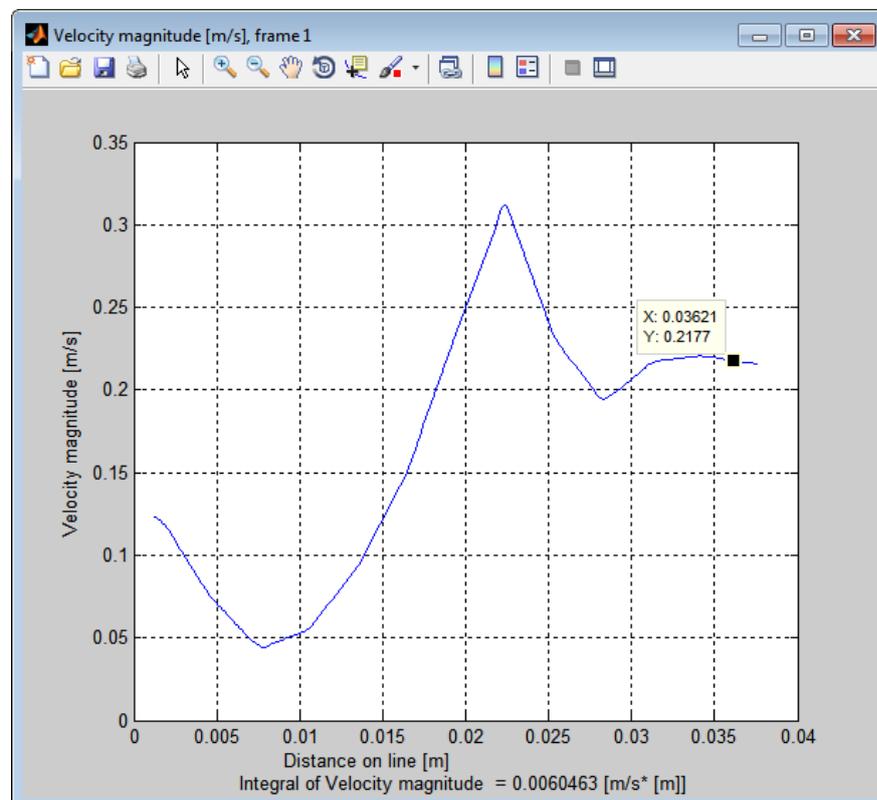


Figura 61 Grafica Velocidad vs Distancia mediante el software PIVlab.

Para poder obtener la velocidad promedio mediante la técnica PIV, se procede a sacar datos de la gráfica en el eje X y Y (Ver Figura 61), ingresamos los datos a Excel y obtenemos la gráfica Velocidad vs Distancia, y mediante la opción Agregar línea de tendencia (Ver Figura 62), obtenemos la ecuación de quinto grado la cual nos da una relación  $R^2 = 0,96$ . De acuerdo a Cengel (2006) “para calcular la velocidad promedio teniendo la ecuación de la velocidad respecto a una distancia se utiliza la ecuación 5.2” (p. 174), obtenemos la velocidad promedio del software PIVlab, en donde la altura es de 4 [cm], y la profundidad es de 4 [cm], que son las distancias de la tubería donde se realizan las pruebas.

$$V(y) = 455.639.340,08y^5 - 37.758.797,13y^4 + 1.025.825,71y^3 - 9.788,41y^2 + 21,85y + 0,11$$

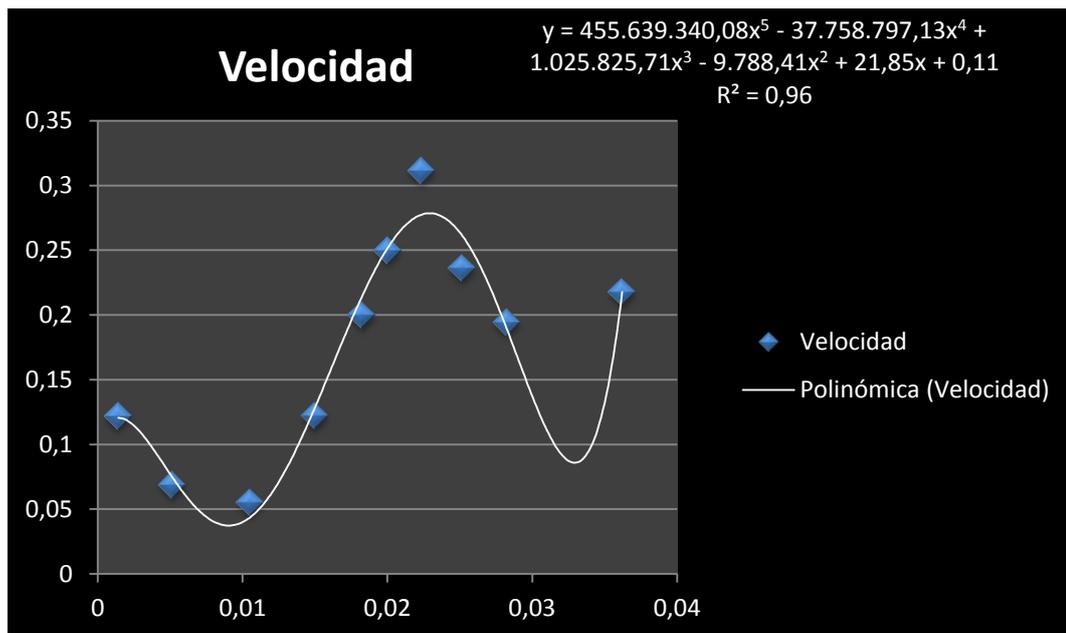


Figura 62 Grafica Velocidad VS Distancia en Excel.

