



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



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

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ENSAYO JOMINY**  
Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

**Integrantes:**

Luna Jaen Jhon Alexander  
Tamayo Izurieta Luis Felipe

**Tutor:**

Ing. Xavier Rolando Sánchez, PhD.

202250



# Introducción

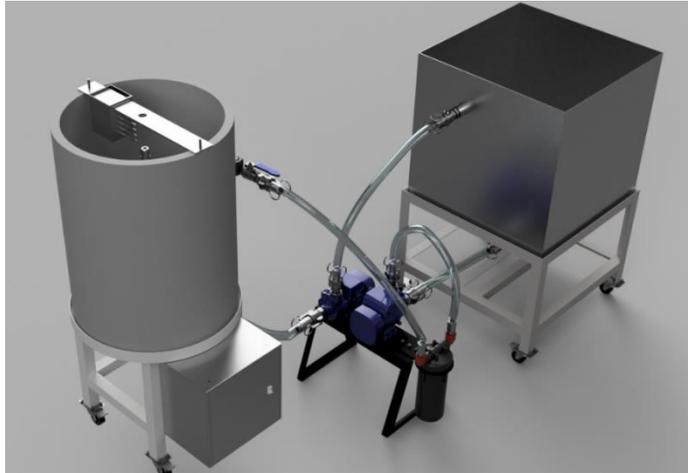


Figura 1. Esquema general del equipo.

## Alcance del proyecto

- Construcción de un banco de pruebas para el ensayo Jominy
- Manual de usuario y mantenimiento del equipo
- Guía de practica de laboratorio.

## Justificación e Importancia

En el ámbito académico es importante analizar experimentalmente el temple según la Norma ASTM-A255

Equipar al Laboratorio de Ciencia de los materiales con un equipo para realizar las practicas que se requieran.

Se busca comprobar y determinar los parámetros necesarios del ensayo como son: templabilidad, microestructura y dureza del acero



# Objetivos

General

Diseñar y construir un banco de pruebas para ensayo Jominy con una interfaz (HMI) para la interpretación de resultados.

Específicos

Elaborar el diseño mecánico del recipiente para el ensayo Jominy.

Determinar las mejores opciones para la obtención de datos relacionados con curvas de enfriamiento y fenómenos a fin.

Realizar los procedimientos necesarios de manufactura mecánica y electrónica para la obtención de un banco de pruebas funcional

## Especificaciones generales del equipo

En referencia con lo establecido por la norma ASTM A255-10(2014) en su sección 3.1, la prueba consiste en enfriar con agua un extremo de la probeta de 1" de diámetro y medir la respuesta de endurecimiento en función de la distancia desde el extremo enfriado.

## Especificaciones técnicas y requerimientos del equipo

Bomba ½ HP. Como sugiere la Norma, la bomba mas pequeña que se consiga fácilmente en el mercado.

Tubería acero inoxidable para el circuito de alimentación del ensayo.

Material adecuado para equipos de laboratorio.

Facilidad de montaje y traslado dentro del laboratorio.

Mantenimiento de fácil ejecución.

Dimensionamiento máximo de 1800 mm de largo, 1200 mm de ancho y 1400 mm de alto.

# Desarrollo

## *Reservorio*

### Parámetros de diseño

Q <sub>max</sub>	20 L/min
t	10 min

Volumen de trabajo:  $V = Q_{max} \cdot t \rightarrow 200 L \quad (1)$

Material: AISI 304

*Se diseñó el recipiente con base en la teoría de esfuerzo admisible y la deflexión máxima para tanques a presión atmosférica*

(Megyesy, 2008).

# Desarrollo

$$t = L \sqrt{\frac{\beta \cdot H \cdot 0.036 \cdot G}{S}} \quad (2)$$

$$y_{max} = \frac{\alpha \cdot 0.036 \cdot G \cdot H \cdot L^4}{E \cdot t_a^4} \quad (3)$$

De la ecuación (2) se calcula el valor del espesor requerido de  $t = 0.069 \text{ in} = 1.75 \text{ mm}$ , donde obtenemos el espesor adaptado de 2 mm.

Aplicando la ecuación (3) obtenemos una deflexión máxima de  $0.00064 \text{ mm}$ .

Como  $y_{max} < \frac{t_a}{2}$ , el espesor adoptado es satisfactorio para la manufactura del tanque.

Para la fabricación del tanque reservorio se seleccionó planchas de Acero AISI 304 de un espesor de 2 mm.

(Megyesy, 2008).

# Desarrollo

## Tanque porta probetas

Para el diseño del tanque porta probetas se consideró parámetros como lo son la selección de material, volumen de agua que será suministrado por la bomba de ½ HP, la salida del flujo de agua en contacto con la probeta a un diámetro de ½”, generando un chorro de agua de 2 ½” de longitud, como se menciona en la norma ASTM A255-10.

El cálculo para determinar el espesor y resistencia se basa en la teoría de recipientes de paredes delgadas.

Se considera un recipiente de pared delgada si:

$$\frac{R_m}{t} \geq 10 \quad (4)$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h_T \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{t} \quad (6)$$

De acuerdo a la ecuación (4), verificamos que este es un recipiente de paredes delgadas.

Mediante la ecuación (5) se obtiene la presión hidrostática que es de 6.47 KN/m<sup>2</sup>.

El cálculo del esfuerzo al que se somete el tanque se utiliza la ecuación (6), con un valor de 728.4 KN/m<sup>2</sup>

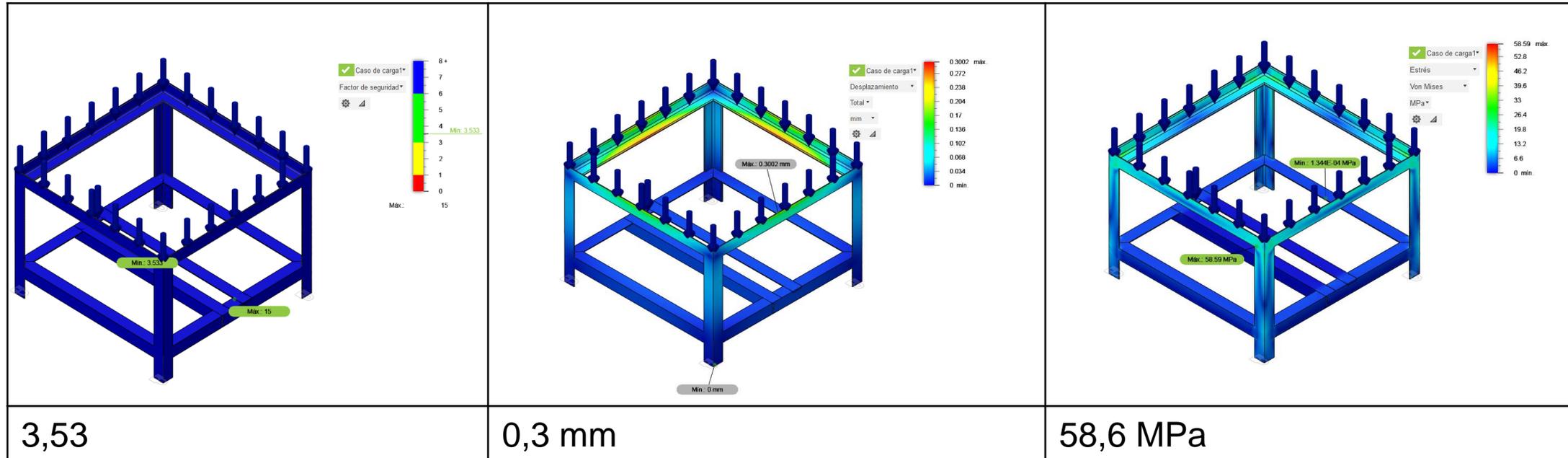
$$728.4 \text{ KN/m}^2 < 110 \text{ MN/m}^2$$

Se cumple con las condiciones de diseño y soporta la presión hidrostática de trabajo para el tanque.

# Desarrollo

## Estructura Reservorio

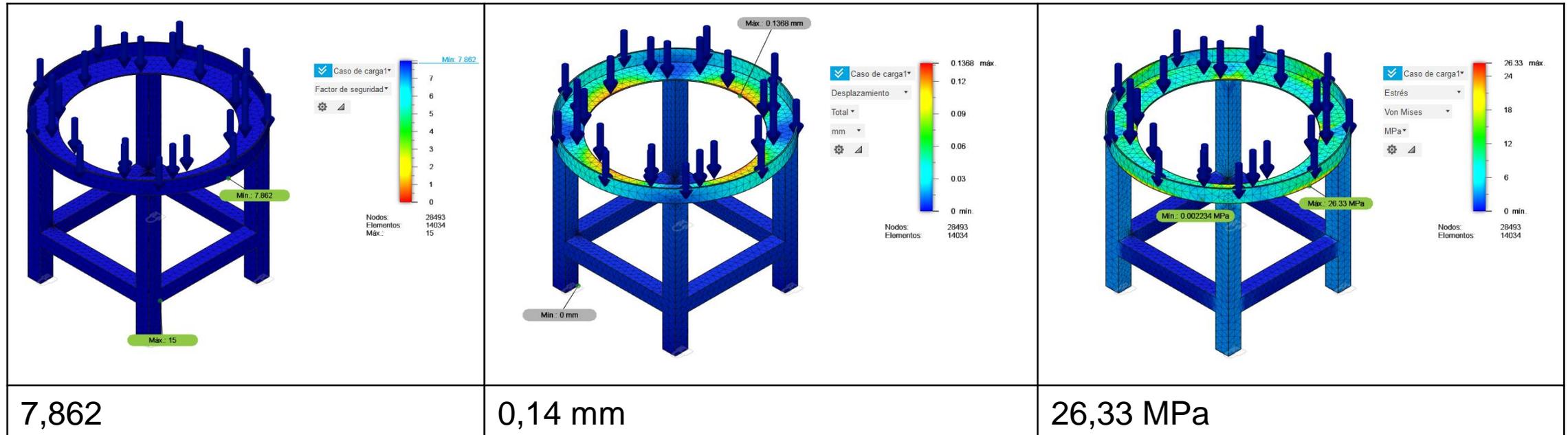
Elemento	Fuerza aplicada [N]
Reservorio	300
Volumen de agua máximo	2120
Total	2420



# Desarrollo

## Estructura Tanque porta Probetas

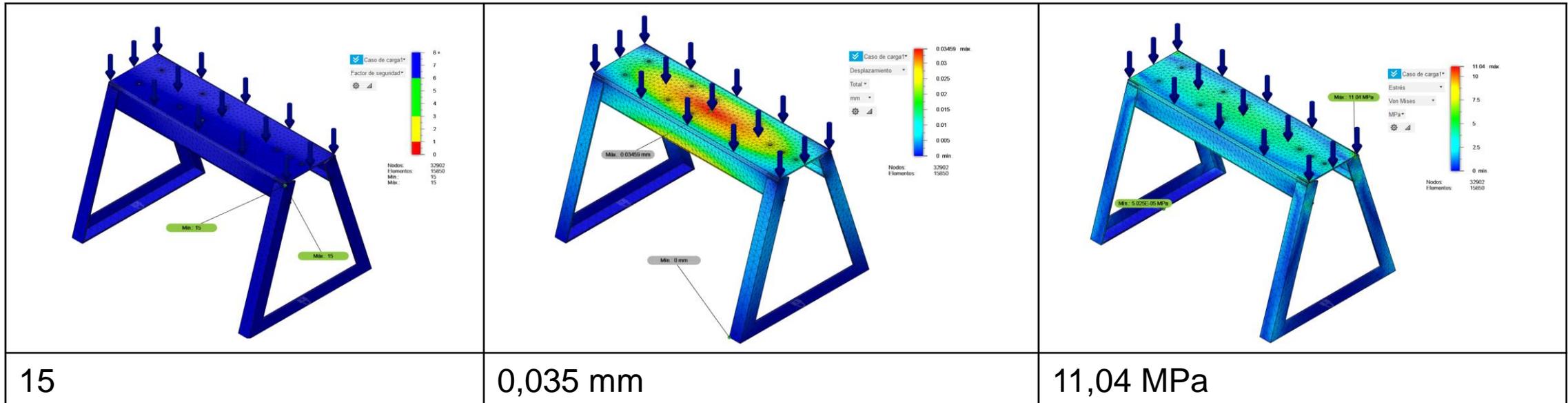
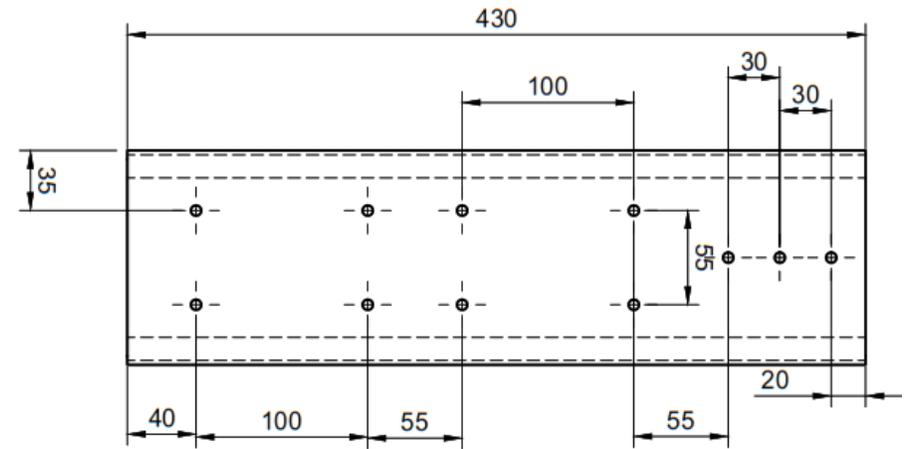
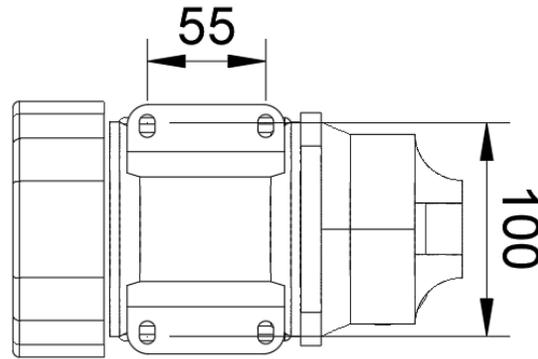
Componente	Fuerza aplicada [N]
Tanque porta probetas	515
Volumen de agua máximo	1080
Probeta	5
Porta Probetas	15
Porta Termocuplas	5
Total	1620