$$V_{Prom} = \frac{Profundidad * \int_0^{Altura} f(y)dy}{Área} \quad (5.2)$$

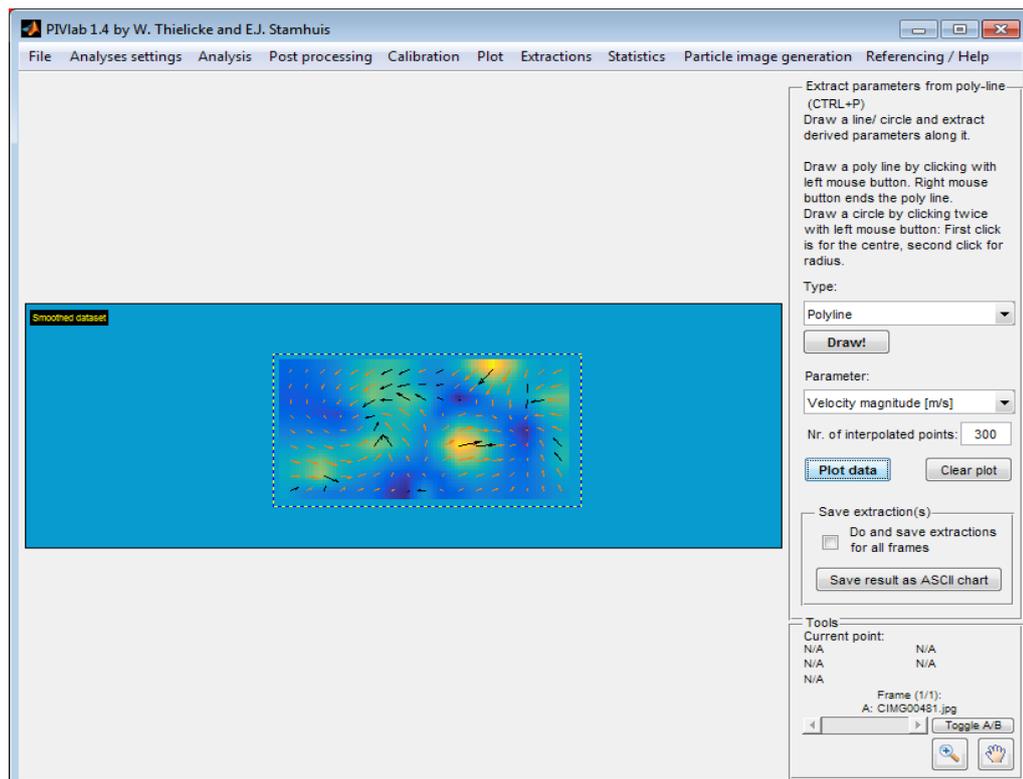
$$V_{Prom} = \frac{0,04 * \int_0^{0,04} (455.639.340,08y^5 - 37.758.797,13y^4 + 1.025.825,71y^3 - 9.788,41y^2 + 21,85y + 0,11)dy}{0,04^2}$$

$$V_{Prom} = \frac{0.04 * 0.00734 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,04^2}$$

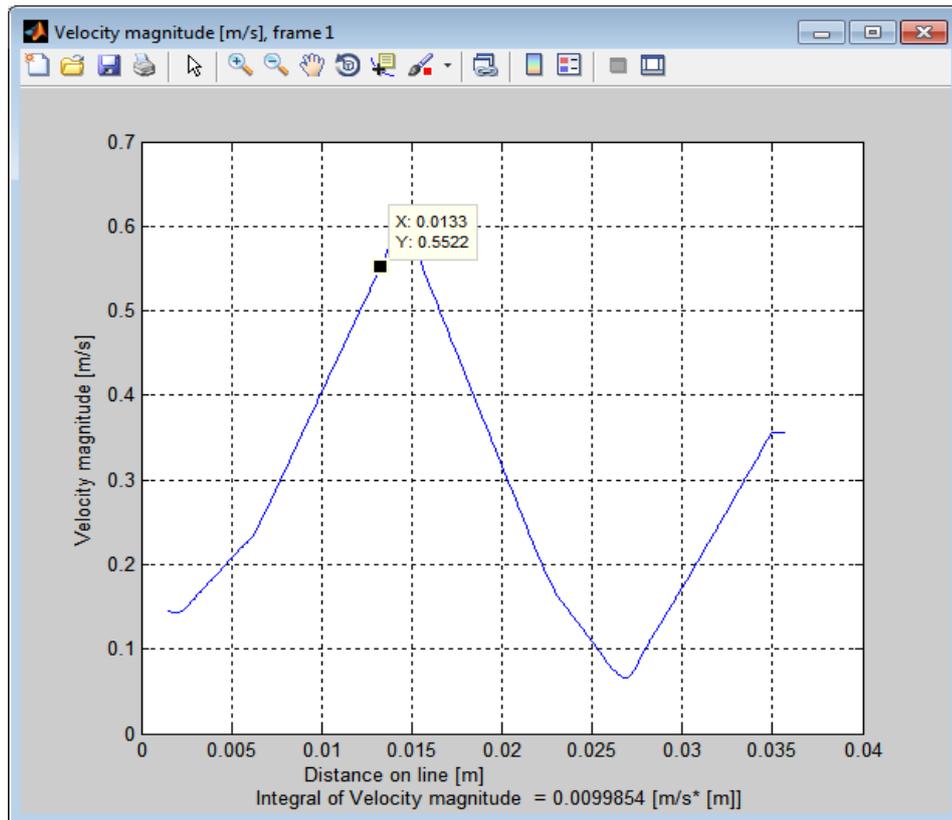
$$V_{prom} = 0,183 [m/s]$$

### 5.2.3 Rotámetro en 20cm.

Utilizando el equipo de medición se captura el video y siguiendo los pasos como se indica en el manual de usuario (Anexo I), se obtiene las velocidades y las gráficas del campo de velocidades del fluido el cual se observe un flujo turbulento que circula en la caja de pruebas y mediante el menú extractions se obtiene la gráfica distancia vs la velocidad.