# Desarrollo

## Estructura soporte bombas

Restricciones de diseño:



15

0,035 mm

11,04 MPa



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

# Desarrollo

## Soporte Filtro Bombas

Restricciones de diseño:



Figura 2. Filtro Rotoplas

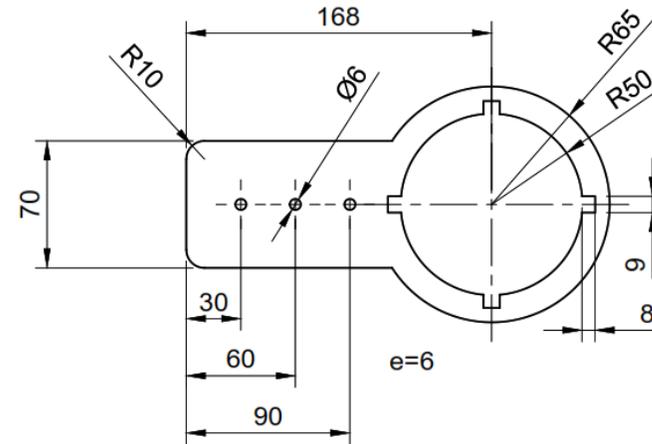


Figura 3. Base para Filtro

La geometría y dimensiones fueron adaptadas de la llave para abertura que posee el filtro, se adoptó el soporte para acoplarlo a la estructura soporte de las bombas.

## *Diseño del porta probetas*

Para el dimensionamiento y ubicación de las termocupas se consideró la geometría del tanque y de la probeta del experimento, además de la guía donde estará dispuesta la probeta denominada “porta termocupas” que estará sujeta al tanque mediante dos espárragos guías, con las dimensiones que se especifican a continuación:

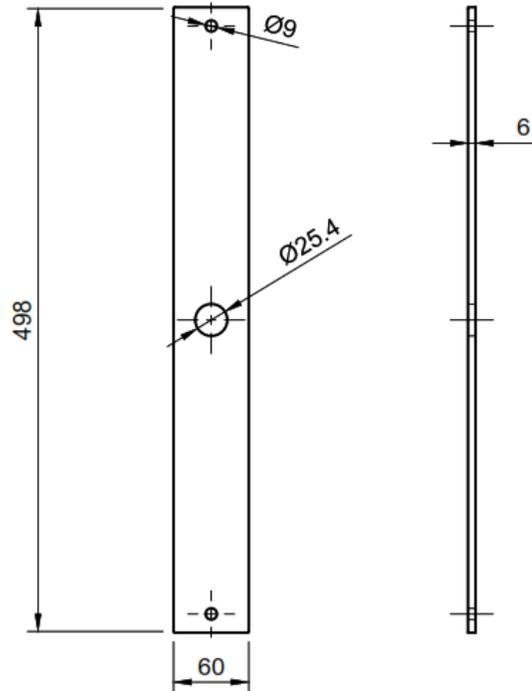


Figura 4. Geometría porta probetas

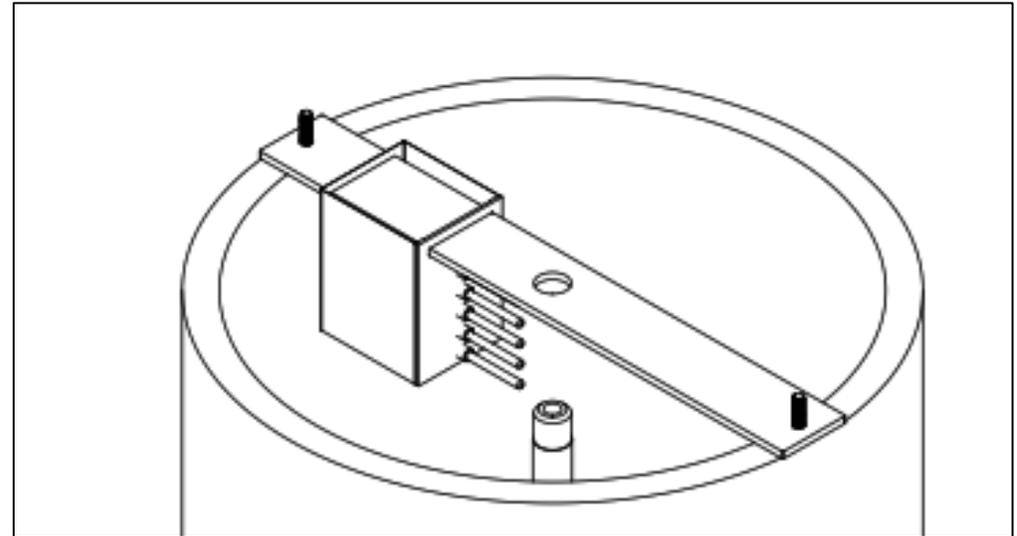


Figura 5. Disposición Tanque y porta probetas

## *Diseño del porta termocuplas*

Las dimensiones y la geometría de las termocuplas determinaron instalar 6 sensores en contacto directo con la probeta como se muestra en el esquema, además se detallan los elementos que interfieren en el contacto de las termocuplas con la probeta.

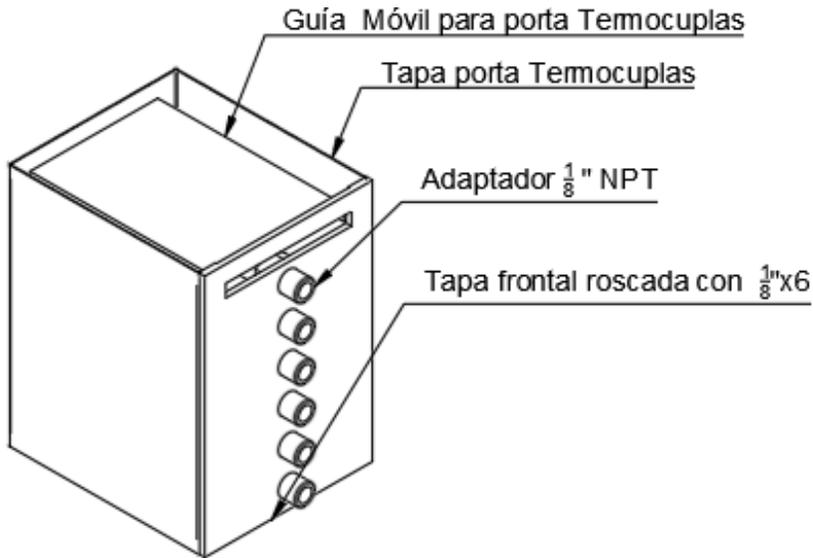


Figura 6. Geometría porta termocuplas

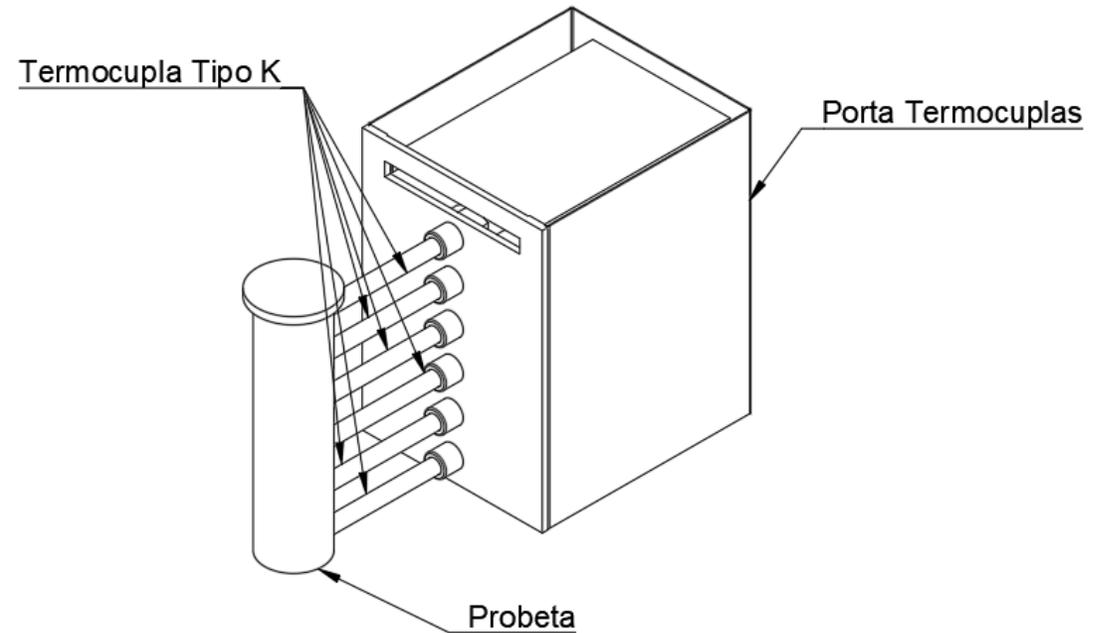


Figura 7. Esquema porta termocuplas en contacto con la probeta

## Diseño Hidráulico

### Selección Bomba

Parámetro	Ponderación	Bomba 1/2 HP Pedrollo	Bomba 1/2 HP Tritón
Disponibilidad en el mercado	5	5	5
Costo del equipo	5	3	5
Funcionalidad	5	5	4
Prestigio	5	5	3
<b>Total</b>	20	18	17

**ELECTROBOMBA PERIFERICA**



... the spring of life

PK

La bomba periférica confiable, fácil de usar y económica. Ideal para la distribución del agua con pequeños tanques de presión, para riego de huertos, jardines, etc. La bomba se debe proteger de factores eléctricos y la intemperie.