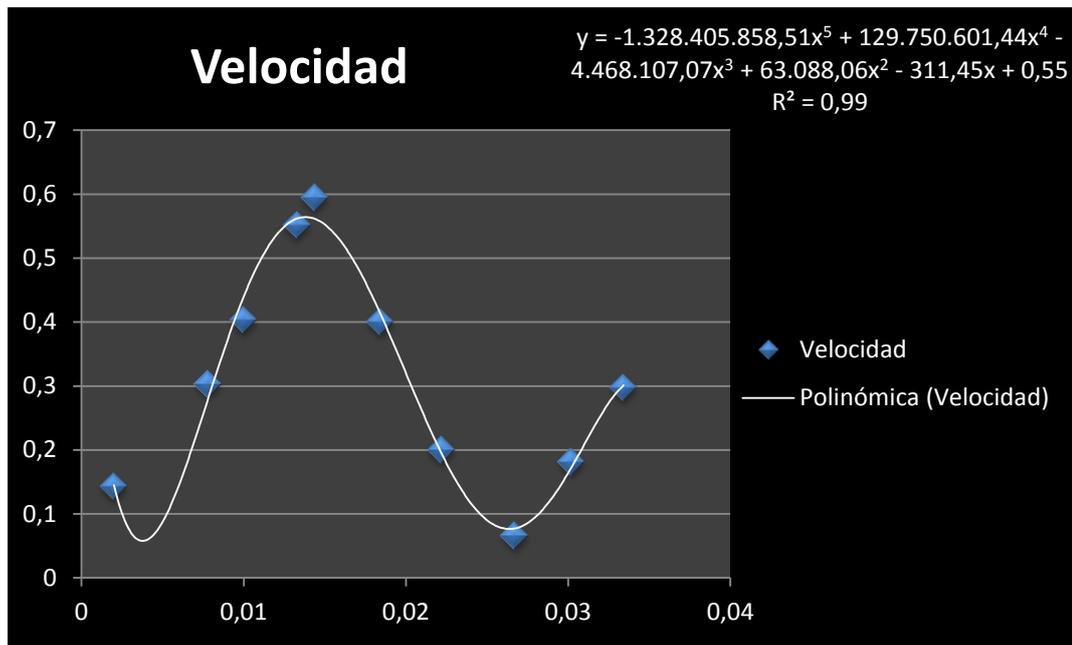
**Figura 63 Campo de velocidad del fluido mediante el software PIVlab**



**Figura 64 Grafica Velocidad vs Distancia mediante el software PIVlab.**

Para poder obtener la velocidad promedio mediante la técnica PIV, se procede a sacar datos de la gráfica en el eje X y Y (Ver Figura 64), ingresamos los datos a Excel y obtenemos la gráfica Velocidad vs Distancia, y mediante la opción Agregar línea de tendencia (Ver Figura 65), obtenemos la ecuación de quinto grado la cual nos da una relación  $R^2 = 0,99$ . De acuerdo a Cengel (2006) “para calcular la velocidad promedio teniendo la ecuación de la velocidad respecto a una distancia se utiliza la ecuación 5.2” (p. 174), obtenemos la velocidad promedio del software PIVlab, en donde la altura es de 4 [cm], y la profundidad es de 4 [cm], que son las distancias de la tubería donde se realizan las pruebas.

$$V(y) = -1.328.405.858,51y^5 + 129.750.601,44y^4 - 4.468.107,07y^3 + 63.088,06y^2 - 311,45y + 0,55$$



**Figura 65 Grafica Velocidad VS Distancia en Excel.**

$$V_{Prom} = \frac{\text{Profundidad} * \int_0^{\text{Altura}} f(y)dy}{\hat{\text{Área}}} \quad (5.2)$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * \int_0^{0,04} (-1.328.405.858,51y^5 + 129.750.601,44y^4 - 4.468.107,07y^3 + 63.088,06y^2 - 311,45y + 0,55)dy}{0,04^2}$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * 0,00956 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,04^2}$$

$$V_{prom} = 0,239 [m/s]$$

#### 5.2.4 Rotámetro en 20cm.

Utilizando el equipo de medición se captura el video y siguiendo los pasos como se indica en el manual de usuario (Anexo I), se obtiene las velocidades y las gráficas del campo de velocidades del fluido el cual se observe un flujo turbulento que circula en la caja de pruebas y mediante el menú extractions se obtiene la gráfica distancia vs la velocidad.

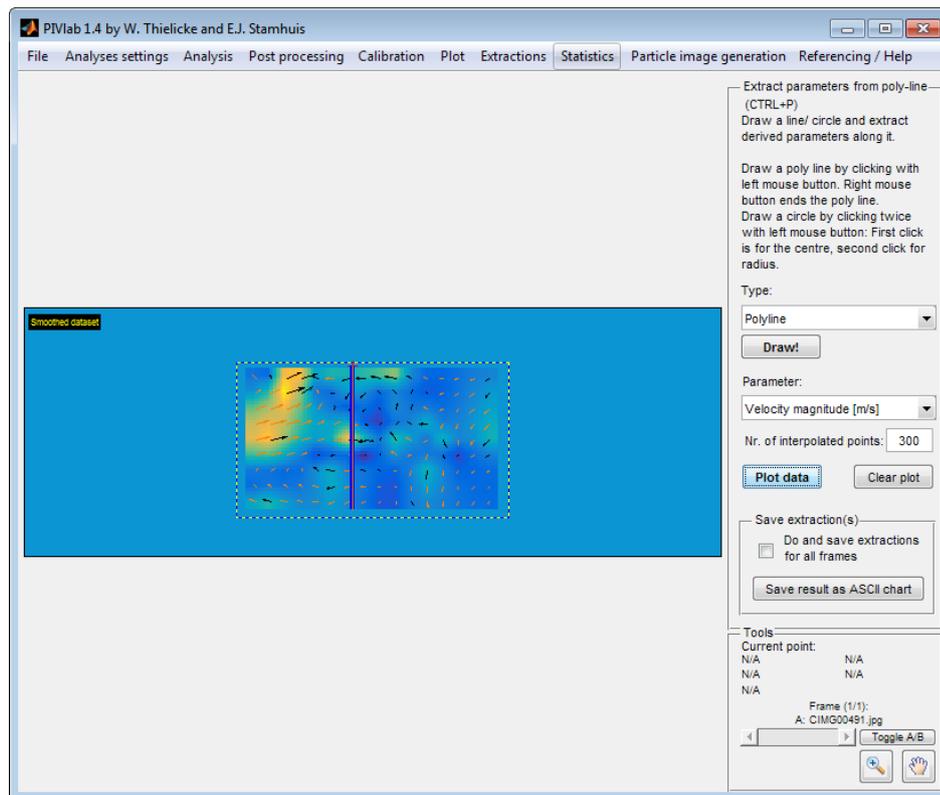


Figura 66 Campo de velocidad del fluido mediante el software PIVlab.

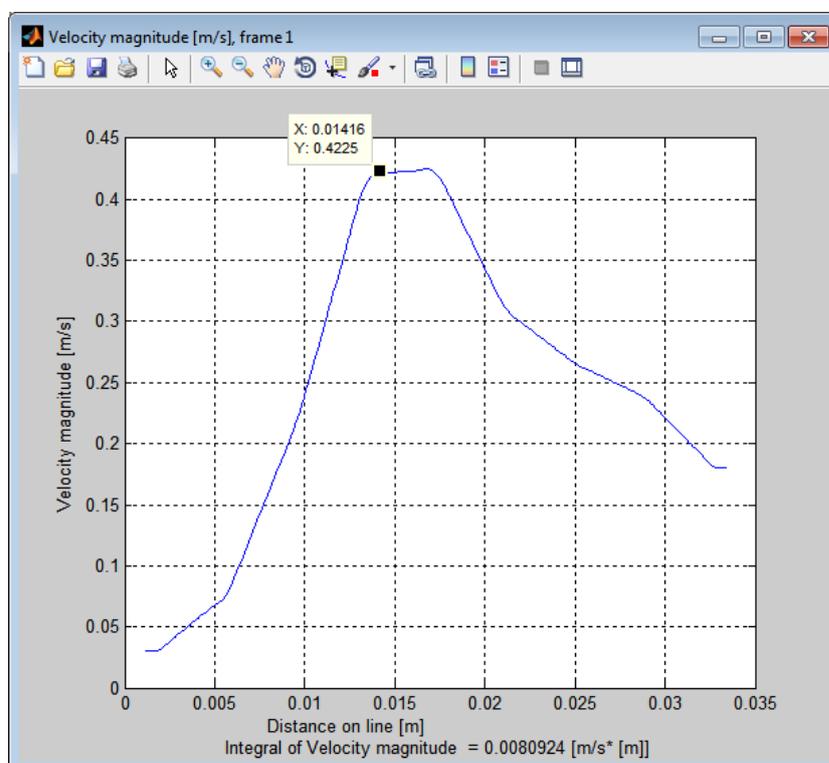


Figura 67 Grafica Velocidad vs Distancia mediante el software PIVlab.

Para poder obtener la velocidad promedio mediante la técnica PIV, se procede a sacar datos de la gráfica en el eje X y Y (Ver Figura 67), ingresamos los datos a Excel y obtenemos la gráfica Velocidad vs Distancia, y mediante la opción Agregar línea de tendencia (Ver Figura 68), obtenemos la ecuación de cuarto grado la cual nos da una relación  $R^2 = 0,95$ . De acuerdo a Cengel (2006) “para calcular la velocidad promedio teniendo la ecuación de la velocidad respecto a una distancia se utiliza la ecuación 5.2” (p. 174), obtenemos la velocidad promedio del software PIVlab, en donde la altura es de 4 [cm], y la profundidad es de 4 [cm], que son las distancias de la tubería donde se realizan las pruebas.

$$V(y) = 7.685.358,65y^4 - 510.226,12y^3 + 9.642,64y^2 - 33,44y + 0,05$$

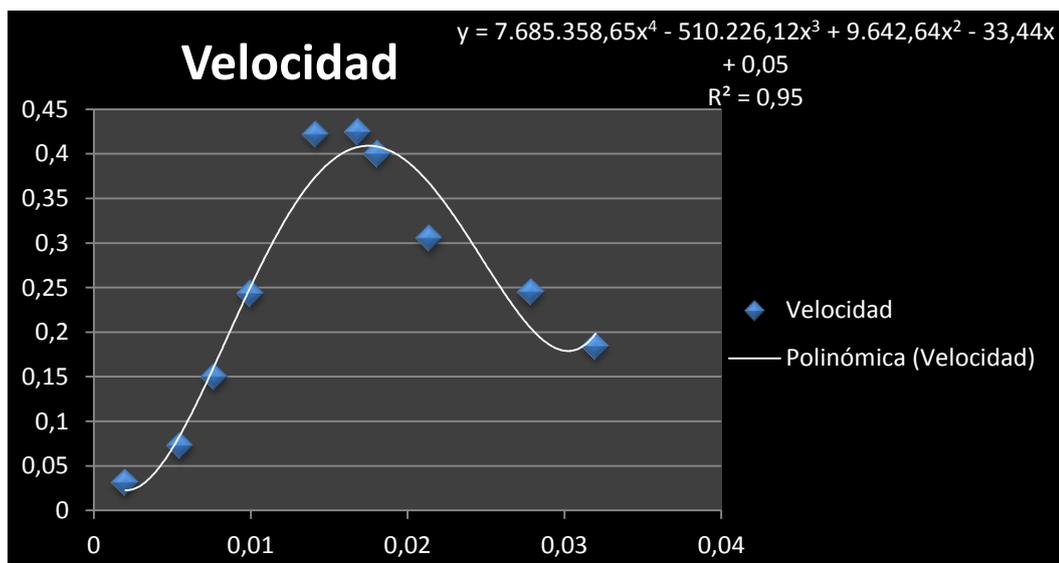


Figura 68 Grafica Velocidad VS Distancia en Excel.