Impulsor en Bronce de acople estrado

**Límites de empleo:**  
Temp. del líquido: -10 °C a +60 °C  
Temp. ambiente hasta +40 °C  
Altura aspiración hasta 8 m.  
Funcionamiento continuo S1

**Características**  
Tipo Agua: Limpia  
Aplicación: doméstic  
o  
Uso: Superficie

CODIGO ECUAIMCO	MODELO	POTENCIA (HP)	VOLTAJE-FASE	MAX AMP	SUCC / DESC (PULG)	Q ==>	m3/h lpm							USO	
								0	0.3	1.5	3.0	3.6	4.2		
07731	PKm60-MD	0.5	110V MONOF	6.5				30	29	20.5	9.5	5			GEN
03896	PKm65	0.75	110V MONOF	11.5	1 x 1	H ==>	m.	55	50	31	8				GEN
03898	PKm80	1.0	110V MONOF	13.0				70	66	46	22				GEN
03899			220V MONOF	6.5											GEN
03892	PKm100	1.5	220V MONOF	9.0				85	80	60	35	25	15		GEN

Figura 8. Especificaciones de la bomba Pedrollo

(Pedrollo, 2020)

## Selección de accesorios

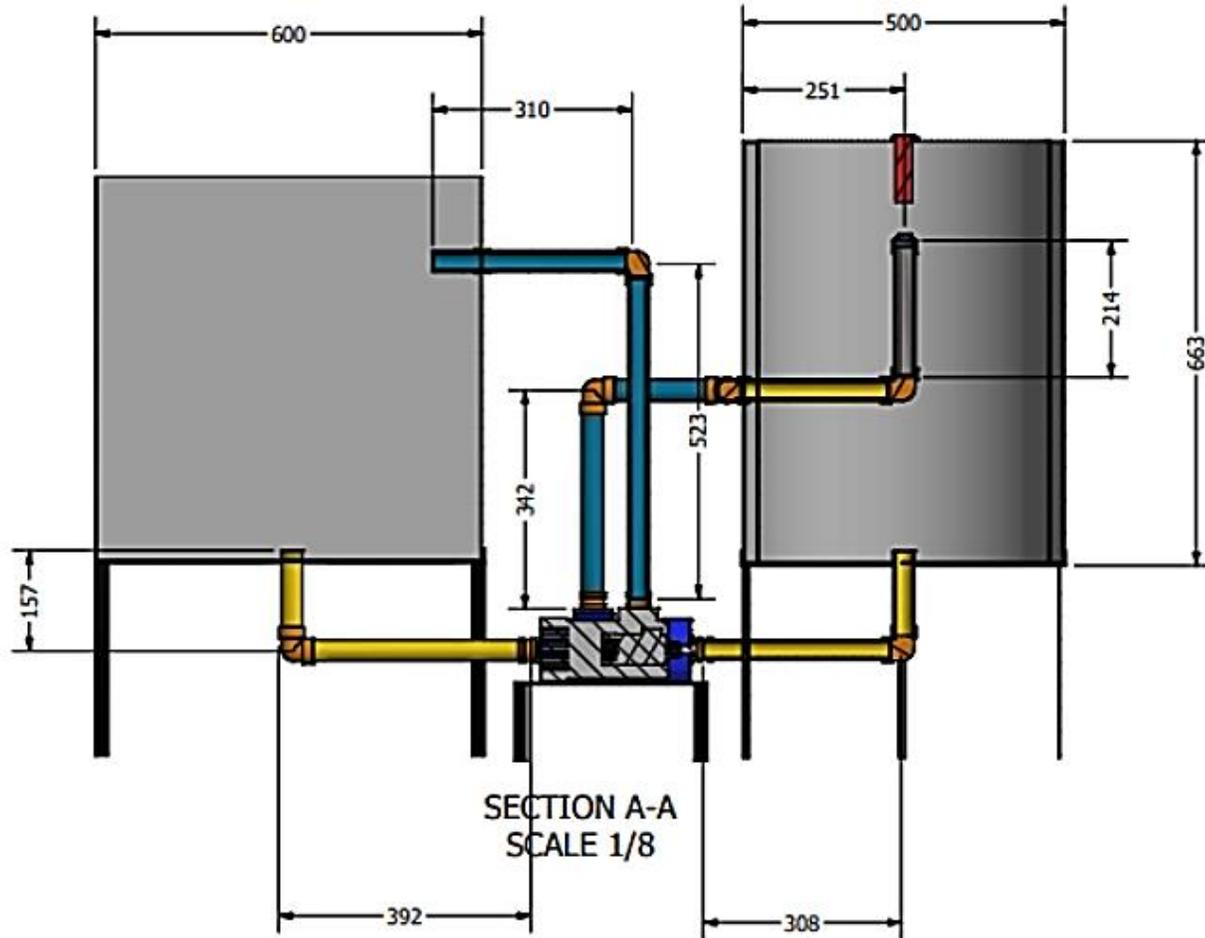


Figura 9. Diseño preliminar

### Accesorios empleados

Codo soldable  $\frac{3}{4}$ "

Codo roscable  $\frac{3}{4}$ "

Válvula de Bola de  $\frac{3}{4}$ "

2 codos roscables de 1"

3 válvulas de bola de 1"

3 reductores de 1" a  $\frac{3}{4}$ "

# Desarrollo

## Selección del sistema de tubería

Parámetro	Ponderación	Tubería	Mangueras
		PVC	Hidráulicas
Disponibilidad en el mercado	5	5	4
Costo del equipo	5	5	3
Funcionalidad	5	4	5
Vida útil	5	3	5
Portabilidad	5	3	5
Desmontaje	5	3	5
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>23</b>	<b>27</b>

Como nuestro caudal tiene un valor de 2.2412 gal/min y en la gráfica el mínimo es de 10 gal/min, procedemos a escoger las siguientes tuberías:

Línea de succión: 1"

Línea de descarga 3/4"

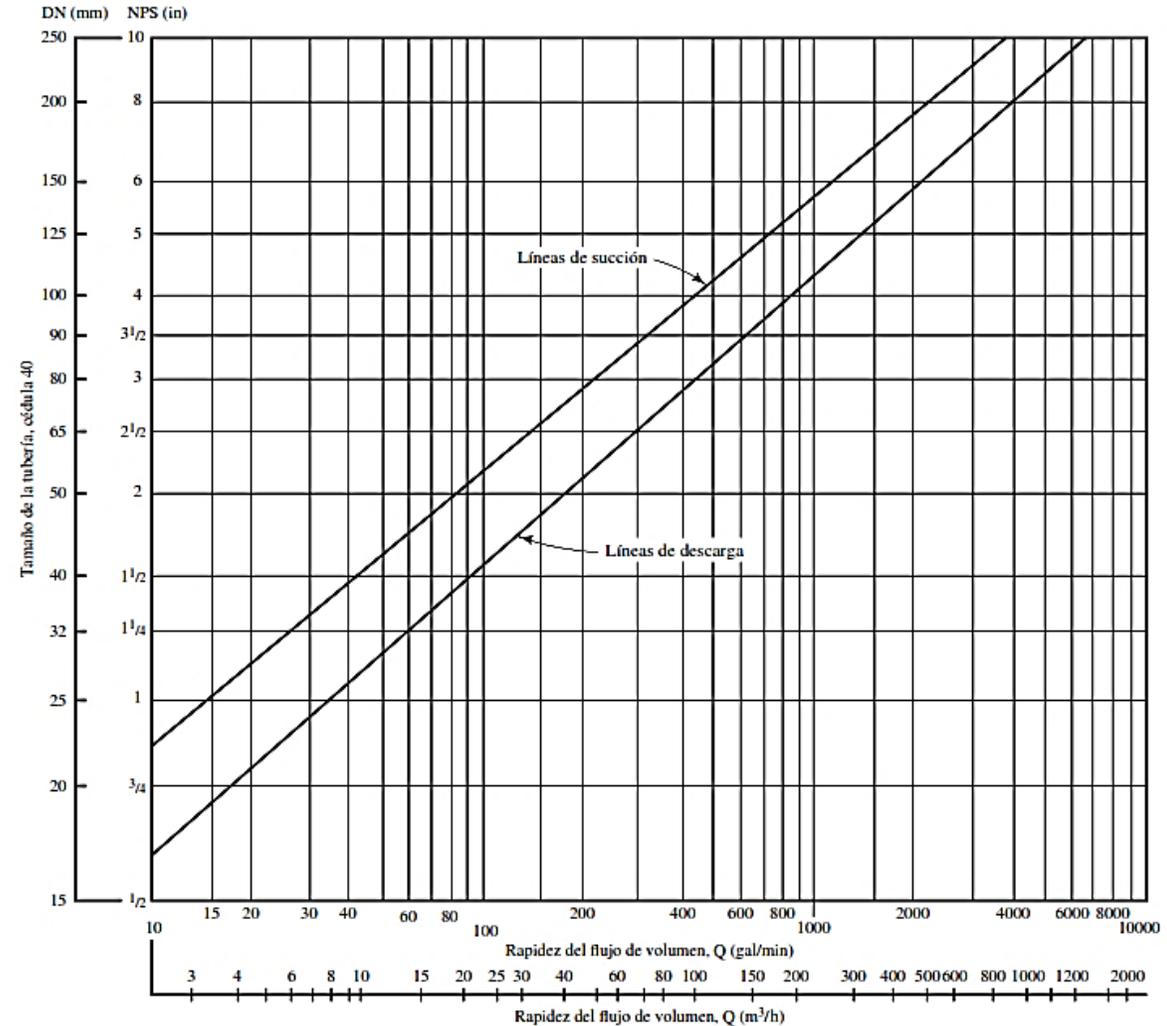


Figura 10. Selección tamaño de tubería vs Caudal

# Desarrollo

## *Cálculo de la tobera de reducción*

Dado que el diámetro de la tubería de descarga es de 3/4" se debe realizar una reducción con una tobera, la cual debe ser diseñada en base a la altura del chorro, conicidad, fricción, etc.

Para una tubería de 3/4 las dimensiones son:

TUBO REDONDO INOXIDABLE 304 ACABADO N4 PULIDO 6 MTS				
DIMENSIONES			PROPIEDADES	
plg	mm	ESPESOR mm	PESO Kg/mt	PESO Kg/6mt
3/4"	19,1	1	0,45	2,71
3/4"	19,1	1,2	0,54	3,21
3/4"	19,1	1,5	0,66	3,95
3/4"	19,1	2	0,85	5,11

En este caso seleccionamos tubería de 1 mm de espesor

Diámetro exterior: 19.1 mm

Diámetro interior: 17.1 mm

## Conicidad de la tobera

Para el diseño de la tobera de reducción se analiza como un conducto de contracción suave, para lo cual el grado de conicidad se determina por la ecuación:

$$k = \frac{L}{(D_{tobera} - d_{tobera})} = \frac{1}{2 * tg(\theta)} \quad (7)$$

Donde:

$k$ : Grado de conicidad de la boquilla

$\theta$ : Abertura del cono.

$L$ : Longitud de la boquilla (25.4mm)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D_{tobera} - d_{tobera}}{2L}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

$$\theta = 6.068^\circ$$

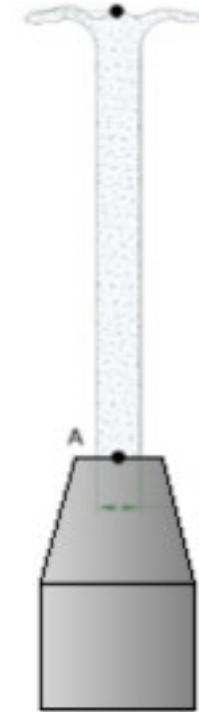


Figura 11. Esquema chorro de agua (2 1/2")

# Desarrollo

## Selección de Filtro

Parámetro	Ponderación	Filtro		
		Rotoplas FES-01	Filtro Hydronix	Filtro Filtropur
Disponibilidad en el mercado	5	5	4	4
Costo del equipo	5	5	3	4
Funcionalidad	5	4	5	4
Capacidad de filtrado	5	4	5	4
Portabilidad	5	5	5	5
Desmontaje	5	5	4	5
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>26</b>



Figura 12. Filtro Rotoplas

## Selección de Caudalímetro

Parámetro	Ponderación	Caudalímetro	Caudalímetro	Caudalímetro
		FS 300A	Signet 38512	Fischer Rotor-X
Disponibilidad en el mercado	5	5	3	4
Costo del equipo	5	5	3	2
Funcionalidad	5	4	5	5
Facilidad de programación	5	4	5	5
Precisión	5	3	5	5
Montaje	5	5	3	4
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>25</b>



Figura 13. Caudalímetro FS 300A

## Diseño del sistema de adquisición de datos

Mediante la adquisición de datos podemos procesar fenómenos físicos como datos en tiempo real, pueden ser fenómenos como: temperatura, presión, voltaje, caudal, etc. Todo proceso de adquisición de datos inicia con una señal de entrada, la cual es leída por un sensor y transformada mediante un transductor o microprocesador para ser procesada y mostrada en una interfaz gráfica, empleando cualquier HMI requerido.