$$V_{Prom} = \frac{Profundidad * \int_0^{Altura} f(y)dy}{Área} \quad (5.2)$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * \int_0^{0,04} (7.685.358,65y^4 - 510.226,12y^3 + 9.642,64y^2 - 33,44y + 0,05)dy}{0,04^2}$$

$$V_{Prom} = \frac{0,04 * 0,01181 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{0,04^2}$$

$$V_{prom} = 0,295 [m/s]$$

### 5.3. Errores experimentales.

Es una desviación del valor medido de una magnitud física respecto al valor real de dicha magnitud, estos dependen básicamente del procedimiento elegido para su lectura y la tecnología disponible. Existen 2 tipos de errores con lo que se puede cuantificar las medidas, estos son:

- Error absoluto
- Error relativo

#### 5.3.1. Error Absoluto.

Corresponde a la diferencia entre el valor medido  $fm$  y el valor real  $fr$ .

$$e_{abs} = fm - fr \quad (5.3)$$

**TABLA 34**  
**Errores Absolutos de las pruebas**

Nº Caso	Valor Experimental [m/s]	Valor Software [m/s]	Error Absoluto ( $e_{abs}$ )
10	0,130	0,127	0,003
15	0,190	0,183	0,007
20	0,250	0,239	0,011
25	0,310	0,295	0,015

#### 5.3.2. Error Relativo.

Corresponde al cociente entre el valor absoluto y el valor real,

$$e_{rel} = \frac{e_{abs}}{fr} \quad (5.4)$$

**TABLA 35**  
**Errores Relativos de las pruebas**

Nº Caso	Valor Experimental [m/s]	Valor Software [m/s]	Error Relativo ( $e_{rel}$ )
10	0,130	0,127	0,023
15	0,190	0,183	0,037
20	0,250	0,239	0,044
25	0,310	0,295	0,048

### 5.3.3. Error porcentual.

Corresponde al error relativo multiplicado por 100.

$$e_{\%} = e_{rel} * 100\% \quad (5.5)$$

**TABLA 36**  
**Errores porcentuales de las pruebas**

Nº Caso	Valor Experimental [m/s]	Valor Software [m/s]	Error Relativo ( $e_{rel}$ )	Error Porcentual (%)
10	0,130	0,127	0,023	2,31%
15	0,190	0,183	0,037	3,68%
20	0,250	0,239	0,044	4,40%
25	0,310	0,295	0,048	4,84%

## 5.4 Validación

Calculamos los errores tomando en cuenta que los valores del software son como valores reales de la velocidad del fluido, y los valores medidos experimentalmente son el valor medido.

- En la medida tomada cuando el rotámetro se encuentra a una altura de 10cm (Ver Tabla 34), tenemos un error aproximado del 2,31%, lo que

significa que los datos obtenidos en el Software utilizando la técnica PIV refleja un valor aproximado al valor de la velocidad promedio obtenido experimentalmente.

- En la medida tomada cuando el rotámetro se encuentra a una altura de 15cm (Ver Tabla 34), tenemos un error aproximado del 3,68%, lo que significa que los datos obtenidos en el Software utilizando la técnica PIV refleja un valor aproximado al valor de la velocidad promedio obtenido experimentalmente.
- En la medida tomada cuando el rotámetro se encuentra a una altura de 20cm (Ver Tabla 34), tenemos un error aproximado del 4,4%, lo que significa que los datos obtenidos en el Software utilizando la técnica PIV refleja un valor aproximado al valor de la velocidad promedio obtenido experimentalmente.
- En la medida tomada cuando el rotámetro se encuentra a una altura de 25cm (Ver Tabla 34), tenemos un error aproximado del 4,84%, lo que significa que los datos obtenidos en el Software utilizando la técnica PIV refleja un valor aproximado al valor de la velocidad promedio obtenido experimentalmente.

Mediante estos cálculos se demuestra que la velocidad promedio que se obtiene utilizando el equipo reflejan un error menor al  $\pm 5\%$ , y el equipo queda validado para proceder a realizar investigaciones y uso de los estudiante en laboratorios, este error es aceptable, considerando que este equipo para fines industriales están por el costo de \$20000, obteniendo un error del  $\pm 1\%$ , y se pudo realizar un equipo con la una décima parte del costo con características aproximadas.

## CAPITULO 6

### ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO.

#### 6.1. Análisis Financiero.

Dentro del análisis financiero se considera 3 aspectos importantes en la realización, estos son:

- Costos Directos.
- Costos Indirectos.
- Costos de Fabricación.

##### 6.1.1. Costos Directos.

Se entiende por costos directos, aquellos que se vinculan directamente con el producto y la realización de la obra de estudio, sin estos costos no se podrían realizar el producto, estos costos se detallaran en las siguientes tablas.

- Materiales y accesorios mecánicos (Ver Tabla 37 Y 38).
- Materiales y accesorios hidráulicos (Tabla 39).
- Materiales y accesorios eléctricos / electrónicos (Tabla 40).
- Software (Tabla 41).

**TABLA 37**  
**Costos Directos: Materiales mecánicos.**

Plano	Material	Descripción	Cantidad	C.Unit. (USD)	C. Total (USD)
<b>1100</b>	Tubo	ASTM 569	2	1,5	3
<b>1101</b>	estructural	Tubo 20x40 mm			
<b>1102</b>	rectangular	e=3mm			
<b>1103</b>		Largo normal 6m			

**CONTINÚA →**

<b>1200</b>	Tabla MDF	1050X1050 e=12mm	1	8	8
<b>1301,1302</b> <b>1303, 1304</b>	Postes de madera	50X30 mm Largo normal 2m	5	2,5	12,5
<b>2100, 2101,</b> <b>2102, 2103,</b> <b>2104</b>	Tubo estructura cuadrada	ASTM A569 30X30 mm e=3mm Largo normal 6m	1	1,5	1,5
<b>2200</b>	Plancha de aluminio	Aluminio Liso H14 1010x300 mm e = 4mm	1	5	5
<b>2300</b>	Perfil tipo L	ASTM 36 40 X 40 mm e = 4mm	2	0,75	1,5
<b>3101</b>	Tubo mecánico redondo	ASTM 36 25 DIA e = 1,2mm Longitud 2m	1	2,5	2,5
<b>3102</b>	Placa	ASTM A 36 e = 25mm	1	4,5	4,5
<b>3200,</b> <b>3202</b>	Tubo mecánico redondo	ASTM 36 15,9 DIA e = 1,2mm Longitud 1m	1	1,5	1,5
<b>3201</b>	Chapa de acero	Acero Inoxidable e = 2mm	1	1,5	1,5
<b>3300, 3400,</b> <b>3302</b>	Tubo redondo	Aluminio 12,7 DIA Longitud 500mm e = 1mm	1	1	1