Matriz de decisión Tarjeta de adquisición de datos

Parámetro	Ponderación	Arduino	DAQ NI USB-
		Mega 2560	6009
Disponibilidad en el mercado	5	5	4
Costo del equipo	5	5	3
Funcionalidad	5	5	5
Confiabilidad	5	3	4
Programación	5	5	3
Manejo de datos	5	4	5
<b>Total</b>	30	27	24

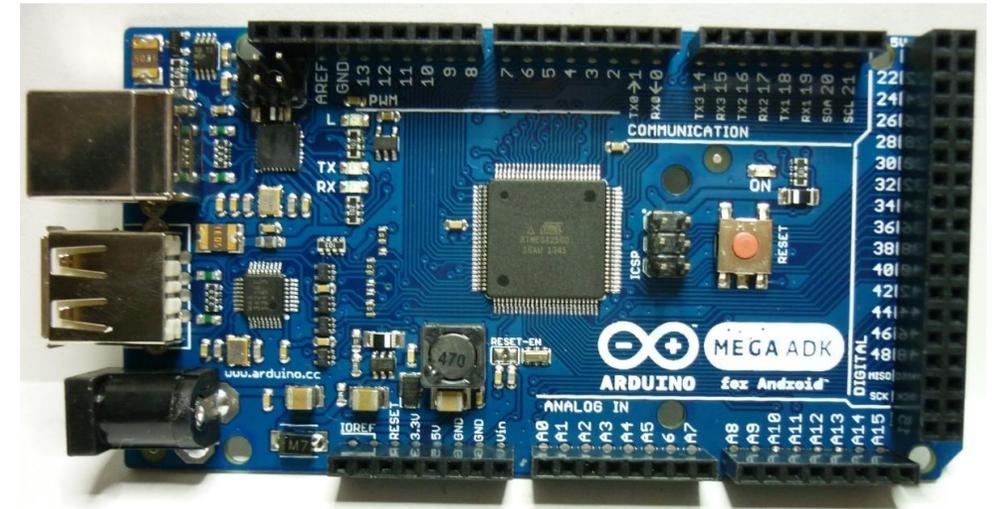


Figura 14. Arduino Mega 2560

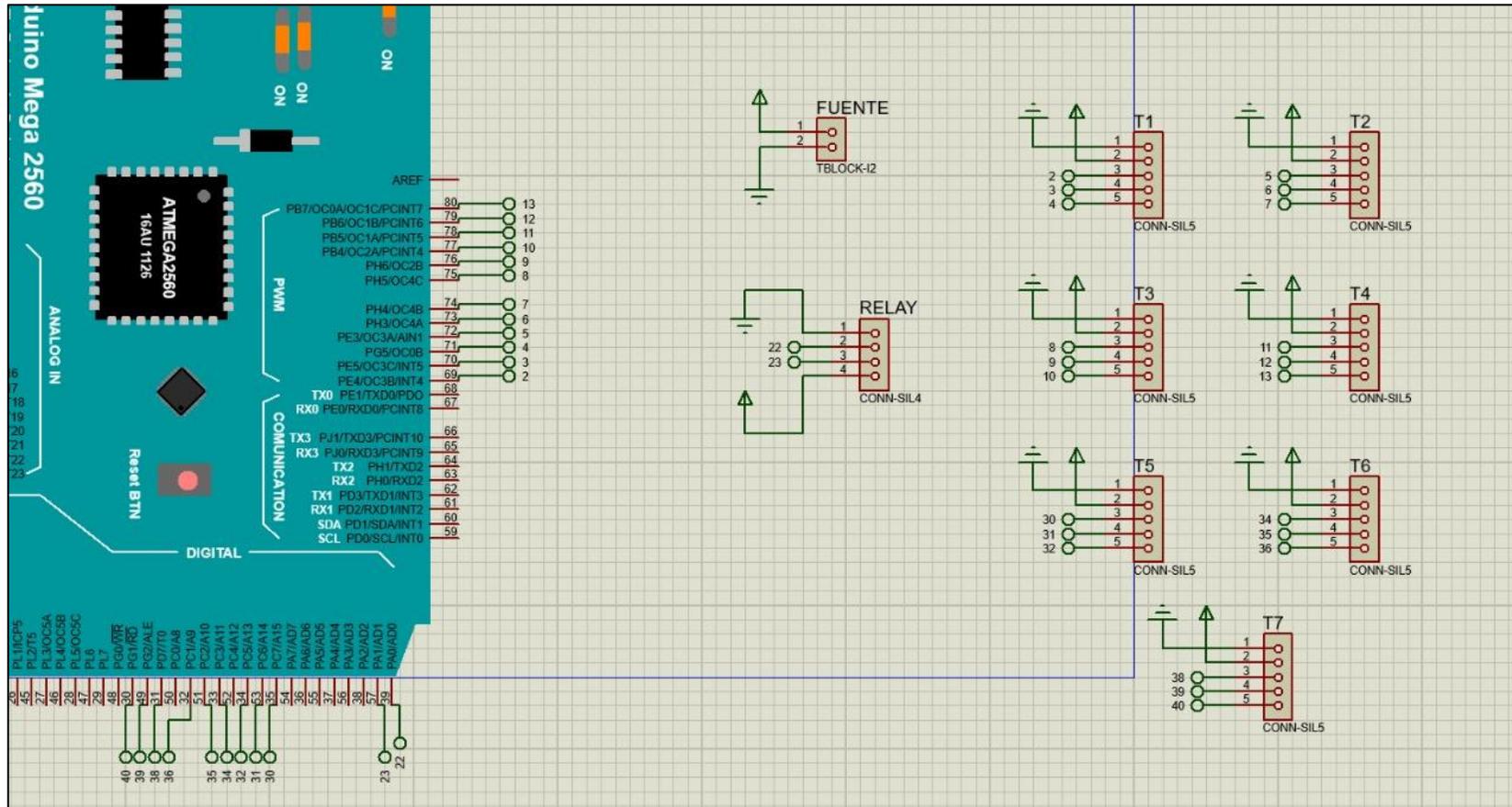


Figura 15. Esquema electrónico de placa de control

## Diseño de placa

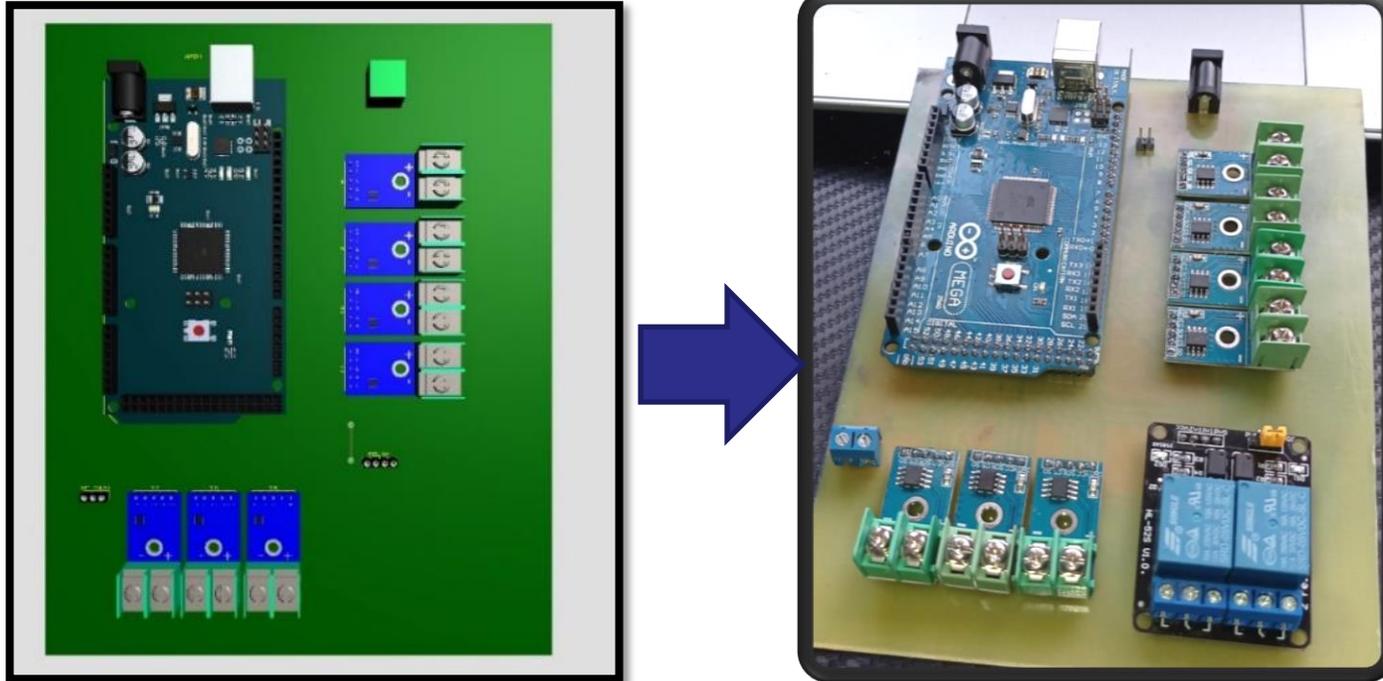


Figura 16. Esquema placa de control

Elemento	Pines de conexión a arduino	
Jack de voltaje DC	pin	5
Modulo MAX 6675 – Termocupla 1	SCL	13
	CS	12
	SO	11
Modulo MAX 6675 – Termocupla 2	SCL	10
	CS	9
	SO	8
Modulo MAX 6675 – Termocupla 3	SCL	7
	CS	6
	SO	5
Modulo MAX 6675 – Termocupla 4	SCL	4
	CS	3
	SO	2
Modulo MAX 6675 – Termocupla 5	SCL	27
	CS	29
	SO	31
Modulo MAX 6675 – Termocupla 6	SCL	33
	CS	35
	SO	37
Modulo MAX 6675 – Termocupla 7	SCL	39
	CS	41
	SO	43
Módulo Relay SSR 2 canales	Int 1	23
	Int 2	25

# Desarrollo

## Diseño del sistema de control

Para la automatización y control de las 2 bombas periféricas es necesario un módulo Relay SSR de 2 canales para controlar independientemente cada bomba, ya que directamente las salidas de arduino no permiten controlar cargas de fuerza que consuman corriente excesiva para el controlador

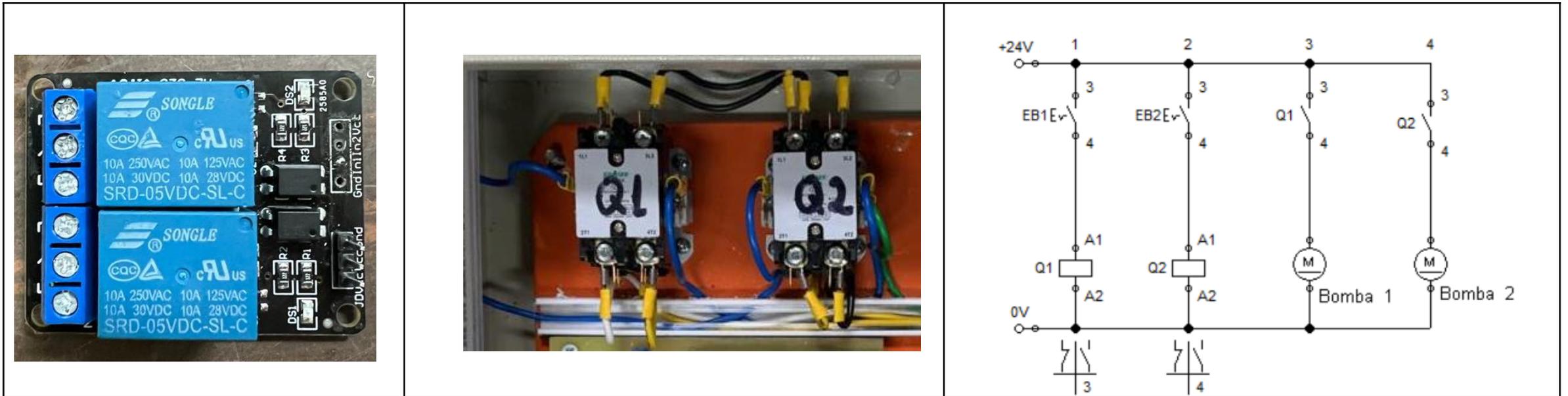


Figura 17. Sistema de control de bombas

## Instrumentación

Para la medición de temperaturas es necesario el uso de sensores que permitan la comunicación de señal analógica a digital.

### *Sensores de temperatura – Termocuplas tipo K*

Para las condiciones presentadas en el proyecto se emplearon termocuplas tipo K, las cuales cumplían con los requisitos de temperatura máxima de trabajo, apreciación y costo.