CONTINÚA ➔

<b>3301, 3401</b>	Chapa de aluminio	e = 2mm	1	0,6	0,6
<b>3500</b>	Tubo mecánico redondo	ASTM A36 12,7 DIA Longitud 200mm e = 1mm	1	0,75	0,75
<b>4000, 4100, 4200, 4300</b>	Chapa de aluminio	e = 2mm	1	3,5	3,5
<b>5100</b>	Acrílico cristal	0,61 x 1,22 m e = 4mm	1	25	25
<b>TOTAL</b>					<b>72,35</b>

**TABLA 38**  
**Costos Directos: Accesorios mecánicos**

<b>Sistema</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>C. Unit. (USD)</b>	<b>C. Total (USD)</b>
<b>Mesa Principal y Estructura de madera</b>	Perno cabeza redonda	M6 x 1 x 40	8	0,24	1,92
	Tuerca hexagonal	M6	8	0,06	0,48
	Arandela	M6	8	0,05	0,4
	Perno cabeza redonda plana	M6 x 1 x 40	4	0,26	1,04
	Tornillo para madera	T5 x 60	6	0,15	0,9
<b>Mesa Bomba-Tanques</b>	Remaches	M4,8 x 10	16	0,1	1,6
	Tornillo cilíndrico con hexágono interior	M5 x 18	4	0,11	0,44
	Tuerca hexagonal	M5	4	0,05	0,2
	Perno cabeza redonda	M10 x 1 x 30	4	0,24	0,96
	Tuerca hexagonal	M10	4	0,06	0,24

CONTINÚA →

<b>SopORTE Láser, lente, cuadrado</b>	Abrazaderas de tornillo	30 DIA	6	0,75	4,5
	Abrazaderas de tornillo	25 DIA	3	0,75	2,25
	Perno cabeza abombada ranura	M5 x 1 x 20	2	0,16	0,32
	Tuerca hexagonal	M5	2	0,05	0,1
<b>Caja Circuito eléctrico</b>	Perno cabeza abombada ranura	M4 x 1 x 20	4	0,16	0,64
	Tuerca hexagonal	M4	4	0,05	0,2
	Remache cabeza redonda	M5 x 6	16	0,1	1,6
<b>Tubería</b>		Densidad 1,004			
	Partículas	kg/m3	10	5	50
<b>TOTAL</b>					<b>67,79</b>

TABLA 39

**Costos Directos: Materiales y accesorios hidráulicos.**

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cant.</b>	<b>C. Unit. (USD)</b>	<b>C. Total. (USD)</b>
Tubería PVC roscable	1" X 6m	1	14	14
Manguera flexible	1" X 1m	5	5	25
Codo 90° PVC	1"	4	2	8
Válvula de Bola PVC	1"	3	10	30
Manguera transparente	1" X 1m	1	4	4
Acoples de manguera PVC	1"	8	2	16
T de PVC	1"	1	3	3
Tanques de reserva	25 lt	2	5	10
<b>Total</b>				<b>110</b>

**TABLA 40**  
**Costos Directos: Materiales y accesorios eléctricos/electrónicos.**

Elemento	Descripción	Cant.	C. Unit. (USD)	C. Total. (USD)
Cámara	Casio EXFH20	1	350	350
Cargador Cámara	Entrada : 110 [VAC] a 1[A] Salida: 9 [VDC] a 1[A]	1	10	10
Arduino Mega	Controlador	1	35	35
Módulo Relé	Salida : 110 – 220 [VAC] a 10[A] 30 [VDC] a 10[A]	1	8	8
Pantalla	TFT de 2,4’’	1	15	15
Laser	Potencia Salida: 3000 [mW] Color Verde	1	25	25
Placa electrónica	Fibra de vidrio 10x9	1	10	10
Bomba de agua	Alimentación: 110 [VAC] Potencia: 0.55 [kW]	1	60	60
Porta fusible	6 X 30 mm	1	1	1
Fusible	10 [A]	1	0,5	0,5
Switch	10 [A]	1	1	1
Fuente	Entrada : 110 [VAC] a 1[A] Salida: 5 [VDC] a 1[A]	1	5	5
Resistencias	220 Ohmios	12	0,05	0,6
Espadines	Simple	7	0,7	4,9
Selectores	3 Posiciones	2	4	8

CONTINÚA →

Cable Eléctrico	Timbre	4	0,25	1
Cable Eléctrico	Gemelo N16	5	0,3	1,5
Cable Eléctrico	RV-K 2 x 10 mm2	3	0,5	1,5
Cable Eléctrico	Para Arduino hembra-hembra	1	5	5
Enchufe	10 [A]	1	1	1
Tomacorriente	Doble polarizado	2	3	6
Soporte para placas	5 (cm)	8	0.8	6,4
			<b>TOTAL</b>	<b>556,4</b>

**TABLA 41**  
**Costos Directos: Software.**

<b>Software</b>	<b>Cant.</b>	<b>C. Unit. (USD)</b>	<b>C. Total. (USD)</b>
Total Video Converter	1	25	25
<b>TOTAL</b>			<b>25</b>

Los costos directos totales de los materiales y accesorios mecánicos, hidráulicos, eléctricos/electrónicos y el software son de \$831,54 (Ver Tabla 42).

**TABLA 42**  
**Costos Directos: Total**

<b>Conceptos</b>	<b>Costo (USD)</b>
Materiales mecánicos	72,35
Accesorios mecánicos	67.79
Materiales y accesorios hidráulicos	110
Materiales y accesorios eléctricos/electrónicos	556,4
Software	25
<b>TOTAL</b>	<b>831,54</b>

### 6.1.2. Costos Indirectos.

Son costos que no se vinculan directamente con el proyecto, pero si son imprescindibles para que pueda funcionar correctamente el equipo. Estos costos son:

- Materiales Indirectos (Ver Tabla 43).
- Mano de obra indirecta (Ver Tabla 44).
- Costos operativos o de servicio básico (Ver Tabla 45).

**TABLA 43**  
**Costos Indirectos: Materiales Indirectos.**

<b>Elemento</b>	<b>Cant.</b>	<b>C. Unit. (USD)</b>	<b>C. Total. (USD)</b>
Disco de desgaste	1	3	3
Lija N° 80 Seca	2	1	2
Electrodo 6011 (1lb)	1	3	3
Estaño (100g)	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Fondo (1/16 lt)	1	5	5
Pintura Poliuretano Negra (1/16 lt)	1	8	8
Pintura Aluminada Ploma (1/16 lt)	1	6	6
Barniz con catalizador (1/16 lt)	1	8	8
Thinner (1 lt)	1	10	10
Correas de sujeción (1m)	10	0,4	4
Ganchos de cierre	3	0,4	1,2
Ganchos de ajuste	3	0,3	0,9
		<b>TOTAL</b>	<b>56,1</b>

**TABLA 44**  
**Costos Indirectos: Mano de obra indirecta**

<b>Detalle</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>C. Unit. (USD)</b>	<b>C. Total.(USD)</b>
Ingeniería y Diseño	30	4	120
Planos Mecánicos	16	4	64
Planos Hidráulicos	1	4	4
Planos Eléctricos/Electrónicos	4	4	16
Programación y Control	6	4	24
<b>TOTAL</b>			<b>228</b>

**TABLA 45**  
**Costos Indirectos: Operativos o de Servicio Básico.**

<b>Concepto</b>	<b>Costo (USD)</b>
Agua potable	15
Luz eléctrica	20
internet	20
<b>TOTAL</b>	<b>55</b>

Los costos indirectos totales tienen una suma de \$339,1 (Ver Tabla 46).

**TABLA 46**  
**Costos Indirectos: Total**

<b>Conceptos</b>	<b>Costo (USD)</b>
Materiales indirectos	56,1
Mano de obra indirecta	228
Costos Operativos	55
<b>TOTAL</b>	<b>339,1</b>

### 6.1.3. Costos de fabricación.

Son aquellos que se vinculan directamente con la elaboración del producto o prestaciones de servicios (Ver Tabla 47).

**TABLA 47**  
**Costos de fabricación por tiempo**

<b>Máquina/Herramientas</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>C. Unit (USD/h)</b>	<b>C. Total (USD)</b>
Láser.	0,82	37,16	30,35
Oxicorte	0,50	10	5,00
Soldadura eléctrica.	1,83	4,5	8,25
Sierra de banco.	2,63	1,5	3,95
Herramientas(Sierra, tijera, taladro, machuelo, terraja Amoladora)	10,63	2,50	26,58
Varios (Lijado, pintura)	13,95	4,5	62,78
Ensamblaje Mecánico	9,92	3,5	34,71
Ensamblaje Eléctrico/electrónico	14	3,5	49
<b>TOTAL</b>			<b>220,61</b>

El costo total de todo el proyecto incluido los costos directos, indirectos y los de fabricación se pueden ver que es de \$1391,25 (Ver Tabla 48), que viene a ser la inversión inicial para poder realizar nuestro proyecto.

**TABLA 48**  
**Costo Total**

<b>Conceptos</b>	<b>Costo (USD)</b>
Costos Directos	831,54
Costos Indirectos	339,1
Costos de fabricación	220,61
<b>TOTAL</b>	<b>1391,25</b>

El costo presupuestado para el equipo fue de \$1415, sin embargo, utilizando materiales reciclados y de medio uso, especialmente en la cámara fotográfica, se ahorró una cantidad significativa, que posteriormente se utilizaría ese ahorro en un

diseño más completo para el equipo de pruebas. Con todo esto el precio total del equipo como se puede observar que es de \$1391,25 (Ver Tabla 48).

Un equipo para realizar pruebas experimentales tiene un costo aproximado de \$25.000, debido a la resolución, calidad y exactitud de las pruebas, como se construyó un equipo con fines académicos se obtuvo con el precio mencionado anteriormente, es de menor capacidad pero eficiente para pruebas de ensayos en el laboratorio de fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

## **6.2. Análisis Económico.**

Se analizarán tres parámetros importantes dentro del análisis económico los cuales son:

- Valor Actual Neto (VAN).
- Tasa de Interna de Retorno (TIR).
- Relación Beneficio Costo

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador en el Análisis Costo- Beneficio para decidir si un proyecto o inversión es deseable. El VAN de una inversión se obtiene sumando los beneficios netos descontados, es decir, los beneficios menos costos de cada período, a los cuales se les ha aplicado la regla de descuento. Un VAN positivo significa que los beneficios son superiores a los costes, por lo que el proyecto es viable.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es el segundo indicador importante en el Análisis Costo-Beneficio, que está relacionado con el VAN, siendo este la tasa de interés en el que el VAN se hace cero. Mientras mayor sea el TIR, más rentable será el proyecto.

El Análisis Costo-Beneficio es una técnica de evaluación de proyectos que determina si un determinado proyecto, política o inversión es conveniente mediante la valoración en términos monetarios de todos los costos y beneficios. Si esta razón es mayor que uno, el proyecto es viable.

Para analizar estos parámetros se realiza un cálculo de flujo de caja proyectada para 10 semestres, debido que el equipo utilizara los alumnos en sus prácticas

semanales, lo que ayuda a la universidad y ahorra gastos para un mejor aprendizaje de las materias, se estima un ahorro de \$300 a \$500 semestrales para la universidad, para el uso y manejo del equipo. Se puede apreciar la viabilidad del proyecto el cual se recupera la inversión en el 6 semestre de uso (Ver Tabla 49), excluyendo las futuras investigaciones que servirán para el área de mecánica de fluidos.

**TABLA 49**  
**Flujo de caja proyectada a 10 semestres**

SEM.	EGRESOS			INGRESOS	SALDO	SALDO ACUMULADO
	Inversión	Costo operativo	Total			
1	1223,24		1223,24		-1223,24	-1223,24
2	50	55	105	300	195	-1028,24
3	50	55	105	300	195	-833,24
4	50	55	105	300	195	-638,24
5	50	55	105	300	195	-443,24
6	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>105</b>	<b>300</b>	<b>195</b>	<b>-248,24</b>
7	50	55	105	300	195	-53,24
8	50	55	105	300	195	141,76
9	50	55	105	300	195	336,76
10	50	55	105	300	195	531,76
<b>TOTAL</b>	<b>1673,24</b>	<b>495</b>	<b>2168,24</b>	<b>3420</b>	<b>1251,76</b>	

**TABLA 50**  
**Valores del VAN, TIR, B/C.**

<b>VAN</b>	\$ 122,06
<b>TIR</b>	0,12
<b>B/C</b>	1,606

Como se puede observar en la tabla se muestra un VAN con un valor positivo y un análisis de B/C mayor que uno, con lo que se puede concluir que el proyecto propuesto es viable y aconsejable implementar para ayuda de la Universidad de las Fuerzas Armadas.



## **CAPITULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1 Conclusiones.**

- El sistema de medición fue diseñado para acoplarse a distintos equipos de pruebas que se pueden encontrar en el laboratorio de Fluidos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.
- El sistema de medición fue diseñado y construido con el fin de aportar a futuras investigaciones que se realizaran en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en el área de Fluidos.
- El equipo de pruebas diseñado, permite verificar la velocidad obtenida por el software libre, y el campo vectorial del mismo manteniendo un error de  $\pm 15\%$ .
- El sistema de medición se diseñó para que solo el personal autorizado tengo acceso al manejo de los elementos eléctricos/electrónicos, para evitar daños en el equipo.
- Se desarrolló un programa para el manejo del equipo con una interfaz gráfica de usuario amigable, donde se puede visualizar el funcionamiento de la bomba y el láser.
- El software libre que permite procesar las imágenes para obtener el campo de velocidades, también ayuda a filtrar los datos erróneos obtenidos en las imágenes debido a la cámara o al ambiente en donde se realiza las pruebas.
- Las propiedades de la resina en polvo utilizadas, nos permite observar el comportamiento del fluido en toda el área de la tubería de la caja de pruebas.

## 7.2 Recomendaciones.

- Se recomienda antes de utilizar el equipo de medición leer muy bien las instrucciones de funcionamiento que se encuentran en el manual de usuario.
- Utilizar equipos de protección como gafas con protección contra los rayos, para evitar que la potencia del láser afecte la vista, ocasionando daños de salud o pérdida de la visión.
- Utilizar un caudalímetro para saber con mayor precisión la velocidad del fluido dentro del sistema.
- Implementar a la bomba un variador de frecuencia para poder contralar el caudal con mayor precisión y poder obtener un flujo laminar para poder realizar las pruebas respectivas
- No encender la bomba si los tanques de alimentación no se encuentran con agua en un 50%, para evitar daños en la bomba de agua, y no insertar basura en los tanques de agua, el agua que debe circular debe ser semi pura solo admite tamaño de hasta 100 [ $\mu\text{m}$ ], caso contrario provocara daños en la bomba de agua.
- Realizar una calibración adecuado con datos reales para poder obtener datos correctos en el análisis que se esté realizando.
- Utilizar partículas con diámetro entre los 20 y 100 [ $\mu\text{m}$ ], con características de refracción a la luz y una densidad parecida a la del agua.

## BIBLIOGRAFIA

### LIBROS CONSULTADOS

Mataix, C. (1987). *Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas* (Segunda ed.). Madrid: Del Castillo.

Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. (Sexta ed.). México: Pearson Educación.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (Primera ed.). México: Mc Graw Hill.

### TESIS CONSULTADAS

Bardera, R. (2005). Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica. (*Memoria para optar al grado de Doctor*). Universidad Complutense de Madrid, España.

Coronel, A. (s.f). Sistema para medir velocidad en flujo de fluidos en 4 dimensiones. (*Proyecto de grado previo a la obtención del título en Maestro Optomecatrónica*). Centro de Investigaciones en Óptica, México.

Iriarte, J. (2008). Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable FPGA. (*Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Nuclear*). Universidad Nacional de Cuyo, San Carlos de Bariloche.

López, M. (2006). Un nuevo algoritmo en la técnica de Velocimetría por imágenes de partículas. (*Proyecto de grado previo a la obtención del título en Maestro en Ciencias de la Computación*). Instituto Politécnico Nacional, México.

Martínez, J., & González, L. (s.f). Velocímetro de partículas basado en imágenes digitales. (*Artículo de Investigación*). Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, México.

Nauri, S. (2008). Implementation and development of advanced algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its application to flows of industrial interest. (*Tesis PhD*). Universidad Carlos III de Madrid, España.

### **CONGRESOS**

Morales , O., Jiménez, J., Barbosa, J., & Gutierrez, C. (24 de 09 de 2010). Estudio experimental del flujo laminar en conducto rectangular con escalón. *Potencia presentada al XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Laboratorio de Energía Térmica e Hidráulica Aplicada, México.

### **DIRECCIONES INTERNET**

(s.f.). Recuperado el 04 de 02 de 2015, de <http://opensourcepiv.weebly.com/parts-and-how-to-build.html>

(s.f.). Recuperado el 24 de 02 de 2015, de [http://www.fime.uanl.mx/mc\\_termica\\_ren/fenomeno\\_de\\_transporte.html](http://www.fime.uanl.mx/mc_termica_ren/fenomeno_de_transporte.html)