Características	Descripción
Marca	LZONE – CGQ01
Color	Plateado
Material	Inconel 600
Tamaño	0.6 x 7.5 mm
Largo total	2000 mm
Adaptador	1/8 NPT
Temperatura máxima de trabajo	1000 °C
Apreciación	0.25 °C

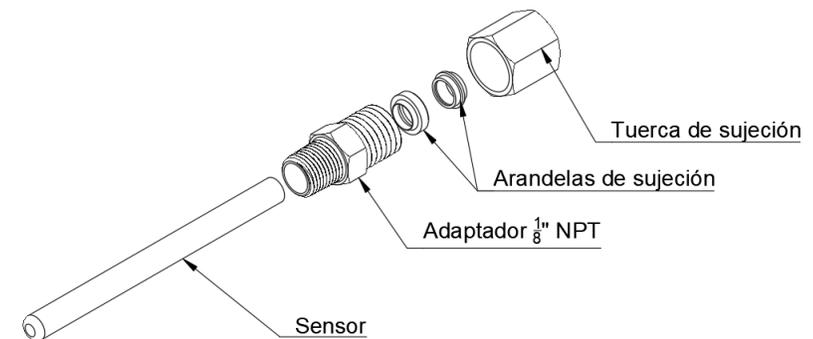


Figura 18. Esquema Termocupla tipo K

# Desarrollo

## Metodología

### Ensayo Jominy de los aceros AISI 4340, AISI 1045

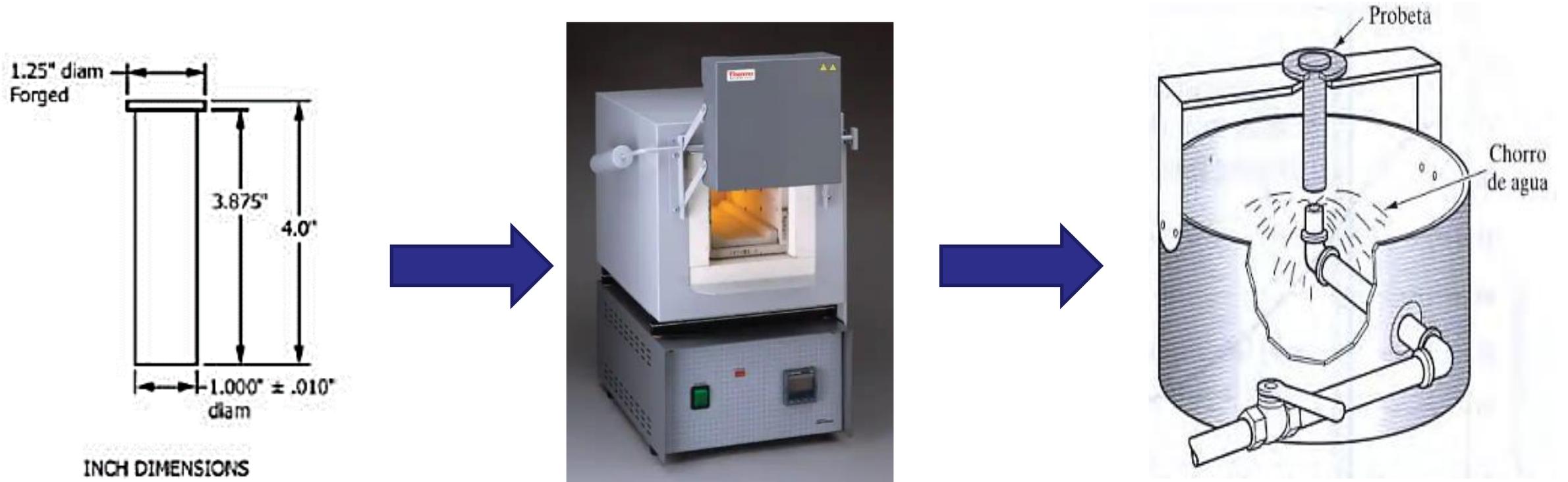


Figura 19. Proceso del ensayo Jominy

**Tabla 1** Temperaturas de Normalizado y Austenización Norma ASTM A255-10

<b>Grupo de Aceros</b>	<b>Contenido máximo de carbono, %</b>	<b>Temperatura de Normalizado °C</b>	<b>Temperatura de Austenización °C</b>
1000,1300,1500,3100,4000,4100	0.25 e inferiores	925	925
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000	0.26 a 0.36, incluido	900	870
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.37 y superiores	870	845
	0.25 e inferiores	925	845
	0.26 a 0.36, incluido	900	815

Nota: Tomado de (ASTM International, 2014)

## Medición de dureza Rockwell en base a la Norma ASTM E18-15

Se tomaron mediciones de dureza como explica la norma ASTM A 255-10, cada 1/16 de pulgada a lo largo de la primera pulgada y después a los 18,20,22,24,28, y 32 dieciseisavos de pulgada.

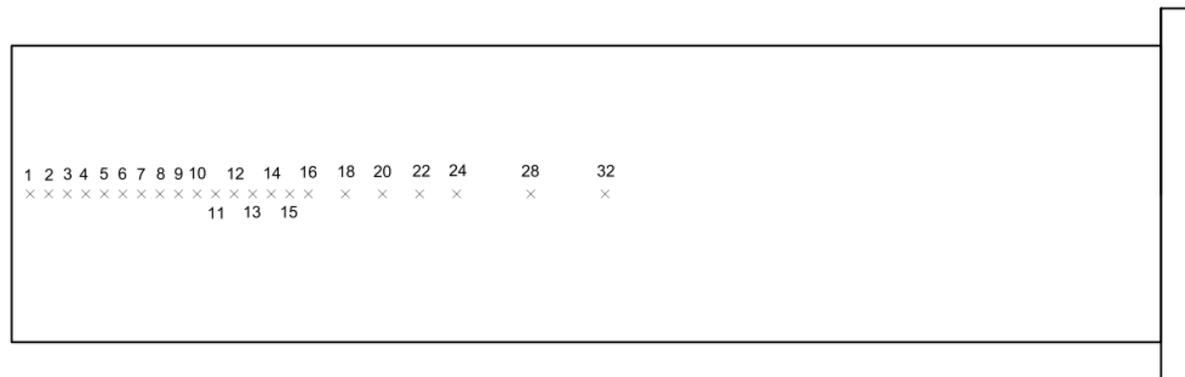


Figura 20. Puntos para medición de dureza

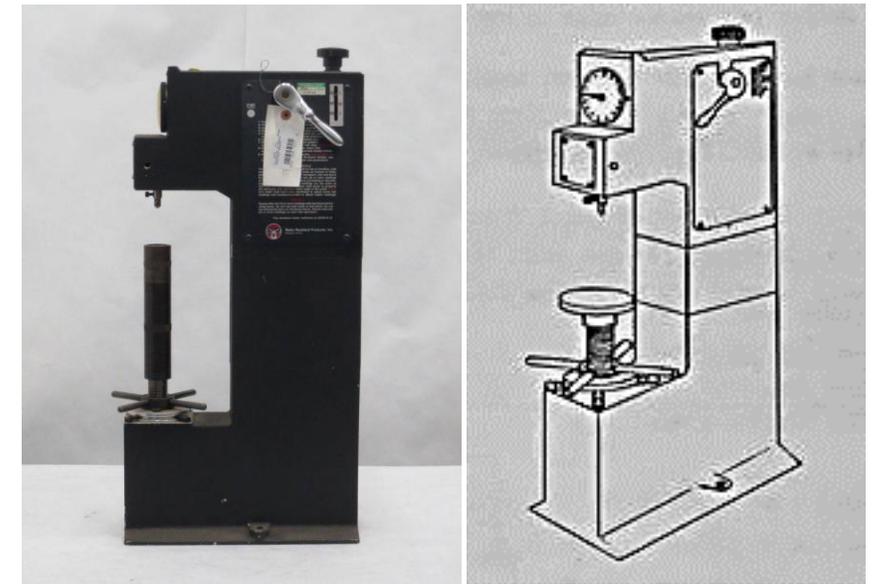


Figura 21. Durómetro Rams Rockford

# Análisis de Resultados

## AISI 4340 / Dureza expuesta en la bibliografía 58 HRC

Punto	Distancia (in)	Dureza Rockwell (HRC)			
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
1	1/16	54	56	56	55.33
2	2/16	53	55	56	54.67
3	3/16	52	55	54	53.67
4	4/16	52	54	53	53
5	5/16	52	54	52	52.67
6	6/16	51	54	53	52.67
7	7/16	50	53	53	52
8	8/16	50	53	53	52
9	9/16	49	52	52	51
10	10/16	49	52	51	50.67
11	11/16	48	51	51	50
12	12/16	48	50	50	49.33
13	13/16	46	49	50	48.33
14	14/16	44	48	49	47
15	15/16	44	46	49	46.33
16	16/16	43	45	49	45.67
17	18/16	42	43	48	44.33
18	20/16	41	40	48	43
19	22/16	38	39	47	41.33
20	24/16	35	37	46	39.33
21	28/16	32	33	43	36
22	32/16	32	32	36	33.33

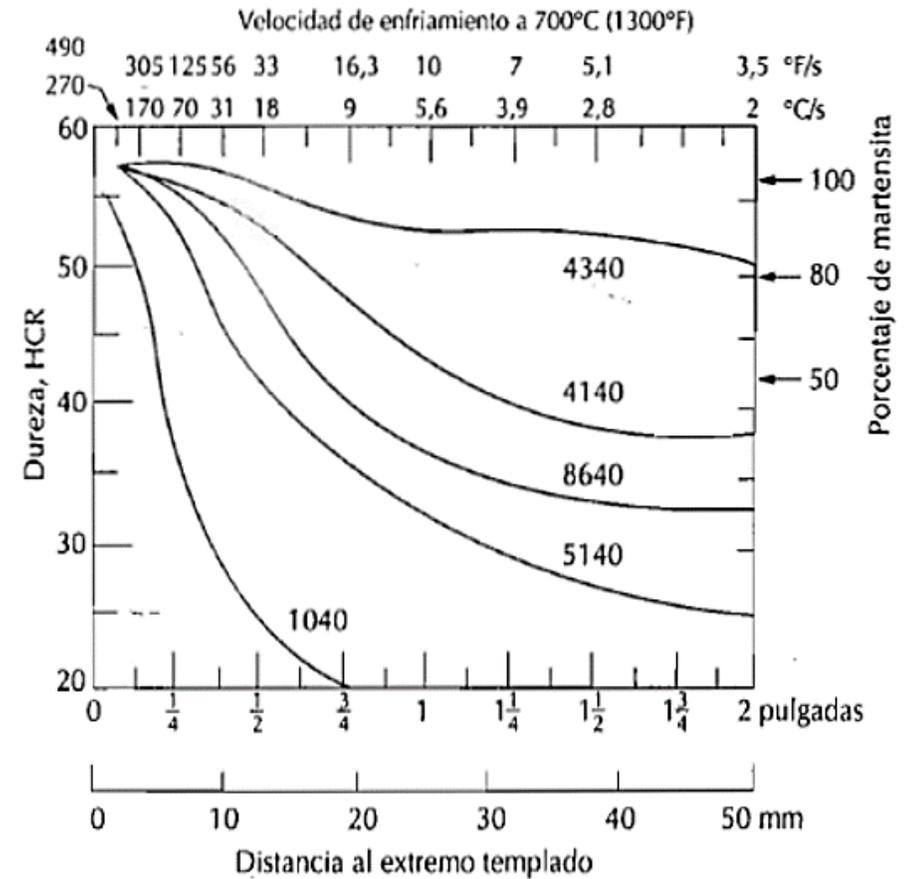


Figura 22. Dureza teórica de distintos aceros

# Análisis de Resultados

## AISI 4340 / Dureza expuesta en la bibliografía 58 HRC

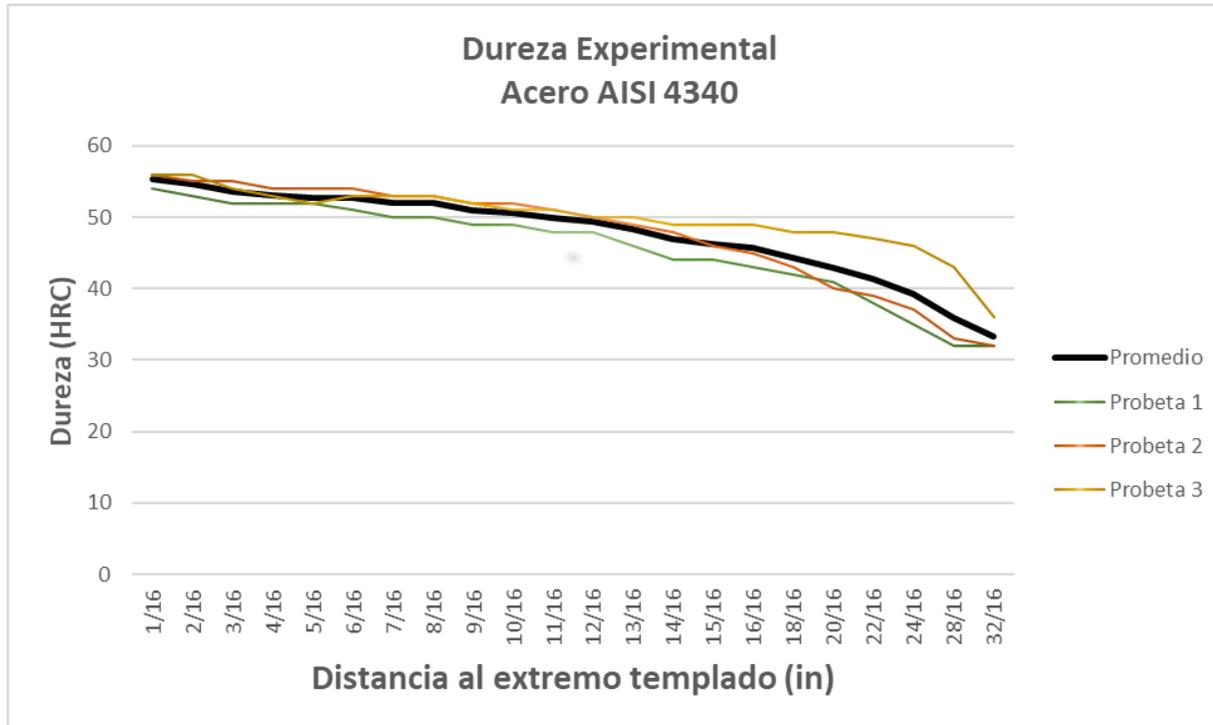


Figura 23. Dureza Experimental AISI 4340

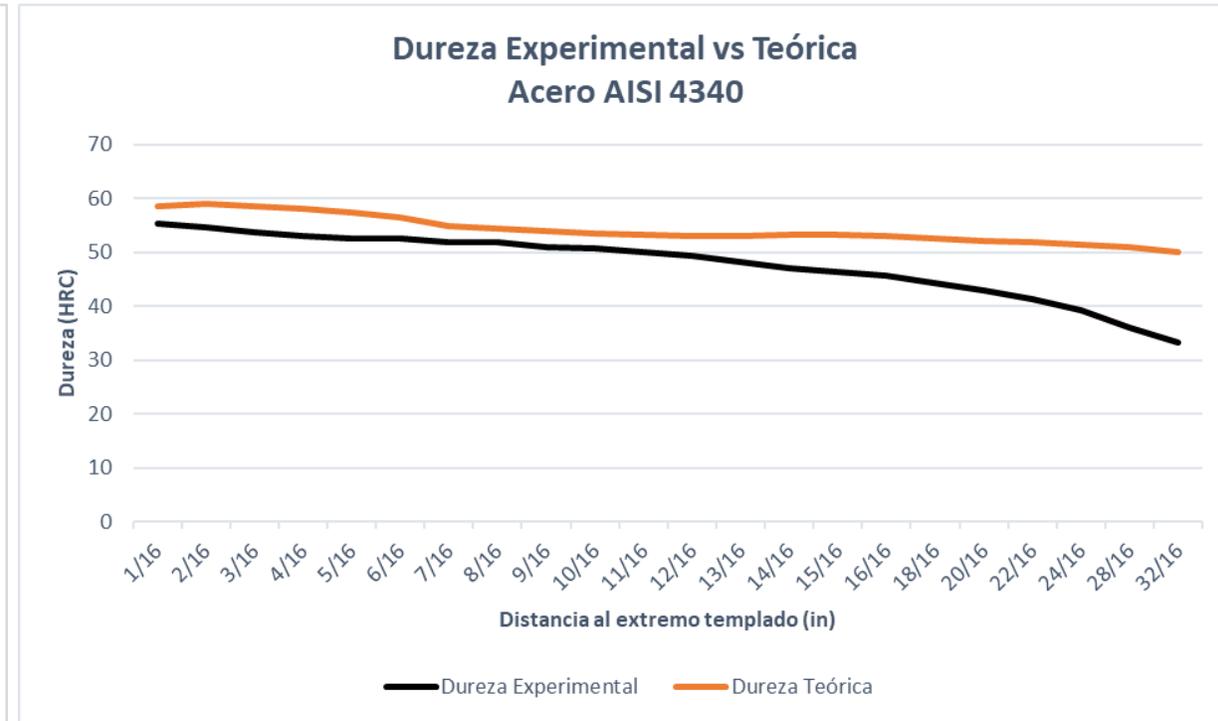


Figura 24. Dureza Experimental vs Dureza expuesta en la bibliografía AISI 4340

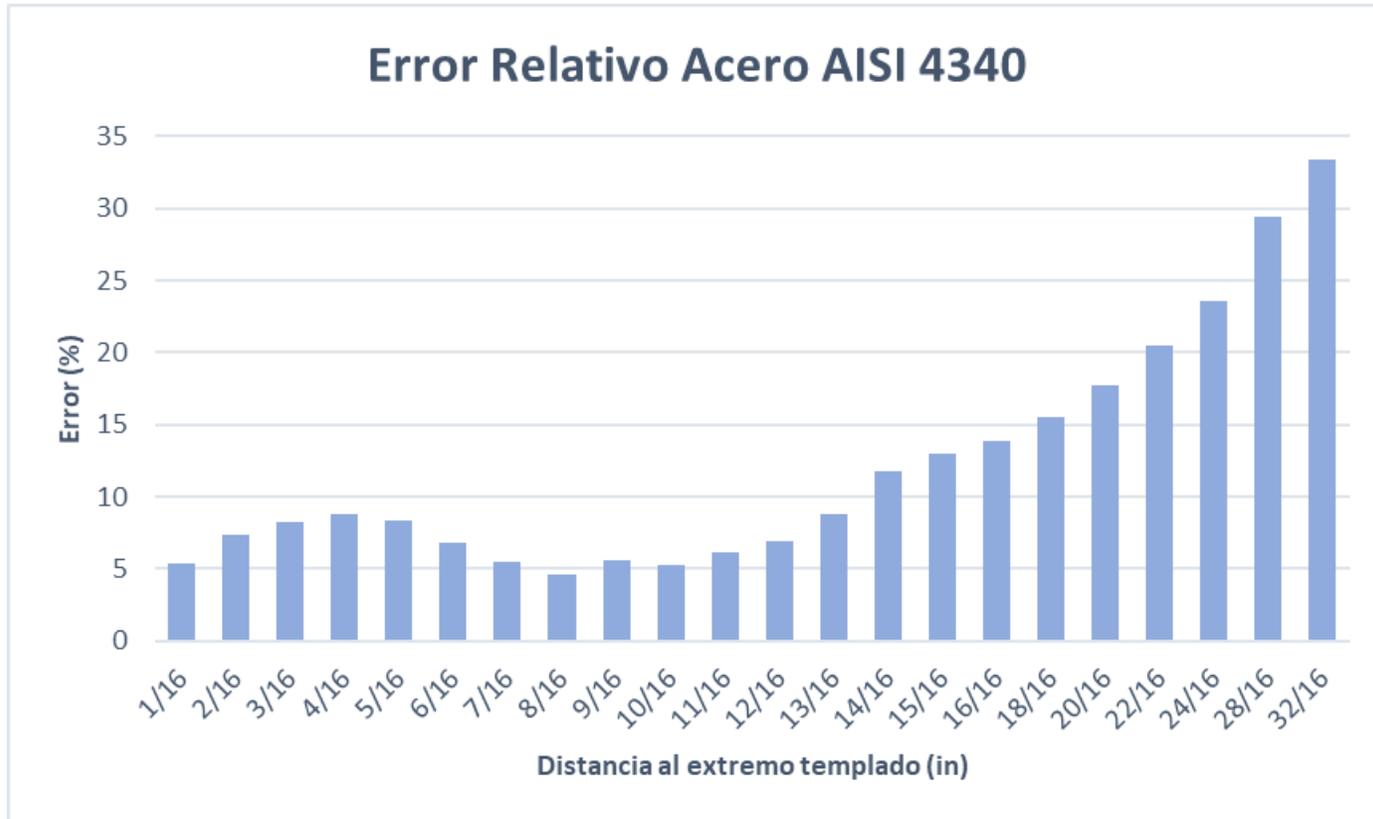


Figura 25. Error Relativo Acero AISI 4340



Figura 26. Probeta de Acero AISI 4340

# Análisis de Resultados

## AISI 1045 / Dureza expuesta en la bibliografía 61 HRC

Punto	Distancia (in)	Dureza Rockwell (HRC)			
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
1	1/16	59	58	56	57.7
2	2/16	53	54	54	53.7
3	3/16	49	47	44	46.7
4	4/16	47	46	43	45.3
5	5/16	43	45	40	42.7
6	6/16	41	45	37	41
7	7/16	40	38	31	36.3
8	8/16	39	34	29	34
9	9/16	39	32	28	33
10	10/16	36	27	24	29
11	11/16	33	25	23	27
12	12/16	26	22	21	23
13	13/16	24	19	22	21.7
14	14/16	23	20	21	21.3
15	15/16	22	19	20	20.3
16	16/16	18	20	18	18.7
17	18/16	17	19	17	17.7
18	20/16	17	18	16	17
19	22/16	16	19	18	17.7
20	24/16	15	18	18	17
21	28/16	17	17	17	17.3
22	32/16	18	17	19	18

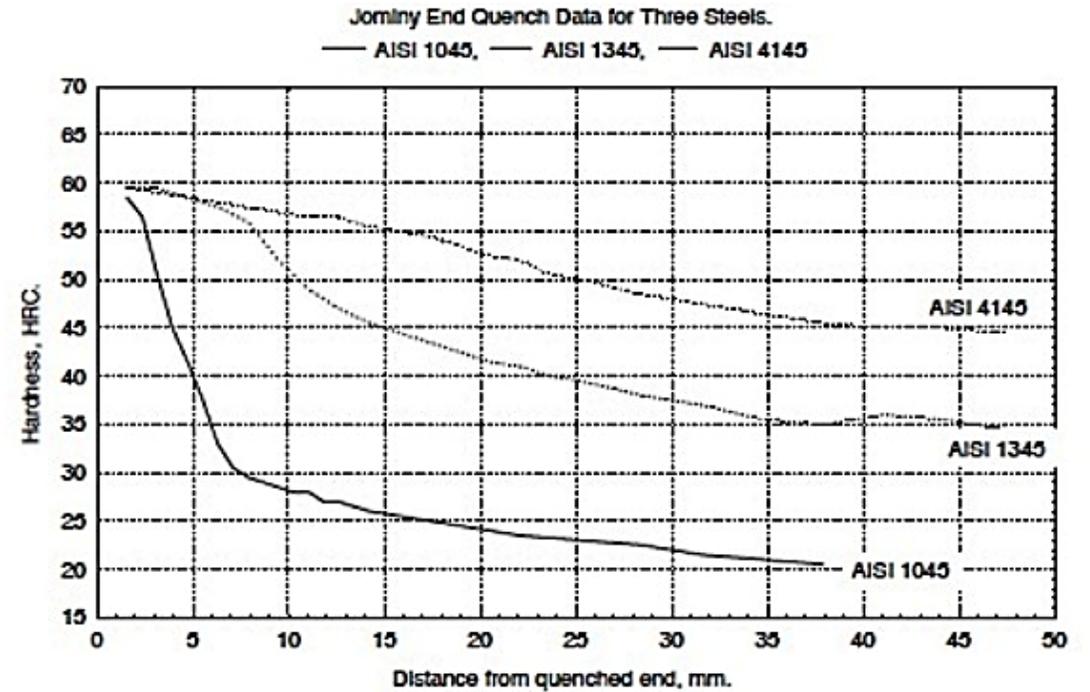


Figura 27. Dureza teórica de distintos aceros

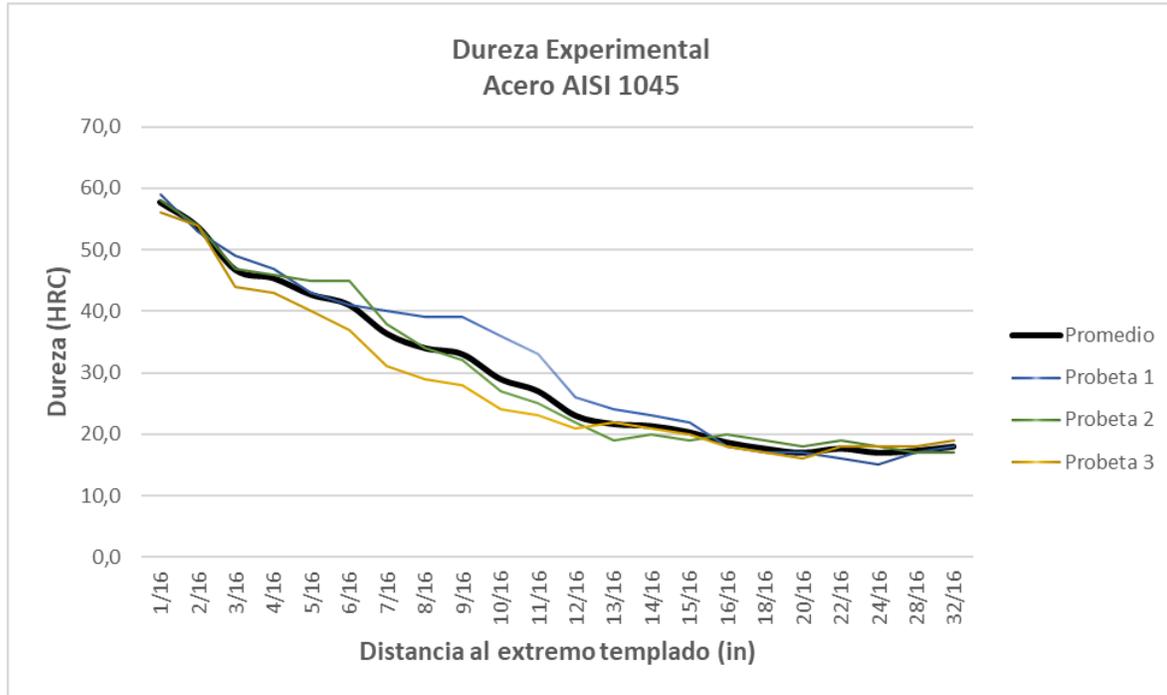


Figura 28. Dureza Experimental AISI 1045

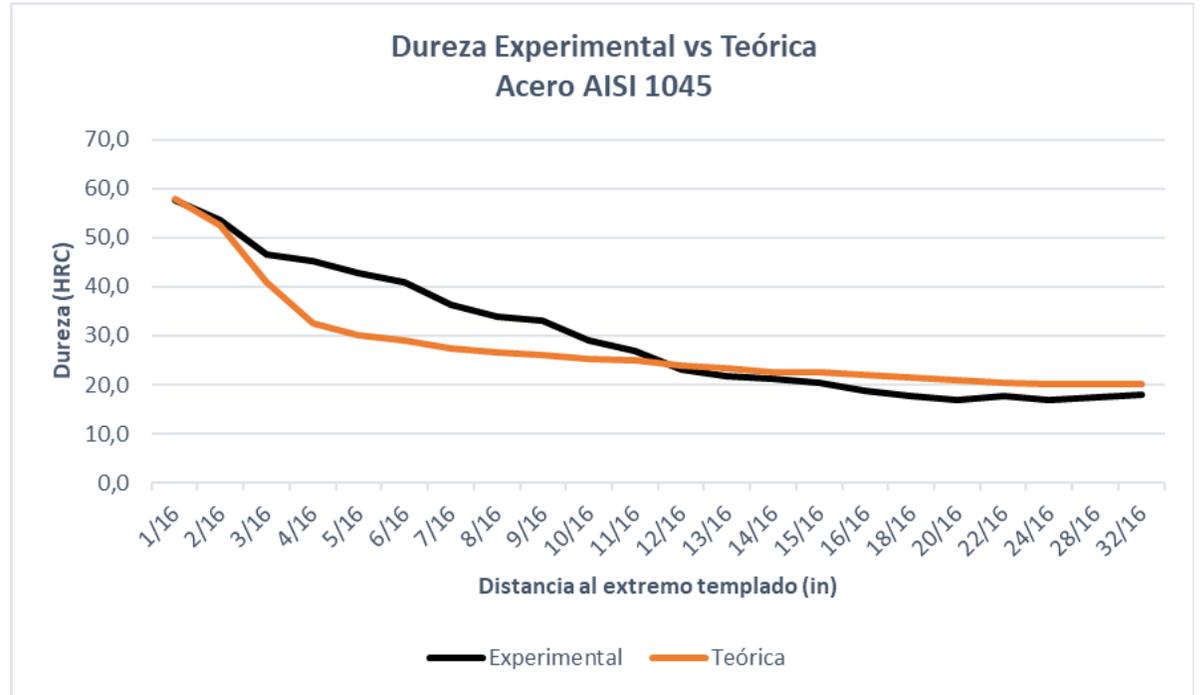


Figura 29. Dureza Experimental vs Dureza expuesta en la bibliografía AISI 1045

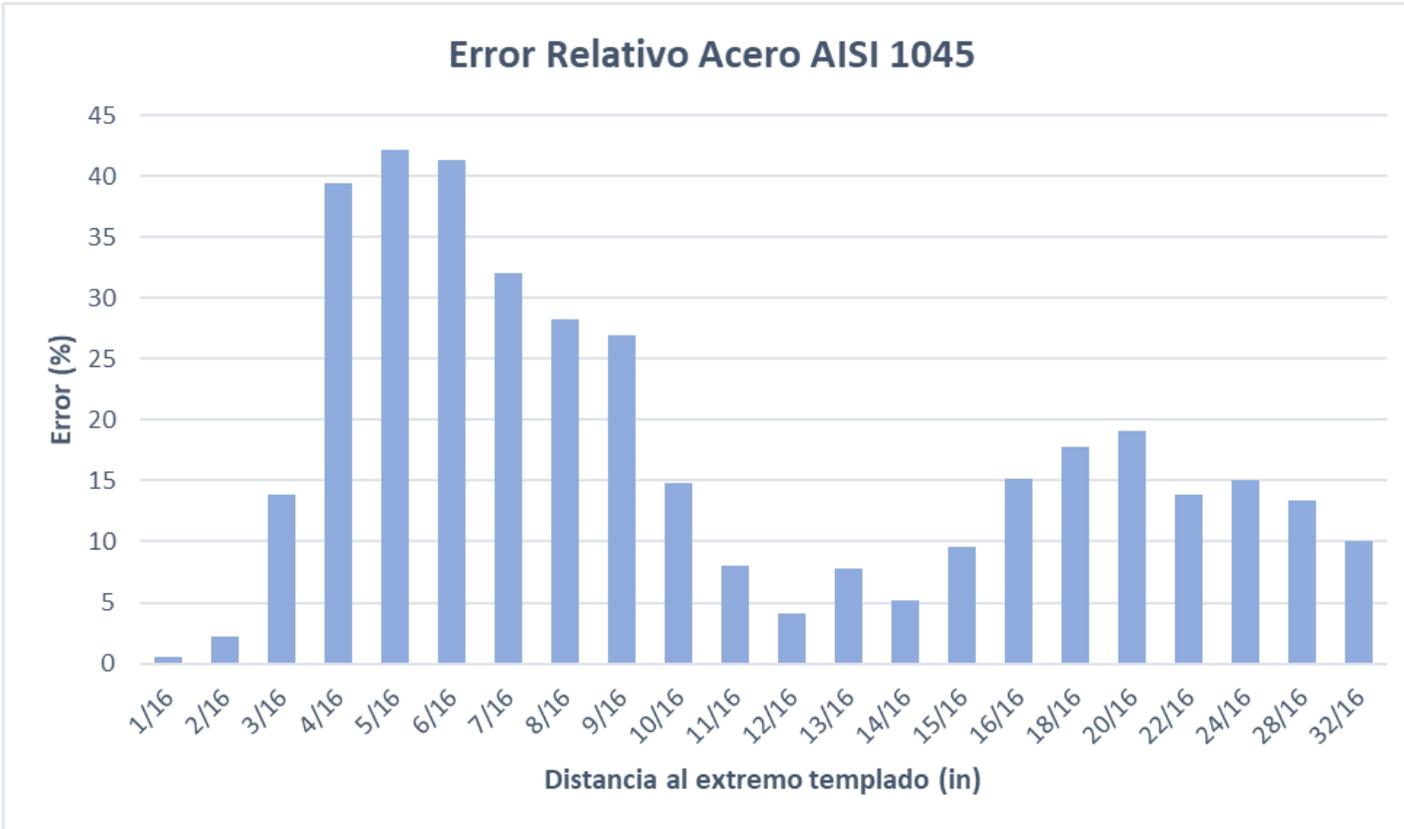


Figura 30. Error Relativo Acero AISI 1045



Figura 31. Probeta de Acero AISI 1045

# Análisis de Resultados

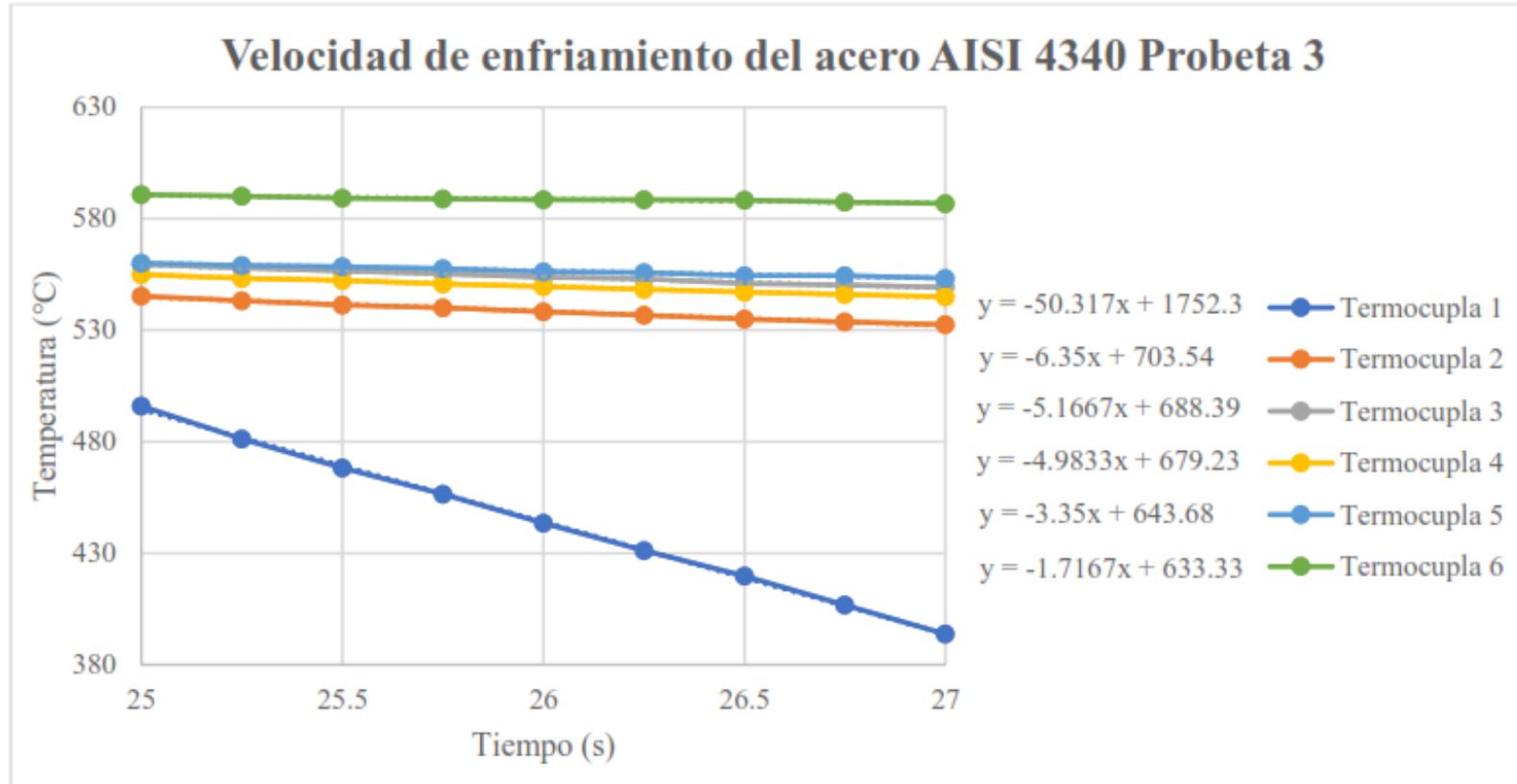


Figura 32. Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 4340

# Análisis de Resultados

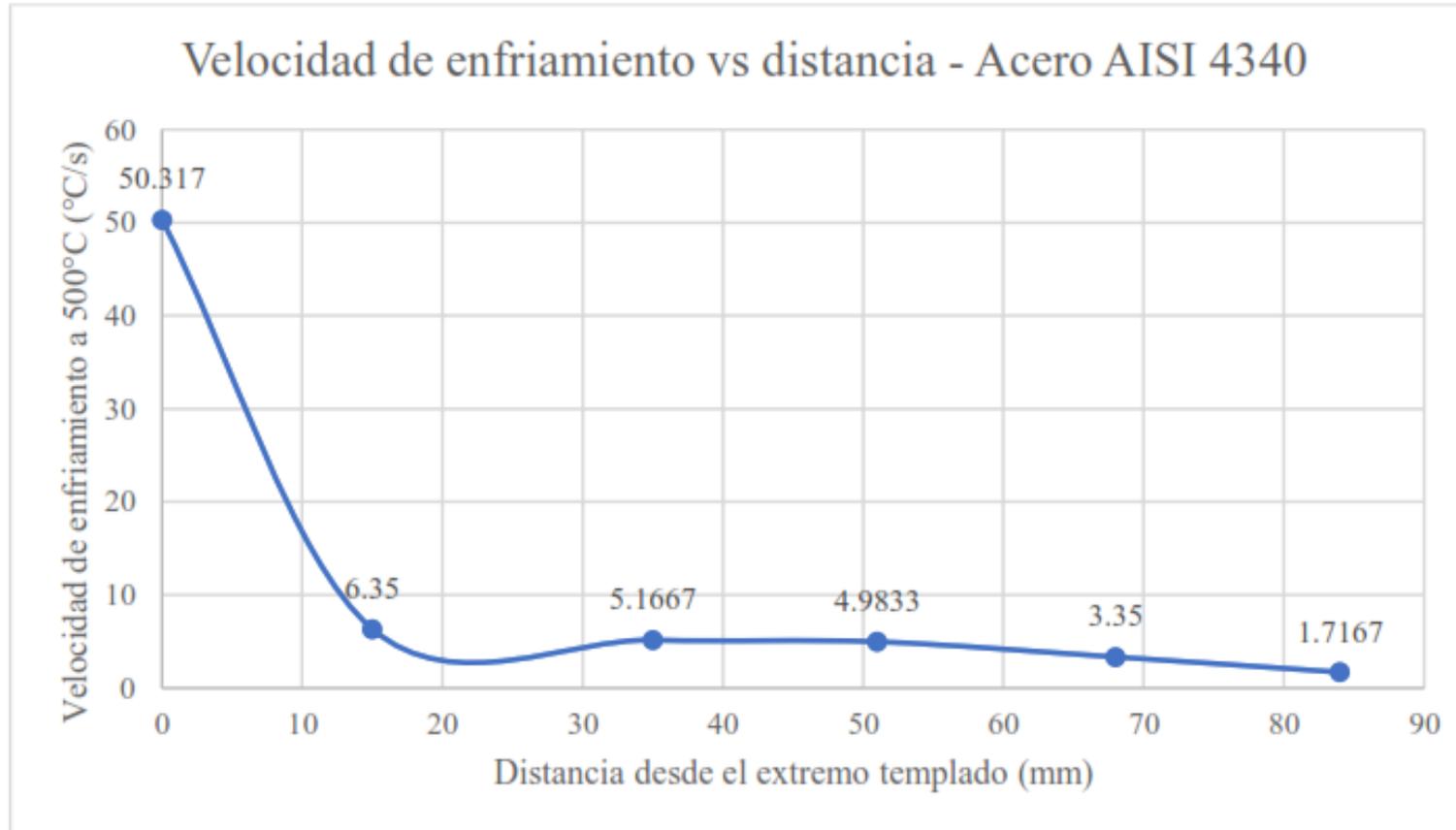


Figura 33. Velocidad de enfriamiento Acero AISI 4340

# Análisis de Resultados

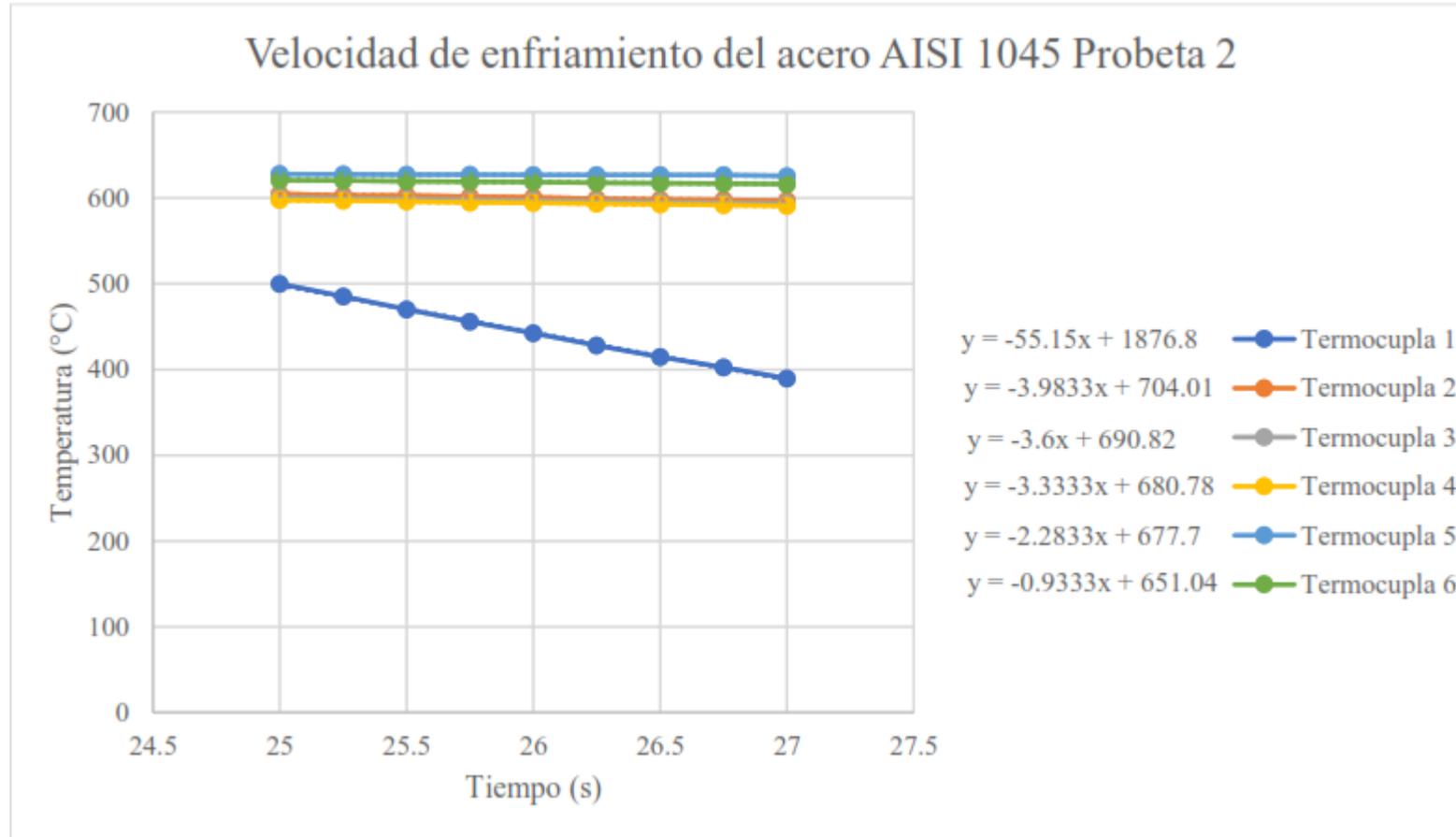


Figura 34. Velocidad de enfriamiento vs distancia - Acero AISI 1045

# Análisis de Resultados

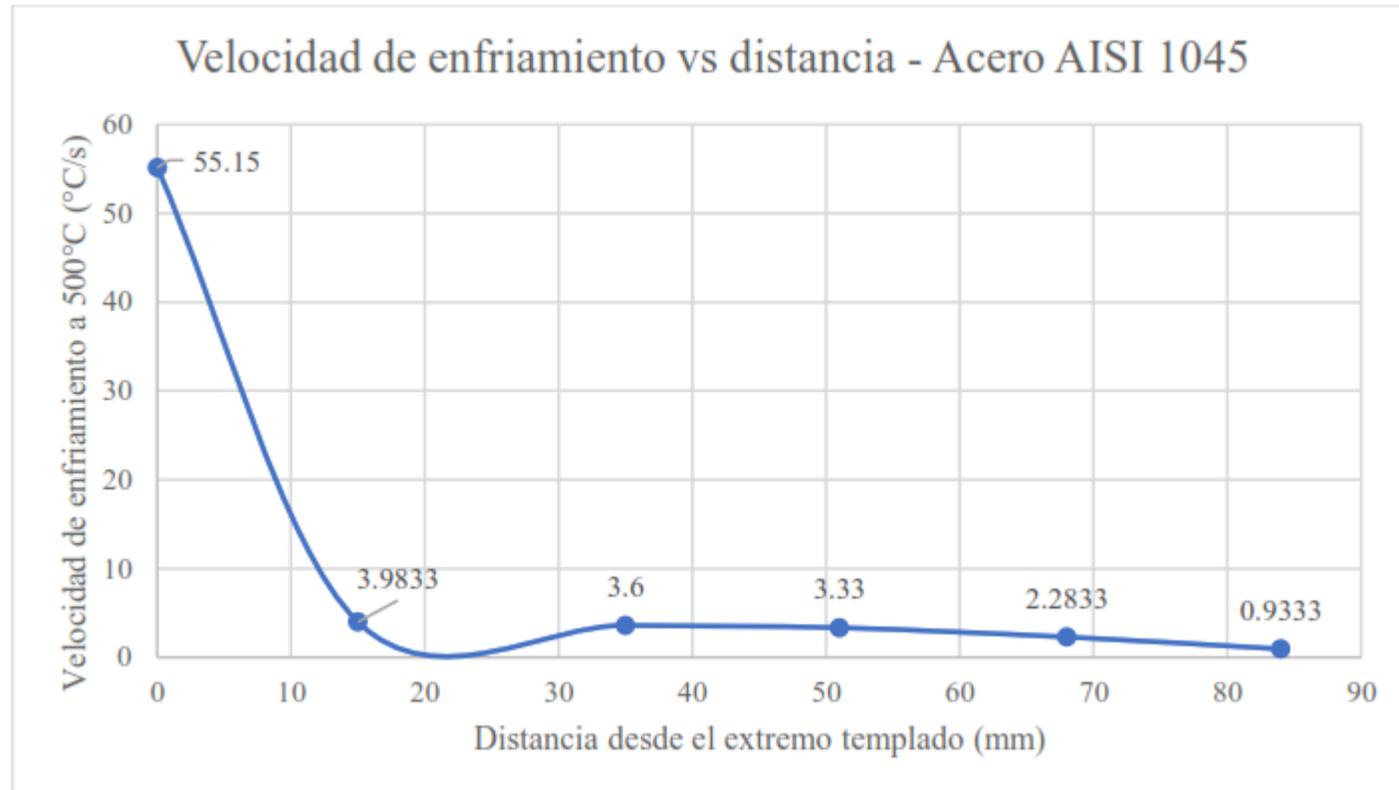


Figura 35. Velocidad de enfriamiento Acero AISI 1045

# Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones:

- Se diseñó un banco de pruebas para el ensayo Jominy según la norma ASTM A255-10, mediante el dimensionamiento, cálculo y análisis mecánico de los recipientes del experimento, selección de materiales y componentes del sistema hidráulico, a partir de las especificaciones técnicas establecidas para el uso en el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Se realizó 6 ensayos en el banco de pruebas con 2 tipos de acero, el AISI 1045 y el AISI 4340. De los ensayos se obtuvo las gráficas de dureza y velocidad de enfriamiento, en las cuales las curvas experimentales se ajustaron a las teóricas y los valores no presentan un error significativo. Razón por la cual el equipo no presenta problemas en los resultados arrojados y es apto para su uso en posteriores ensayos.
- En el acero AISI 4340 el primer valor de dureza fue de 57.7 HRC y en el acero AISI 1045 fue de 55.5HRC, mientras que el teórico es de aproximadamente 58 HRC. Como no presenta un error significativo. El temple se cumplió de manera correcta.
- Se elaboró un manual de operación del banco de pruebas donde se detalla el procedimiento de encendido y control del equipo, procedimiento del ensayo Jominy, las partes del equipo, las restricciones de uso, normas de seguridad y mantenimiento.
- Se realizó una guía de laboratorio, en donde se estableció un procedimiento adecuado para realizar el ensayo Jominy dentro del Laboratorio de Ciencias de Materiales con el fin de informar el procedimiento y uso correcto del equipo a los estudiantes y docentes.

# Conclusiones y Recomendaciones

## Recomendaciones:

- Utilizar únicamente aceros templables y de preferencia que se mencionen en la norma, para todo el procedimiento de ensayo.
- Previo a realizar el ensayo se recomienda leer la Norma ASTM A255-10 y ASTM E18, para entender y comprender todos los parámetros necesarios del ensayo.
- Al estar expuesto a condiciones de trabajo con altas temperaturas es necesario leer el manual de usuario para evitar daños en el equipo o accidentes en el área de trabajo.

***Gracias por su atención.***



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA