



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA EN  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

TEMA: “REINGENIERIA Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE  
INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO TE.85 DE CONVECCIÓN  
NATURAL Y RADIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE  
CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL D.E.C.E.M”

AUTOR: HINOJOSA TONATO, MARCO ALEJANDRO

DIRECTOR: ING. TIPÁN, EDGAR

SANGOLQUÍ

2015

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE****INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL****CERTIFICADO**

Ing. Edgar Tipán.

**CERTIFICAN**

Que el presente proyecto de investigación titulado: “REINGENIERIA Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO TE.85 DE CONVECCIÓN NATURAL Y RADIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL D.E.C.E.M”, ha sido desarrollado en su totalidad por el señor MARCO ALEJANDRO HINOJOSA TONATO, con CI: 1717457087, ha sido guiado y revisado periódicamente bajo nuestra dirección, cumpliendo con las normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la ESPE.

Sangolquí, 15 de Septiembre del 2015

Atentamente:



---

Ing. Edgar Tipán

DIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**  
**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

**MARCO ALEJANDRO HINOJOSA TONATO**

**DECLARO QUE:**

El proyecto de investigación titulado: “REINGENIERIA Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO TE.85 DE CONVECCIÓN NATURAL Y RADIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL D.E.C.E.M”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan al pie de las correspondientes páginas, cuyas fuentes se encuentran en las referencias bibliográficas.

Consecuentemente el presente trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del presente proyecto de grado.

Sangolquí, 15 de Septiembre de 2015.



---

Marco Alejandro Hinojosa Tonato

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**  
**INGENIERÍA EN ELECTRONICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Marco Alejandro Hinojosa Tonato

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la institución el proyecto de grado titulado: “REINGENIERIA Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO TE.85 DE CONVECCIÓN NATURAL Y RADIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL D.E.C.E.M”, cuyo

Sangolquí, 15 de Septiembre del 2015

  
\_\_\_\_\_  
Marco Alejandro Hinojosa Tonato

## DEDICATORIA

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma son parte de su culminación. Mis sinceros agradecimientos a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad, en segundo lugar a cada uno de los miembros de mi familia, a mis padres, mi abuela, mi hermana y demás familiares que depositaron su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar un solo momento de mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. A ti Dayanna que has sido un apoyo incondicional y te has convertido en alguien especial para mí. Los amo con la vida.

*Marco Alejandro Hinojosa Tonato*

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por haberme guiado en cada uno de mis pasos, en segundo a todos mis familiares y amigos que en el transcurso de toda mi vida han sabido ser un apoyo incondicional.

Este proyecto es el resultado del esfuerzo realizado día a día y durante un largo tiempo, agradezco a mi director, codirector y demás personas por haberme brindado sus conocimientos, paciencia y enseñanzas.

*Marco Alejandro Hinojosa Tonato*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.3. ALCANCE DEL PROYECTO.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. <i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	4
1.4.2. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	4
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR .....	5
2.3. CONDUCCIÓN.....	7
2.3.1. <i>CONDUCCIÓN RADIAL EN ESTADO ESTABLE EN CILINDROS HUECOS</i> .....	8
2.3.2. <i>CONDUCCIÓN RADIAL EN ESTADO TRANSITORIO EN CILINDROS</i> .....	10
2.4. CONVECCIÓN.....	11
2.4.1. <i>LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON</i> .....	12
2.4.2. <i>DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN</i> .....	13
2.5. RADIACIÓN .....	17
2.5.2. <i>LA LEY DE STEFAN-BOLTZMANN, EL CUERPO NEGRO, Y LA POTENCIA EMISIVA</i> .....	18
2.5.3. <i>PROPIEDADES DE RADIACIÓN</i> .....	18
2.5.4. <i>LEY DE KIRCHHOFF</i> .....	20
2.5.5. <i>SUPERFICIE GRIS</i> .....	21
2.5.6. <i>INTERCAMBIO DE RADIACIÓN ENTRE SUPERFICIES</i> .....	21
<b>CAPÍTULO III: SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN.....</b>	<b>24</b>
3.1. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO TE.85 .....	24
3.1.1. <i>DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO EQUIPO</i> .....	25
3.1.2. <i>DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN ACTUAL DEL EQUIPO</i> .....	27
3.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL NUEVO SISTEMA.....	32
3.2.1. <i>SELECCIÓN DE SENSORES</i> .....	32
3.2.2. <i>SELECCIÓN DE TARJETA BASADA EN MICROCONTROLADOR</i> .....	37
3.2.3. <i>SELECCIÓN DE INDICADORES DIGITALES</i> .....	40
3.3. MONTAJE DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN.....	45
3.3.1. <i>MONTAJE DEL SENSOR DE PRESIÓN DE VACÍO</i> .....	45
3.3.2. <i>MONTAJE DEL SENSOR DE TEMPERATURA</i> .....	51
3.3.3. <i>MONTAJE DEL MINI VOLTÍMETRO DIGITAL</i> .....	54
3.3.4. <i>MONTAJE DEL AMPERÍMETRO DIGITAL</i> .....	55
3.4. CONEXIONES ELÉCTRICAS, MECÁNICAS Y DE PROCESO DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN .....	56
3.5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI) .....	58
3.5.1. <i>DISEÑO DE PANTALLA</i> .....	60
<b>CAPÍTULO IV: VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN.....</b>	<b>75</b>
4.1. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	75
4.2. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA MECÁNICO .....	77
4.3. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DEL HMI .....	78
4.4. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA COMPLETO .....	82
4.5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MEDIANTE CÁLCULOS .....	85

<b>CAPÍTULO V ANÁLISIS DE COSTOS .....</b>	<b>87</b>
5.1. ANÁLISIS ECONÓMICO .....	87
5.1.1. <i>COSTOS DIRECTOS</i> .....	87
5.1.2. <i>COSTOS INDIRECTOS</i> .....	91
5.1.3. <i>COSTO TOTAL</i> .....	92
5.2. ANÁLISIS FINANCIERO .....	92
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
6.1. CONCLUSIONES.....	93
6.2. RECOMENDACIONES .....	94
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Valores Típicos del Coeficiente de Convección .....	13
Tabla 2	Constantes de la Ecuación 13 para Convección forzada sobre un Cilindro Circular Horizontal .....	16
Tabla 3	Diagnóstico del Equipo TE.85 .....	27
Tabla 4	Selección del Sensor de Presión.....	33
Tabla 5	Selección del Sensor de Temperatura .....	34
Tabla 6	Selección de Tarjeta Basada en Microcontrolador.....	37
Tabla 7	Color y Texto de las Plantillas .....	66
Tabla 8	Tabla de Valores Práctica de Radiación.....	85
Tabla 9	Valores de Emisividad de Materiales Comunes.....	86
Tabla 10	Equipos e Instrumentos .....	87
Tabla 11	Tablero de Montaje .....	89
Tabla 12	Accesorios .....	89
Tabla 13	Misceláneos.....	90
Tabla 14	Mano de Obra.....	90
Tabla 15	Asesoramiento.....	90
Tabla 16	Costos Directos .....	91
Tabla 17	Costos Indirectos.....	91
Tabla 18	Costo Total del Proyecto.....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Transferencia de Calor .....	6
Figura 2.	Calor: Conceptos y Modos de Transferencia .....	6
Figura 3.	Ejemplo de Conducción de Sólidos .....	7
Figura 4	Cilindro Hueco con Condiciones Convectivas en la Superficie .....	9
Figura 5	Elemento de Cobre del Equipo TE.85.....	10
Figura 6	Esquema para el Análisis General de la Resistencia Interna Despreciable.....	11
Figura 7	Transferencia de Calor de una Superficie Caliente hacia el Fluido Circundante, por Convección.....	12
Figura 8	Patrones Típicos de Flujo en el Flujo Cruzado sobre un Cilindro .....	15
Figura 9	Transferencia de Calor por Radiación.....	17
Figura 10	Cavidad de un Cuerpo Negro.....	18
Figura 11	Radiación y sus Propiedades Básicas.....	19
Figura 12	Ley de Radiación de Kirchhoff .....	20
Figura 13	Contenedor de acero, Bomba de Vacío y Conexión de Tuberías .....	24
Figura 14	Tablero de Prácticas .....	25
Figura 15	Diagrama de Flujo Inicial del Equipo TE.85 .....	26
Figura 16	Algunos Elementos del Sistema Defectuosos .....	28
Figura 17	Diagrama Eléctrico de la Parte de Temperaturas en AutoCAD Electrical 2014 .....	29
Figura 18	Parte del Diagrama Mecánico del Equipo TE.85 en SolidWorks.....	30
Figura 19	Parte del Diagrama P&ID del Equipo TE.85 en AutoCAD P&ID ....	31
Figura 20	Sensor SPAB con Visualizador.....	34
Figura 21	Curva característica de un PT-100 .....	35
Figura 22	Curva característica de una Termocupla tipo K.....	35
Figura 23	Termocupla tipo K de Acero Inoxidable de largo del tubo 12" y diámetro del elemento 1/8.....	36
Figura 24	Acondicionador MAX6675 para Termocuplas Tipo K .....	36
Figura 25	Arduino Mega 2560 y TFT Display.....	39
Figura 26	Arduino Mega 2560 con sus Pines Especificados.....	39
Figura 27	Controlador de Temperatura TE-W .....	40
Figura 28	Amperímetro y Voltímetro Analógicos .....	40
Figura 29	Mini Voltímetro .....	41
Figura 30	Esquema del Amperímetro DC en Proteus .....	43
Figura 31	Esquema de la Pista del Amperímetro DC.....	44
Figura 32	Diagrama de Flujo del Programa del Amperímetro DC .....	44
Figura 33	Conexiones de Tuberías Anteriores del Equipo.....	46
Figura 34	Nuevos Elementos y Herramientas para Realizar la Nueva Conexión .....	47
Figura 35	Nuevos Componentes de la Tubería y Limado .....	47
Figura 36	Componentes para Soldar la Tubería .....	48
Figura 37	Forma Final de la Tubería .....	48
Figura 38	Incorporación de un Filtro a la Tubería del Sensor Electrónico.....	49
Figura 39	Ubicación del Sensor de Presión de Vacío SPAB .....	50

Figura 40	Conexiones de Tuberías Actuales .....	50
Figura 41	Termocupla Original del Elemento .....	51
Figura 42	Fijación de la Nueva Termocupla tipo K al Elemento .....	52
Figura 43	Termocupla Tipo K del Contenedor Corroída y Desatornillada .....	53
Figura 44	Termocupla tipo K del Contenedor .....	53
Figura 45	MiniVoltímetro Modelo D85-30 .....	54
Figura 46	Voltímetro Analógico y MiniVoltímetro Digital .....	54
Figura 47	Amperímetro Digital DC .....	55
Figura 48	Amperímetro Analógico y Digital .....	55
Figura 49	Parte del Diagrama Eléctrico de la Nueva Conexión del Equipo TE.85 .....	56
Figura 50	Nuevo Diagrama P&ID del Equipo TE.85 .....	57
Figura 51	LCD Display Touch para Arduino Mega .....	58
Figura 52	Ejemplo con LCD Display Touch 3.2" utilizado como HMI .....	60
Figura 53	Esquema General de la Metodología de Desarrollo de la Interfaz ...	60
Figura 54	Arquitectura y Navegacion entre Pantallas para el Proyecto .....	61
Figura 55	Plantilla para Presentación .....	62
Figura 56	Plantilla para sinóptico de Proceso .....	63
Figura 57	Plantilla para Monitoreo .....	63
Figura 58	Plantilla de ayuda .....	64
Figura 59	Plantilla de Presentación en el LCD Touch 3.2" con Arduino Mega .....	72
Figura 60	Plantilla de Proceso y Alarmas con LCD Touch 3.2" y Arduino Mega .....	72
Figura 61	Plantilla de Monitoreo en Tiempo Real del Equipo TE.85 .....	73
Figura 62	Plantilla de Ayuda del Equipo TE.85 .....	73
Figura 63	Plantilla de Proceso del Sensor SPAB de Festo .....	74
Figura 64	Cambio de Unidades del Sensor SPAB .....	74
Figura 65	Verificación de las Tensiones de Entrada y Salida del Sistema Electrónico .....	76
Figura 66	Recableado Final del Equipo TE.85 .....	76
Figura 67	Verificación de Componentes Mecánicos del Equipo TE.85 .....	77
Figura 68	Verificación de Cables y Demás Componentes Mecánicos del Equipo TE.85 .....	78
Figura 69	Medición de Valores de Temperatura .....	78
Figura 70	Verificación de la Medición de la Temperatura de la Termocupla del Elemento y Contenedor del Equipo TE.85 .....	79
Figura 71	Representación de las Alarmas del HMI (cambio de color de números) y Externas (luz piloto) Además de Representación Gráfica de los Valores de Temperatura .....	80
Figura 72	Medición de Presión con Sensor SPAB después de 1 hora .....	81
Figura 73	Valor de Presión del sensor SPAB al abrir la válvula de paso .....	81
Figura 74	Encendido del Equipo y Demás Componentes .....	82
Figura 75	Comparación de Valores Corriente y Voltaje Operativos del Equipo TE.8 .....	82
Figura 76	Comparación del Valor de Presión del Sensor SPAB y del Barómetro-Manómetro .....	83
Figura 77	Presentación de las Temperaturas en el HMI .....	83

Figura 78	Diagrama de Bloques del Funcionamiento del HMI.....	84
Figura 79	Equipo TE.85 Operativo .....	84

## ***RESUMEN***

El objetivo de la reingeniería es lograr cumplir los requerimientos del cliente y de manera objetiva utilizar la tecnología más actual reduciendo costos y tiempo. Siguiendo este objetivo la realización del proyecto se dividió por fases. En la primera se desarrolló la elaboración de los planos y diagramas con ayuda de software específicos (AutoCAD Electrical, AutoCAD P&ID, SolidWorks, Microsoft Visio, Proteus Professional 7) comprobando el estado de los componentes del equipo con herramientas electrónicas y mecánicas, en la segunda; se optó por incorporar un voltímetro digital (0-30 VDC) y se diseñó un amperímetro digital (0-1 ADC) con la finalidad de comparar las mediciones con los ya instalados voltímetro y amperímetro analógicos, para las mediciones de presión se utiliza un manómetro y barómetro en conjunto pero para mayor precisión se incorporó un sensor presión digital SPAB con indicador marca FESTO (0-10 bar), los valores de la medición de temperatura se realizaron mediante un sensor de instrumentación (MAX6675) para termocuplas tipo K. El diseño e implementación del Interfaz Humano Máquina (HMI) se la hizo con una Arduino Mega 2560 y un TFT LCD Shield de 3.2 " touch, además se incorporó tres luces piloto como indicadoras, conjuntamente se realizó un mantenimiento general y cambio de algunas partes mecánicas, en la tercera; se realizó el montaje e instalación de los componentes antes mencionados para finalizar con pruebas y verificaciones del equipo en conjunto. El cumplimiento de estas fases permitieron se agilite y se reduzcan los tiempos establecidos para la realización de las prácticas para los estudiantes de la Universidad.

PALABRAS CLAVE:

**REINGENIERIA**

**TECNOLOGÍA**

**TERMOCUPLA**

**SENSOR PRESIÓN DIGITAL**

**INTERFAZ HUMANO MÁQUINA**

## ***ABSTRACT***

The aim of reengineering is to meet customer requirements and objective manner using the latest technology to reduce costs and time. Following this goal the project was divided in phases. At first the elaboration of plans and diagrams using specific software (AutoCAD Electrical, AutoCAD P & ID, SolidWorks, Microsoft Visio, Proteus Professional 7) was developed by checking the status of the device components with electronic and mechanical tools, in the second ; it was decided to incorporate a digital voltmeter (0-30 VDC) and was designed digital ammeter (0-1 ADC) for the purpose of comparing the measurements with the already installed analog voltmeter and ammeter, for pressure measurements using a manometer and barometer together but for accuracy digital pressure sensor SPAB Festo indicator (0-10 bar) joined, the values of the temperature measurement is performed using a sensor instrumentation (MAX6675) for Type K thermocouples design and implementation of the Human Machine Interface (HMI) is made with Arduino Mega 2560 and TFT LCD Shield 3.2" touch also was incorporated three pilot lights as indicators joined together general maintenance and replacement of some mechanical parts are made in the third; the assembly and installation of the aforementioned components ending with testing and verification team performed together. Compliance with these phases are allowed facilitate and reduce the times for work experience for students of the University.

KEY WORDS:

**REENGINEERING**

**TECHNOLOGY**

**THERMOCOUPLE**

**DIGITAL PRESSURE SENSOR**

**HUMAN MACHINE INTERFACE**

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

La Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, consta de varios departamentos académicos entre ellos al Departamento de Eléctrica y Electrónica (creada el 25 de abril de 1997) y el Departamento de la Energía y Mecánica (creada el 13 de Octubre de 1976). Actualmente estos departamentos ofertan las siguientes carreras: Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones e Ingeniería Electrónica en Automatización y Control (Departamento de Eléctrica y Electrónica), Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica (Departamento de la Energía y Mecánica).

El laboratorio de Conversión de la Energía ubicado en las instalaciones del campus Sangolquí de la Universidad se dedica a la investigación del campo energético y sus diferentes aplicaciones. Cuenta con instrumentos especializados para la valoración de los recursos energéticos. Provisto de equipos desarrollados con tecnología nacional para la combustión de biomasa, aplicaciones de la energía solar de baja, media y alta temperatura, sistemas fotovoltaicos y sistemas de convección natural y radiación.

El departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica siempre ha buscado desarrollar el aprendizaje e investigación de los estudiantes en el área de transferencia de calor por ello nace la necesidad de contar con un equipo didáctico de convección natural y radiación, pero este equipo por diversas razones ha pasado de estar en un óptimo estado de funcionalidad a estar inoperativo.

El equipo que actualmente se posee es el TE.85 de PLINT, adquirido hace aproximadamente veinte y dos años (según referencias del equipo, fecha 1993-12-08), según normas técnicas de equipos industriales se debe realizar un mantenimiento preventivo y correctivo para un correcto funcionamiento.

Durante el análisis y diagnóstico del estado del equipo se presentaron los siguientes problemas: el sistema de instrumentación actual presenta fallas de conexión, los sensores evidenciaron desgaste (termocuplas, barómetro y medidor de McLeod), los indicadores (amperímetro y voltímetro analógico) errores de medición, falta de un Interfaz Humano Máquina (HMI), las tuberías y accesorios de conexión presentan fugas, corrosión y conexiones innecesarias, estos detalles limitan el funcionamiento y el uso del equipo TE.85, por lo que las prácticas actualmente realizadas son menos precisas y toman mucho tiempo ejecutarlas.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El ingeniero en Electrónica, Automatización y Control está capacitado para desempeñar labores en varias áreas, tales como: producción, mantenimiento, montaje e instalación, operaciones y diseño. Por tales motivos la ejecución del presente proyecto permitirá que el laboratorio de Conversión de la Energía posea un moderno y preciso equipo de pruebas de convección natural y radiación, dando como resultados la mejor comprensión e interpretación por parte de los estudiantes de los principios y teorías que envuelven a este equipo.

El principio de funcionamiento del equipo TE.85 es: un elemento cilíndrico suspendido horizontalmente en un tanque de presión de acero. El elemento es de cobre, con acabado negro mate, rugoso, 16 cmxØ0.65cm; es calentado eléctricamente y la temperatura en su superficie es medida por medio de una termocupla. El calor de entrada al elemento puede variar en un rango de hasta 10 vatios térmicos y la máxima temperatura de trabajo es de 200 C.

Los nuevos requerimientos académicos obligan a adquirir o mejorar el actual equipo de convección natural y radiación. Se realizará una reingeniería y modernización del sistema de instrumentación lo que contribuirá al desarrollo tecnológico del laboratorio de Conversión de Energía del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (D.E.C.E.M) mediante fases, primero un diagnóstico general, cambio de sensores e indicadores, instalación de nuevos componentes y HMI, lo que ahorrara un monto significativo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Los objetivos de este proyecto estarán orientados al rediseño, recopilación de información, montaje, pruebas de laboratorio, conclusiones y recomendaciones sobre futuros proyectos que pueden ser realizados.

### **1.3. ALCANCE DEL PROYECTO**

Considerando que los conocimientos teóricos adquiridos por los estudiantes se complementan mediante prácticas experimentales, es necesario poner operativa el equipo TE.85, logrando que la Universidad siga manteniéndose en el campo de las Universidades competitivas e innovadoras.

En este proyecto se realizó un análisis y reconocimiento del equipo para verificar las condiciones en que se encuentra, se levantó y documentó mediante planos eléctricos, diagramas P&ID, diagramas electromecánicos todas las conexiones eléctricas y mecánicas del equipo TE.85, información que inicialmente no existía y que fue necesaria para el desarrollo y posteriores proyectos, se realizó la instrumentación y adquisición de datos lo que dio una optimización del funcionamiento del equipo, se estableció un HMI para la visualización y monitoreo de las variables, finalmente se harán pruebas y correcciones necesarias para la entrega del proyecto logrando obtener nuevas características que facilitarán la utilización, comprensión y un mayor número de prácticas por parte de los estudiantes dentro del laboratorio.

Este equipo ya efectuado las modificaciones antes mencionadas será utilizado para desarrollar trabajos sobre el fenómeno de la transferencia de calor, ayudando a realizar estudios cuantitativos precisos de la convección natural y radiación al servicio de los estudiantes.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL.**

Reingeniería y modernización del sistema de instrumentación del equipo TE.85 de convección natural y radiación del D.E.C.E.M.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer el estado actual del equipo TE.85 de convección natural y radiación del laboratorio de Conversión de la Energía para identificar los posibles problemas y limitaciones de funcionamiento.
- Levantar y documentar los planos eléctricos y mecánicos del equipo TE.85 para comprender sus partes y principio de funcionamiento
- Seleccionar la instrumentación necesaria para un buen funcionamiento del equipo.
- Implementar un sistema de instrumentación eficaz y un Interfaz Humano Máquina (HMI) para el equipo TE.85

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se detallan los conceptos esenciales de los modos de transferencia de calor relacionados con la termodinámica, se describen y presentan las ecuaciones que se utilizan para el análisis del sistema que conforma el equipo TE.85 del laboratorio de Conversión de la Energía del D.E.C.E.M, además se presentan los modelos matemáticos y ecuaciones que rigen estos fenómenos de forma general.

### **2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR**

Una de las definiciones utilizadas para la transferencia de calor es la mencionada por INCROPERA & DeWITT, (1999) que afirman que:

“La transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas.” (p.2)

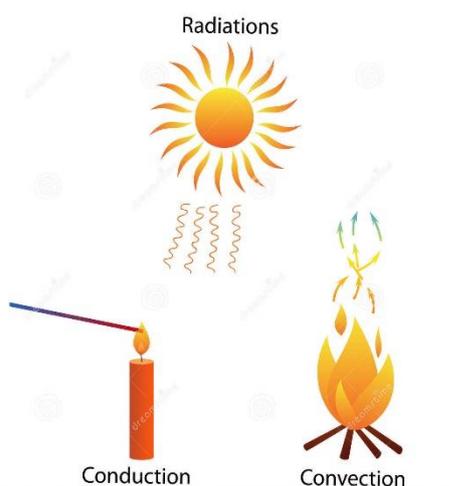
Pero no es la única definición que se puede encontrar, en física, el calor está definido como: “Siempre que existe una diferencia de temperatura en el universo, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos de la termodinámica, esta energía transmitida se denomina calor.” (Díaz Hernández, y otros, 2006,p.33).



**Figura 1. Transferencia de Calor**

**Fuente:** <http://www.batanga.com/curiosidades/5077/transferencia-de-calor-conduccion>

La transferencia de calor complementa los principios primero y segundo de la termodinámica clásica, proporcionando los métodos de análisis que pueden utilizarse para predecir la velocidad de la transmisión del calor, además de los parámetros variables durante el proceso en función del tiempo, pero para un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar mecanismos fundamentales de transmisión: conducción, convección y radiación, además del mecanismo de acumulación.



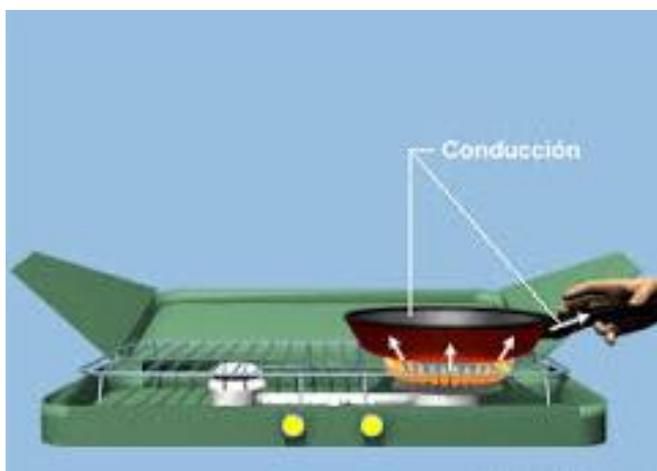
**Figura 2. Calor: Conceptos y Modos de Transferencia**

**Fuente:** <http://es.dreamstime.com/imagen-de-archivo-tres-modos-de-transferencia-de-calor-image38682591>

### 2.3. CONDUCCIÓN

“La conducción es el modo de transferencia de energía a niveles atómicos de las partículas, produciendo un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas debido a su movimiento aleatorio”. Inzunza (2010) La relación existente entre la velocidad de transferencia térmica por conducción “depende de las características geométricas y las propiedades de los materiales que lo constituyen, los buenos conductores son los metales, en cambio, el aire o el plástico son malos conductores (aislantes)” Sciarini (2009)

Son innumerables los ejemplos de transferencia de calor por conducción, por ejemplo en los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción, es decir, el calor viaja desde el extremo más caliente al más frío si tomamos el ejemplo de un sartén al calentarlo un sartén por conducción, el extremo del mismo va adquiriendo el calor generado desde el centro del sartén que se encuentra expuesto al fuego.



**Figura 3. Ejemplo de Conducción de Sólidos**

**Fuente:**

**[https://www.metted.ucar.edu/training\\_detail\\_es.php+transferencia+de+calor+por+conduccion&imgrc=O103gpfw1rZMmM%3A](https://www.metted.ucar.edu/training_detail_es.php+transferencia+de+calor+por+conduccion&imgrc=O103gpfw1rZMmM%3A)**

En 1822 el matemático francés Joseph Fourier dio a conocer ley de Fourier de la conducción del calor que dice: La rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente de la temperatura

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Cuando se introduce la constante de proporcionalidad, se obtiene:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Donde:

$q$ =Tasa de Transferencia de calor (W)

$\partial T / \partial x$ = Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor (K/m)

$k$ = Conductividad térmica del material (W/m·K)

$A$ = Área normal a la dirección del flujo de calor (m<sup>2</sup>)

El signo negativo en la ecuación 2, obedece al hecho de que el flujo de calor por conducción se da en la dirección de un gradiente de temperatura decreciente.

### **2.3.1. CONDUCCIÓN RADIAL EN ESTADO ESTABLE EN CILINDROS HUECOS**

Tomando el ejemplo de un cilindro hueco para analizar la distribución de temperatura se dirá que según Martín Monroy (1995)

Cuando el cerramiento se encuentra en equilibrio térmico resulta que el flujo de calor y la temperatura en cada punto del mismo permanecen constante, y el proceso se denomina transmisión en régimen estacionario y el flujo de calor es función de la propiedad de los materiales denominada conductividad. (p.11)

Para condiciones de estado estable, sin generación interna de energía y despreciando la conducción axial y angular, de acuerdo con el sistema mostrado en la Figura 4, la distribución de temperatura es:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (3)$$

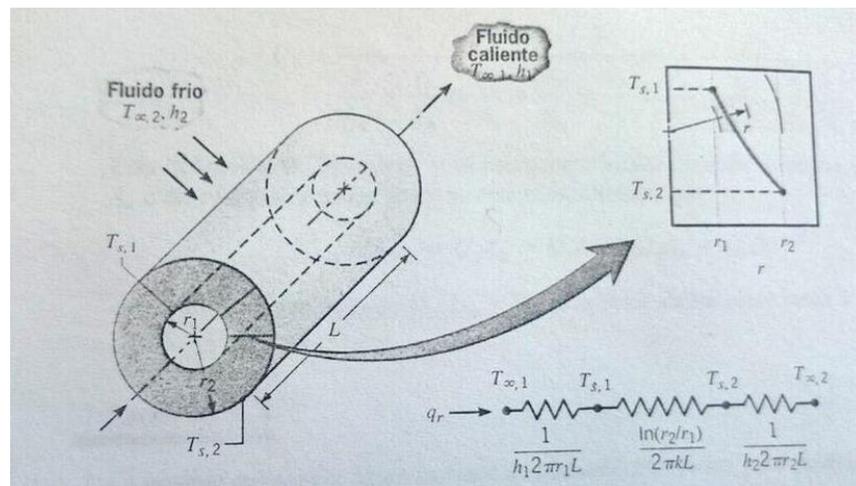
Donde:

$T_{s,1}$  = Temperatura de la superficie interior del cilindro (C)

$T_{s,2}$  = Temperatura de la superficie exterior del cilindro (C)

$r_1$  = Radio interior del cilindro hueco (m)

$r_2$  = Radio exterior del cilindro hueco (m)



**Figura 4 Cilindro Hueco con Condiciones Convectivas en la Superficie**

**Fuente: INCROPERA & DeWITT, (1999),p.91**

Tomando la ecuación 3 se facilita la obtención del gradiente de temperatura  $\frac{\partial T}{\partial r}$  si se la reemplaza en la ley de Fourier, se obtiene la ecuación para el flujo de calor:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (4)$$

$$q_r = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{R_{t,cond}} \quad (5)$$

Por lo que la resistencia térmica de conducción  $R_k$  es:

$$R_k = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (6)$$

**Donde:**

L= longitud del cilindro (m)

### 2.3.2. CONDUCCIÓN RADIAL EN ESTADO TRANSITORIO EN CILINDROS

Considerando que el equipo TE.85 posee un cilindro largo con un radio interno  $r_i$ , un radio externo  $r_o$  y una longitud L, tal como se muestra en la Figura 5, este es expuesto a una diferencia de temperaturas, por esta razón se analizará cuál será su flujo de calor. Abordando métodos de cálculo se verá en este capítulo

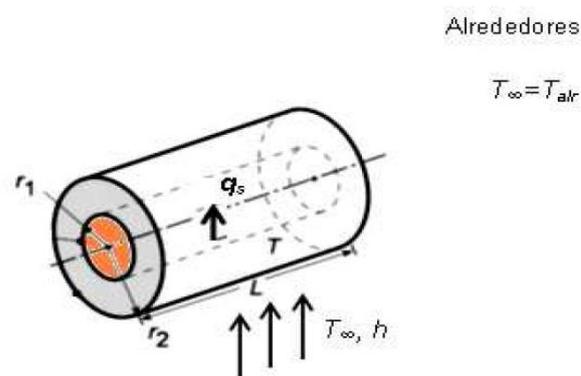


**Figura 5** Elemento de Cobre del Equipo TE.85

### 2.3.3. MÉTODO DE LA RESISTENCIA INTERNA DESPRECIABLE

Este método consiste en despreciar los gradientes de temperatura dentro del sólido que son insignificantes y se enfoca en calcular la temperatura de un sólido espacialmente uniforme durante el proceso transitorio para cualquier tiempo. Según Andrade Acosta & Masabanda Narváez , (2012)

Pueden existir diferentes procesos que induzcan condiciones térmicas transitorias dentro del sólido. En el caso de un sistema compuesto por un cilindro hueco y por una resistencia tipo cartucho para el cual se asume que tienen la misma temperatura espacial durante el proceso de calentamiento. A dicho sistema se le suministra calor, el cual se pierde por radiación y convección a través de la superficie exterior del cilindro hueco, como se muestra en la Figura 6 (p.4)



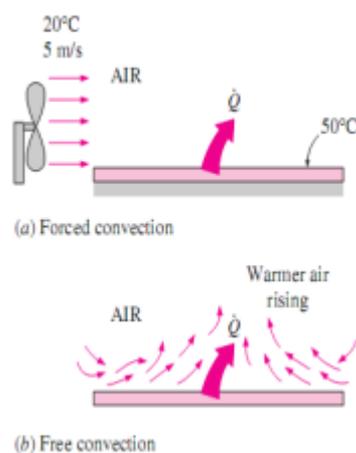
**Figura 6 Esquema para el Análisis General de la Resistencia Interna Despreciable**

**Fuente: Andrade Acosta & Masabanda Narváez,(2012),p.4**

## 2.4. CONVECCIÓN

La teoría que envuelve a la convección se describe en este capítulo, puesto que el equipo está diseñado para realizar prácticas de convección natural y radiación. La convección es el mecanismo de transferencia de calor de un fluido a escala macroscópica en forma de corrientes de circulación. Dividida en dos: convección

forzada (si el movimiento del fluido es por elementos externos) y convección libre o natural (si el movimiento del fluido es forzado por las fuerzas de flotación inducidas por la densidad).



**Figura 7 Transferencia de Calor de una Superficie Caliente hacia el Fluido Circundante, por Convección**

**Fuente:** <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2012/01/tema-3-conveccion.pdf>

#### 2.4.1. LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON

Según la ley empírica del enfriamiento de Newton la rapidez con que se enfría un objeto es proporcional a la diferencia entre su temperatura y el medio ambiente que la rodea. Expresada por la siguiente ecuación

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Donde:

$q$ = Tasa de Transferencia de Calor por convección (W)

$h$ = Coeficiente de convección ( $W/m^2 \cdot K$ )

$A$ = Área superficial ( $m^2$ )

$T_s$ = Temperatura de la superficie del sólido (C)

$T_\infty$ = Temperatura del fluido (C)

La ecuación 7 toma en cuenta que  $T_s > T_\infty$ , para el caso en que  $T_s < T_\infty$ , la variación de temperatura estará dada por  $(T_s - T_\infty)$ . La resistencia térmica de convección  $R_c$ :

$$R_c = \frac{1}{hA} \quad (8)$$

#### 2.4.2. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Determinar el coeficiente de convección  $h$ , es importante para el cálculo de la velocidad de la transferencia de calor entre una superficie y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura. Pero debido a la complejidad matemática en su cálculo, las ecuaciones son empíricas y representadas por números adimensionales. Existen algunos valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección:

**Tabla 1**

##### Valores Típicos del Coeficiente de Convección

Proceso	$h[W/m^2K]$
Convección libre	5-25
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o Condensación	2500-100000

**Fuente: INCROPERA & DeWITT, (1999),p.370**

Para la realizar las prácticas en el equipo del laboratorio de Conversión de la Energía es necesario conocer las diferentes ecuaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de convección, las que se presentan a continuación:

$$N_{uD} = \frac{hD}{k}, \text{Número de Nusselt} \quad (9)$$

$$Re_D = \frac{v_s D}{\nu}, \text{Número de Reynolds} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_f}, \text{Número de Prandtl} \quad (11)$$

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^3}, \text{Número de Grashof} \quad (12)$$

Donde: Para la realizar las prácticas en el equipo del laboratorio de Conversión de la Energía es necesario conocer las diferentes ecuaciones empíricas para el cálculo del coeficiente de convección, las que se presentan a continuación:

$h$ = Coeficiente de convección ( $W/m^2 \cdot K$ )

$D$ = Diámetro del cilindro (m)

$k$ = Conductividad térmica del sólido ( $W/m \cdot K$ )

$v_s$ = Velocidad media del flujo (m/s)

$\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )

$c_p$ = Calor específico del fluido ( $J/kg \cdot K$ )

$\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido ( $kg/m \cdot s$ )

$k_f$ = Conductividad térmica del fluido ( $W/m \cdot K$ )

$g$ = Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )

$\beta$ =  $1/T_\infty$  Coeficiente d expansión térmica volumétrica ( $K^{-1}$ )

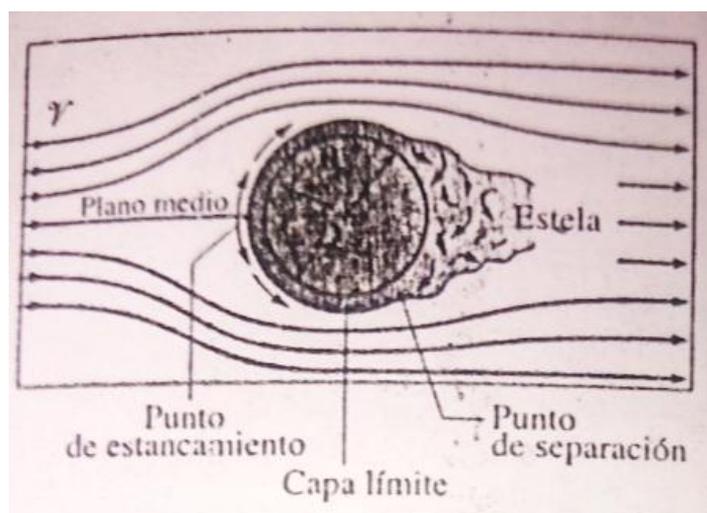
$T_s$ = Temperatura de la superficie del sólido (C)

$T_\infty$ = Temperatura del fluido (C)

### 2.4.2.1. CONVECCIÓN FORZADA Y FLUJO CRUZADO EXTERNO EN UN CILINDRO HORIZONTAL

La importancia de conocer la transferencia de calor en un cilindro en flujo transversal es importante ya que dentro del estudio del equipo TE.85 se toman estas consideraciones, CENGEL (1998), dice que:

La longitud característica para un cilindro circular o una esfera se toma igual al diámetro externo  $D$ , por consiguiente, el número de Reynolds se define como  $Re = \frac{v_s D}{\nu}$ ; dónde  $v_s$  es la viscosidad uniforme del fluido al aproximarse al cilindro o esfera. El flujo cruzado sobre un cilindro exhibe patrones complejos, como se muestra en la Figura 8. El fluido que se aproxima al cilindro se ramifica y rodea al cilindro, formando una capa límite que lo envuelve. (p. 380)



**Figura 8 Patrones Típicos de Flujo en el Flujo Cruzado sobre un Cilindro**

**Fuente: CENGEL (1998),p.380**

Analíticamente el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en flujo transversal es tedioso y complicado, pero por medio de ecuaciones experimentales el número de Nusselt es función de los números adimensionales de Reynolds y Prandtl, e Hilpert  $R$ , se establece que:

$$N_{uD} = CRe^n Pr^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

“Las constantes C y n se las visualizarán en la Tabla 1.1 y las propiedades del fluido se determinaran a la temperatura de película que corresponde al promedio entre la temperatura del fluido y la superficie del cilindro” Andrade Acosta & Masabanda Narváez, op.cit, p.30

$$T_p = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (14)$$

**Tabla 2**  
**Constantes de la Ecuación 13 para Convección forzada sobre un Cilindro Circular Horizontal**

$Re_D$	$C$	$n$
0,4-4	0,989	0,33
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618
40000-400000	0,0266	0,805

**Fuente: INCROPERA & DeWITT, (1999),p.370**

#### **2.4.2.2. CONVECCIÓN NATURAL Y FLUJO CRUZADO EXTERNO EN UN CILINDRO HORIZONTAL**

Dentro del estudio de la transferencia de calor por convección natural sobre una superficie se debe tomar en cuenta la configuración geométrica y la orientación del objeto de estudio. Otro factor a tomarse en cuenta es la temperatura cuya variación incide en la superficie y las propiedades termofísicas del fluido. Mediante demostraciones empíricas sencillas se obtiene un número promedio de Nusselt Jouglaard & Perez (2010):

$$N_u = \frac{hLc}{K} = CRaL^n \quad (15)$$

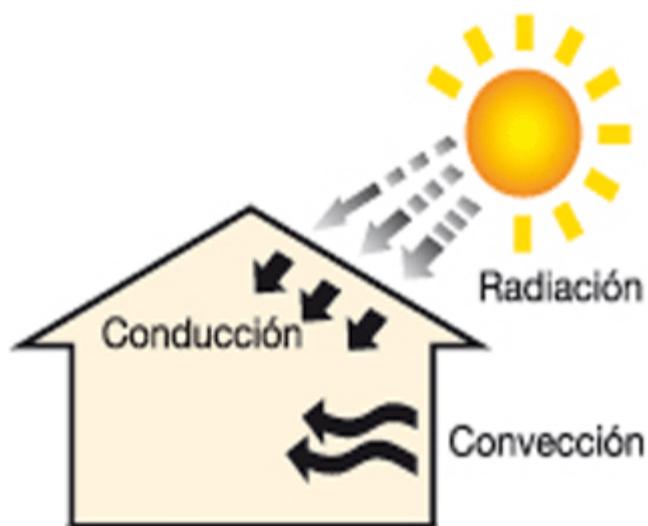
Dónde

Ra es el número de Rayleigh, el cual es el producto de los números de Grashof y de Prandtl

$$Ra = Gr_l Pr \quad (16)$$

## 2.5. RADIACIÓN

En los temas anteriores se explicó el modo de transferencia por medio de conducción (las vibraciones de redes de átomos y el movimiento de los electrones libres explican la transferencia de energía) y la convección (la transferencia de calor es una combinación de la conducción y el movimiento del fluido). Por otro lado la radiación es el resultado de ondas electromagnéticas, las cuales viajan grandes distancias a la velocidad de la luz sin interactuar con un medio. La radiación puede predominar sobre la conducción y la convección a altas temperaturas.



**Figura 9** Transferencia de Calor por Radiación

Fuente: <https://belkis1509.wordpress.com/trasmision-de-calor/>

En la Figura 9 se puede entender el fenómeno de la radiación, el Sol aunque no se lo puede tocar se puede sentir su calor, por la razón de que se puede transferir su calor a través del espacio vacío en forma de radiación térmica.

### 2.5.2. LA LEY DE STEFAN-BOLTZMANN, EL CUERPO NEGRO, Y LA POTENCIA EMISIVA

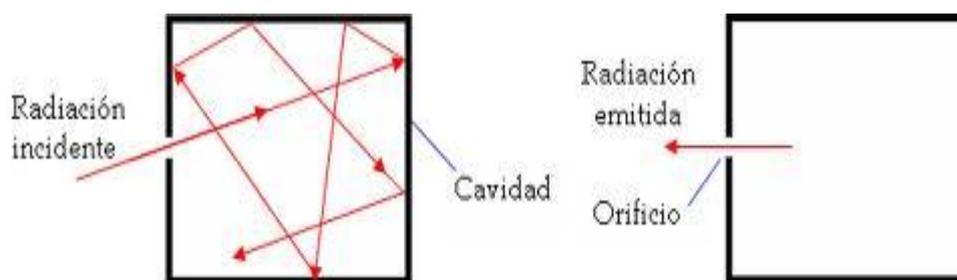
“Los sólidos, líquidos y algunos gases (especialmente el vapor de agua y los hidrocarburos) emiten radiación térmica como resultado de su temperatura. Un emisor ideal, al que se llama cuerpo negro, emite radiación térmica de acuerdo a la ecuación de Stefan Boltzmann.” Mena Moreno & Quinchuela Diaz,(2012, p.36) La ecuación viene dada por:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (17)$$

Donde:

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$ , Constante de Boltzmann

T= Temperatura absoluta de la superficie (K)



**Figura 10 Cavidad de un Cuerpo Negro**

**Fuente:**

[http://www.iesseneca.net/revista/spip.php?page=imprimir\\_articulo&id\\_articulo=434](http://www.iesseneca.net/revista/spip.php?page=imprimir_articulo&id_articulo=434)

### 2.5.3. PROPIEDADES DE RADIACIÓN

Las propiedades de la radiación básicas según Welty (1994):

Una superficie “negra” es una idealización basada en la respuesta de una superficie a la radiación térmica incidente. Cuando la energía incide en un cuerpo homogéneo parte de la energía penetra en él y el resto se refleja. La palabra “opaco” describe un cuerpo que no transmite nada de la energía que incide en él. En forma más completa se puede decir que la energía que incide en un cuerpo se refleja, se absorbe o se transmite. Si se designa por  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$  como las porciones de energía radiante incidente que se reflejan, absorben y transmiten, entonces: (p. 309)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (18)$$

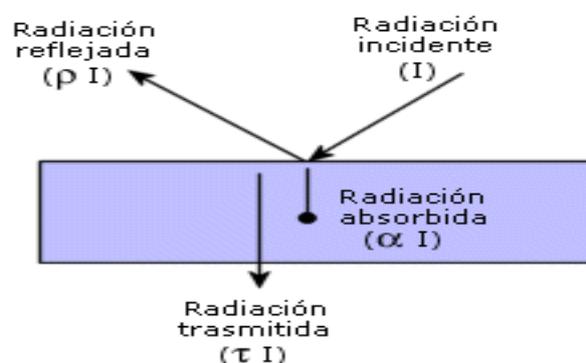
Donde:

$\rho$ = Reflectividad, es la fracción de la radiación incidente reflejada por la materia

$\alpha$ = Absortividad, es la fracción de la radiación incidente que la materia absorbe

$\tau$ = Transmisividad, es la fracción de la radiación incidente transmitida por la materia.

De acuerdo con lo estudiado hasta este momento, es aparente que para un cuerpo perfectamente absorbente (negro),  $\alpha= 1$ , y para un cuerpo opaco  $\tau=0$ .



**Figura 11 Radiación y sus Propiedades Básicas**

**Fuente:**

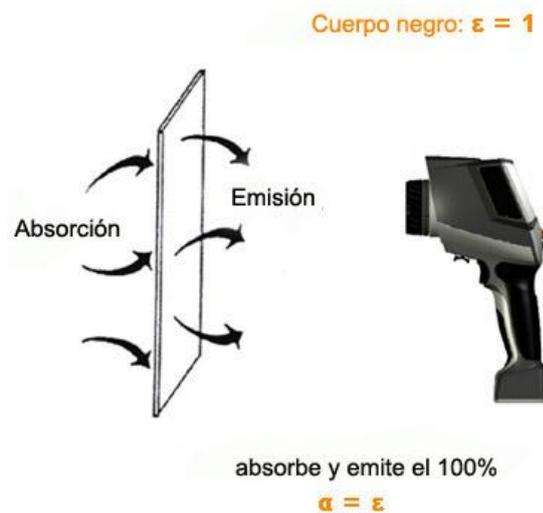
<http://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simul>

ation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Radiation\_Topics/Basic\_Radiation\_Definitions.htm?format=P

#### 2.5.4. LEY DE KIRCHHOFF

Parte del estudio de la Radiación es el uso y aplicación de la ley de Kirchhoff que permite demostrar que la emisividad de un cuerpo (o superficie) es igual a su absorbancia, cumpliendo con el requerimiento de encontrarse en equilibrio térmico. Como se puede observar en la Figura 12

$$\alpha = \epsilon \quad (19)$$



**Figura 12 Ley de Radiación de Kirchhoff**

**Fuente:** <http://www.academiatesto.com.ar/cms/ley-de-radiacion-de-kirchhoff>

Existen los siguientes corolarios de la ley de Kirchhoff según Frederic P. Miller,, Agnes F. Vandome, & McBrewster John, (2010):

- Esta ley puede resumirse como: un mal reflector es un buen emisor, y un buen reflector es un mal emisor.
- La emisividad no puede ser mayor a uno ( $\epsilon < 1$ ) puesto esto es imposible por la conservación de la energía, por lo que no es posible térmicamente irradiar más energía que un cuerpo negro, en equilibrio.

### 2.5.5. SUPERFICIE GRIS

La definición de superficie gris será citada por Reséndiz, (2010)

Es un tipo de superficie no negra en el que el poder de emisión es independiente de la longitud de onda de la radiación. De esta forma, se define un cuerpo gris, como aquel cuya transferencia de calor por ondas electromagnéticas es constante ante la longitud de onda. La emisividad puede ser distinta en cada longitud de onda y depende de factores como la temperatura, condiciones de las superficies (pulidas, oxidadas, limpias, sucias, etc.) y ángulo de emisión.

### 2.5.6. INTERCAMBIO DE RADIACIÓN ENTRE SUPERFICIES

En los problemas normales de radiación, no toda la energía que sale de un cuerpo es interceptada por otro frente a él, sino que solo lo es en parte. Ésta depende de la distancia entre los cuerpos, de sus superficies y de su orientación relativa en el espacio. Franco & D (2008)

#### 2.5.6.1. FACTOR DE FORMA

Representada por  $F_{ij}$  adimensional, definida como, la radiación que sale de la superficie  $i$  que es interceptada por la superficie  $j$ , cuya ecuación es:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (20)$$

Y de manera similar,

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (21)$$

Donde:

$F_i, F_j$ , factor de forma de la superficies  $i$  a  $j$  y de  $j$  a  $i$  respectivamente

$A_i, A_j$ , Superficie i y j respectivamente  
 $\theta_i, \theta_j$ , Ángulos polares i y j con las normales a las superficies, respectivamente  
 R, Línea que conecta a las superficies.

### 2.5.6.2. RELACIÓN DE RECIPROCIDAD

Permite mediante un factor de forma determinar otro. Al igualar las dos anteriores ecuaciones se obtiene:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (22)$$

### 2.5.6.3. REGLA DE LA SUMA

Esta regla se aplica si N superficies forman un recinto y toda la radiación que sale de la superficie i debe ser interceptada por todas las superficies que conforman el recinto.

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (23)$$

### 2.5.6.4. INTERCAMBIO DE RADIACIÓN DE UN CUERPO NEGRO

Al descartar los cálculos, la reflexión y transmisión se obtiene la ecuación siguiente:

$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (24)$$

Por consiguiente, el calor neto entre dos superficies queda expresado por:

$$q_{i-j} = A_i F_{i-j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (25)$$

Finalmente el calor total que disipa una superficie negra en un recinto está dado por la siguiente ecuación:

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{i-j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (26)$$

#### 2.5.6.4. INTERCAMBIO DE RADIACIÓN DE SUPERFICIES GRISES

Para realizar el análisis del intercambio de radiación de una superficie en un recinto se puede determinar, considerando que cada superficie es isotérmica y caracterizada por una radiosidad e irradiación uniforme.

$$q_i = A_i (J_i - G_i) \quad (27)$$

Se considera las siguientes equivalencias:

$$J_i = E_i + \rho_i G_i \quad (28)$$

$$\rho_i = 1 - \alpha_i = 1 - \varepsilon_i \quad (29)$$

Para determinar la radiosidad de una superficie, se debe considerar el intercambio entre las superficies del cilindro y después de esta consideración el intercambio de radiación entre superficies grises y difusas viene dada por:

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{i-j} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N q_{i-j} \quad (30)$$

#### 2.5.6.5. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

Es adecuado expresar la transferencia neta de calor por radiación que permite realizar cálculos expresados por:

$$q_r = h_r A (T_s - T_{air}) \quad (31)$$

## CAPÍTULO III: SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

### 3.1. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO TE.85

Se describe de forma general el principio de funcionamiento del equipo del laboratorio realizando en él, las pruebas necesarias para obtener un diagnóstico de la funcionalidad que presenta actualmente. En los siguientes temas se explicará el diagnóstico pero se determina que es necesaria la realización de la reingeniería y modernización del sistema de instrumentación e implementación de un Interfaz Humano Máquina (HMI). A continuación en las Figuras 13 y 14 se observa el equipo TE.85 de Convección Natural y Radiación.



**Figura 13** Contenedor de acero, Bomba de Vacío y Conexión de Tuberías



**Figura 14** Tablero de Prácticas

### 3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO EQUIPO

Cabe recalcar que el funcionamiento que se va a describir a continuación es el que la fábrica dejó en los manuales de información, pero con el transcurso del tiempo este varió en aspectos como la presentación de resultados. Debido a que se adaptó un TE-W 40 (controlador de temperatura) como visualizador porque el visualizador que tenía el equipo (desconocido) no cumplía con los parámetros necesarios, entonces:

En el cilindro contenedor se suspende horizontalmente un elemento, el mismo que es de cobre con acabado negro mate, rugoso, éste es calentado eléctricamente y la temperatura en su superficie es medida por medio de una termocupla. Además la temperatura del contenedor es medida por otra termocupla en un lado de éste. El calor de entrada al elemento puede variar en un rango de energía térmica de 10 watts y la máxima temperatura de trabajo es de 250C. Una bomba de vacío eléctrica esta acoplada al tanque, se provee además de un voltímetro y un amperímetro. Para las mediciones de presiones se usa un barómetro en U y para presiones muy bajas se puede utilizar el manómetro de vacío McLeod también incluido.

### 3.1.1.1. DIAGRAMA DE FLUJO

Para un mejor entendimiento del funcionamiento del equipo a continuación se presenta el diagrama de flujo de este, acotando que en el transcurso de su utilización solo se cambiaron elementos y conexiones más no su funcionamiento.

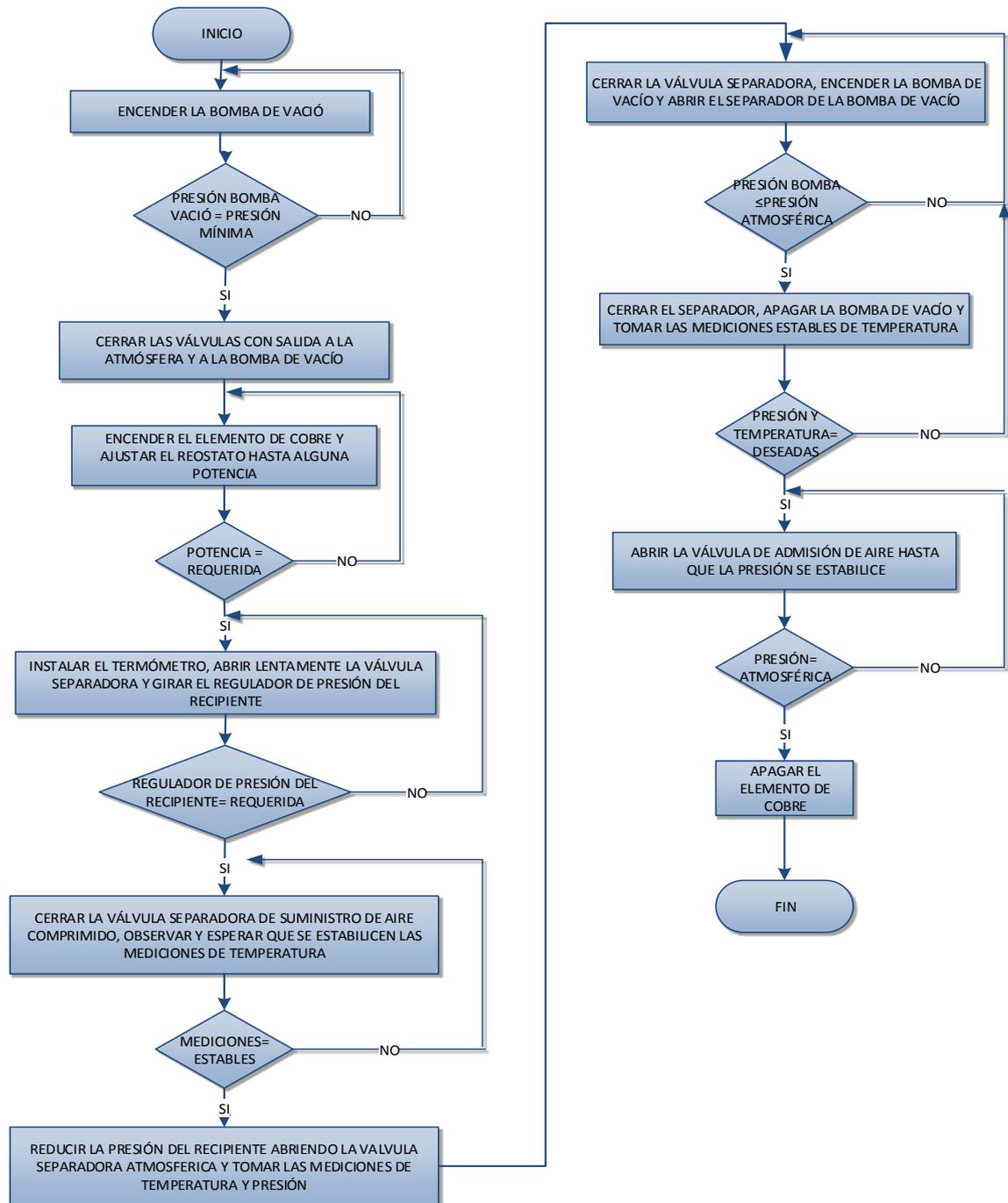


Figura 15 Diagrama de Flujo Inicial del Equipo TE.85

### 3.1.2. DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN ACTUAL DEL EQUIPO

Una vez entendido el funcionamiento del equipo, se puede realizar un diagnóstico del equipo y evaluación, recalcando los siguientes aspectos:

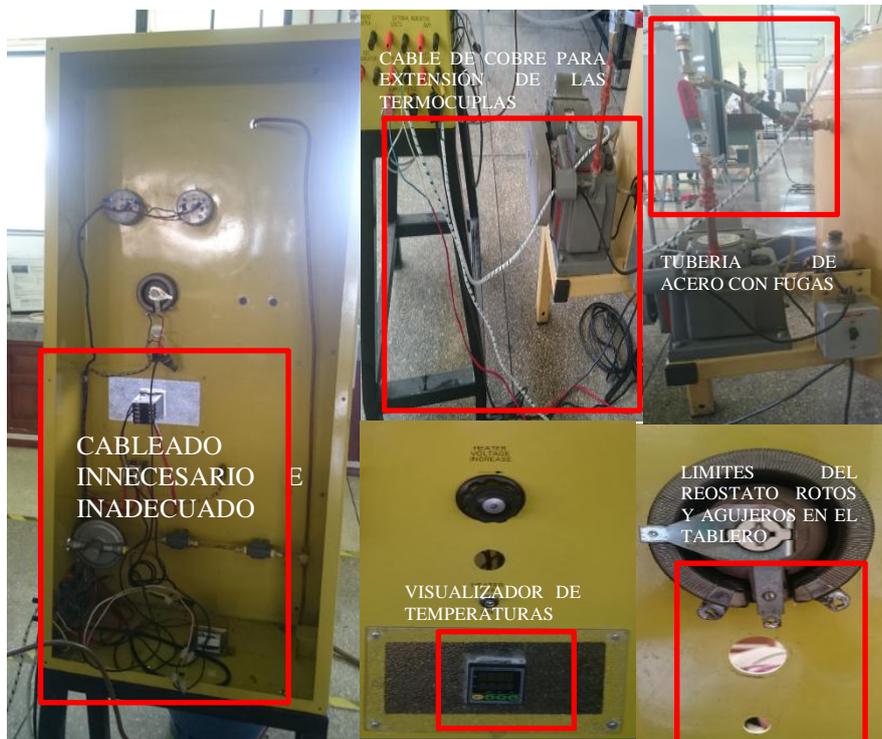
**Tabla 3**  
**Diagnóstico del Equipo TE.85**

COMPONENTE	TIPO	OBSERVACIÓN	ACCIÓN
TERMOCUPLA ELEMENTO	K	RUPTURA DE JUNTURA Y CORROSIÓN	REEMPLAZAR
TERMOCUPLA CONTENEDOR	K	CORROSIÓN DEL ELEMENTO	MANTENIMIENTO
TUBERIAS	COBRE Y ACERO	SE PRESENTAN FUGAS DENTRO DEL SISTEMA	REEMPLAZAR POR TUBERIA DE COBRE TODO EL SISTEMA
BOMBA	VACÍO	OPERATIVA	REVISIÓN DE LAS CONEXIONES
VÁLVULA REGULADORA	BOLA	OPERATIVA	VERIFICACIÓN DE FUGAS
MANÓMETRO	U	OPERATIVO POR PEDIDO DE SOLICITUD DEL LABORATORIO SERÁ REEMPLAZADO	MANTENIMIENTO
BARÓMETRO	MCLEOD	OPERATIVO POR PEDIDO DE SOLICITUD DEL LABORATORIO SERÁ REEMPLAZADO	MANTENIMIENTO
AMPERÍMETRO	ANALÓGICO	PROBLEMAS DE MEDICIÓN Y MECÁNICOS	VERIFICACIÓN DE LA PARTE MECÁNICA
VOLTÍMETRO	ANALÓGICO	PROBLEMAS DE MEDICIÓN Y MECÁNICOS	VERIFICACIÓN DE LA PARTE MECÁNICA
REOSTATO	ELÉCTRICO	ROTO LOS TOPES PARA LOS LADOS DEL REOSTATO	REEMPLAZO DE LA PARTE ROTA
CONEXIÓN ELÉCTRICA	CABLEADO	CONEXIONES INADECUADAS DE ALGUNOS ELEMENTOS	RECABLEAR LAS CONEXIONES A LOS ELEMENTOS

CONTINUA



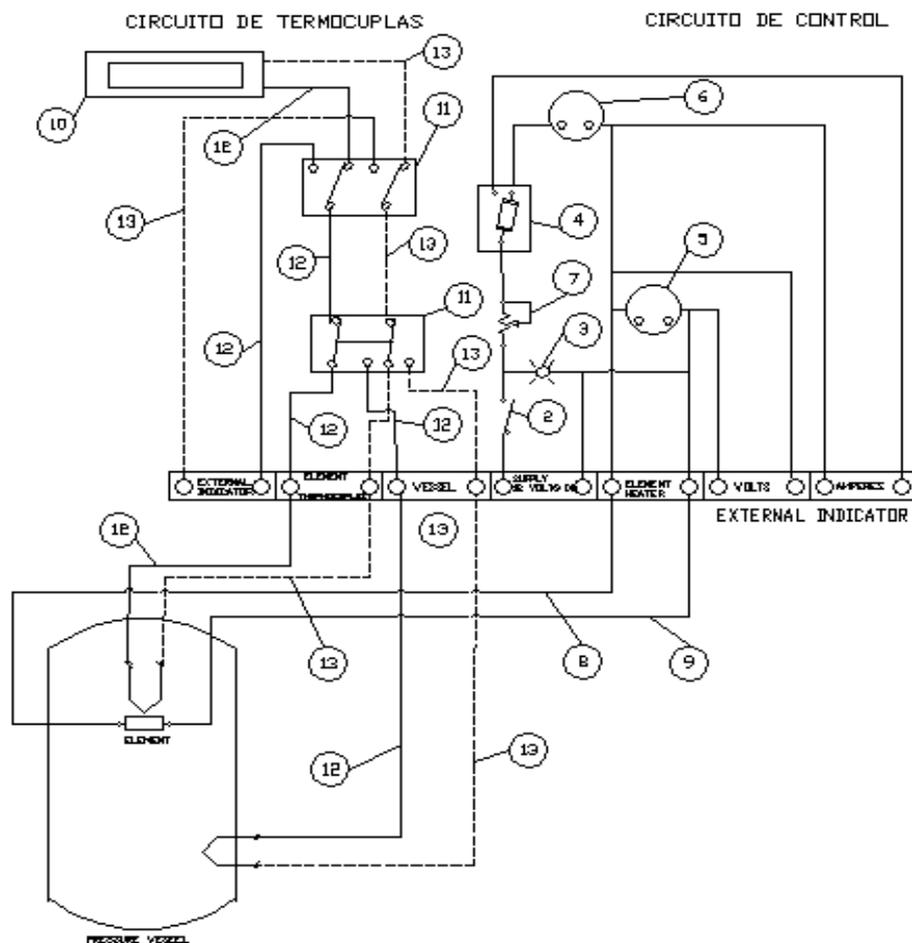
CONTROLADOR TEMPERATURA VARIOS (SWITCH, LUZ PILOTO, TRANSFORMADOR AC/DC, CAPACITOR, PUENTE DIODOS, CONECTORES ELÉCTRICOS, PINTURA DEL TABLERO, ETIQUETAS, ETC	DIGITAL	USADO COMO VISUALIZADOR	SOLO REEMPLAZO POR EL HMI
	MANUAL	SE HARÁ REEMPLAZO DE ALGUNOS ELEMENTOS INNECESARIOS Y OTROS SE MANTENDRÁ	SE VERIFICARÁ LA NECESIDAD DE CAMBIO



**Figura 16 Algunos Elementos del Sistema Defectuosos**

### 3.1.2.1. DIAGRAMA ELÉCTRICO

La representación esquemática del Diagrama Eléctrico de la Figura 17, es en base a la información proporcionada por el laboratorio y sus registros (1993). La interpretación resumida del diagrama es el siguiente, se acciona el interruptor de encendido/apagado (2) luego se suministra corriente y voltaje según el reóstato (7) para calentar eléctricamente el elemento, seguidamente se activa un switch de 3 posiciones (11) para la selección de la termocupla y otro switch de 3 posiciones para mostrar los resultados de temperaturas en el visualizador (10). Para una mayor apreciación ver Anexo A.



**Figura 17 Diagrama Eléctrico de la Parte de Temperaturas en AutoCAD  
Electrical 2014**

### 3.1.2.2. DIAGRAMA MECÁNICO

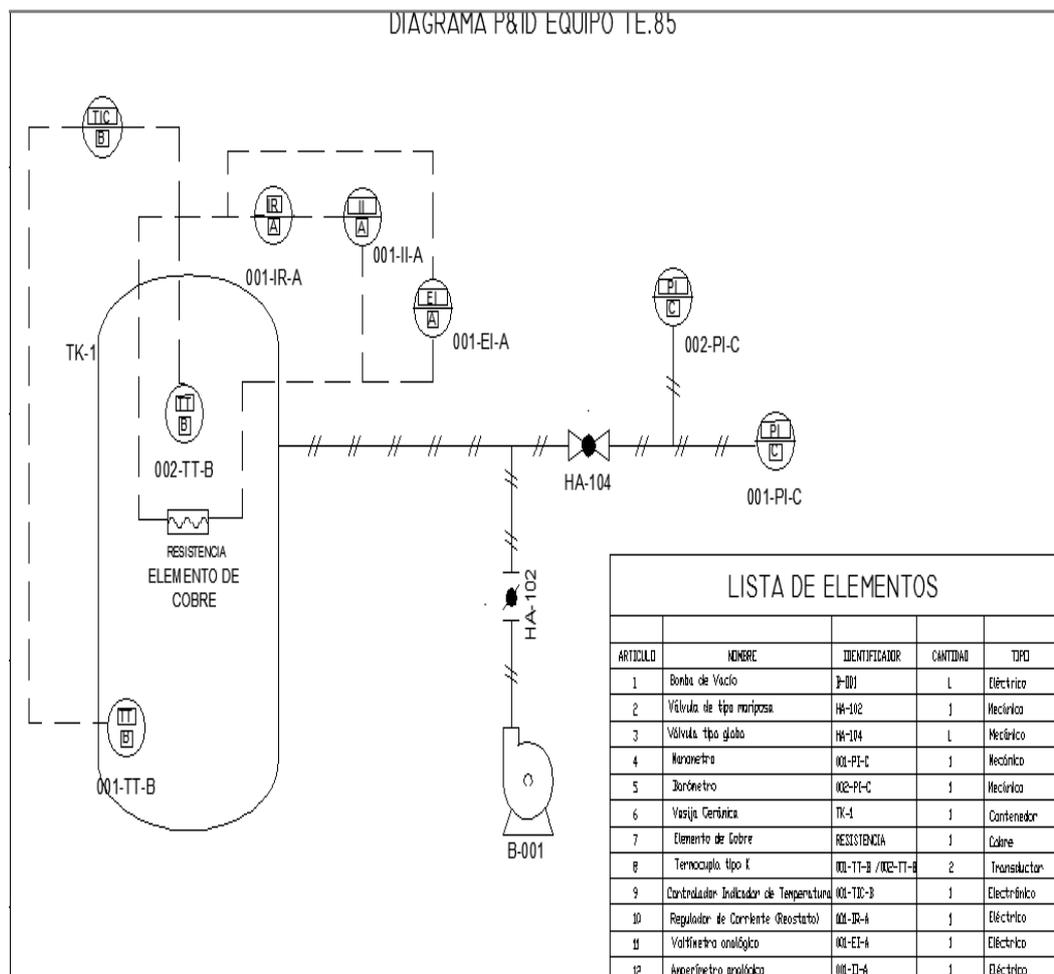
Al no existir una referencia de los componentes, elementos mecánicos y sus dimensiones, se realizó mediante el software SolidWorks la actualización de esta información. Realizar un diagrama mecánico generalmente es un requerimiento por normativa de fabricación lo que proporciona información de las piezas que ensambladas forman la totalidad del equipo, su finalidad es mostrar de una manera técnica y real los componentes mecánicos del equipo regidos generalmente por la CPE INEN. Para ver este diagrama con mayor claridad dirigirse al Anexo B.



**Figura 18** Parte del Diagrama Mecánico del Equipo TE.85 en SolidWorks

### 37.1.2.3. DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN (P&ID)

En cualquier proceso industrial y para este proyecto, se definirá mediante un diagrama P&ID (Figura 19) el proceso y las variables que intervienen en la realización de prácticas de Convección Natural y Radiación. Este diagrama consta de una serie de símbolos que generalmente utilizan la Norma ISA S5.1. El proceso consiste en generar un vacío en el tanque por una bomba (B-001), administrar una potencia de entrada por medio del reóstato (001-IR-A), posteriormente medir y mostrar en los diferentes instrumentos las temperaturas (001-TIC-B) y presiones (001-PI-C) de igual forma verificar la corriente y tensión de entrada por medio de visualizadores Para una mejor apreciación dirigirse al Anexo C.



**Figura 19** Parte del Diagrama P&ID del Equipo TE.85 en AutoCAD P&ID

## 3.2. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL NUEVO SISTEMA

### 3.2.1. SELECCIÓN DE SENSORES

Identificados ya los problemas y requerimientos de funcionamiento del equipo se procederá a seleccionar aquellos componentes que permitirán cumplir con los objetivos de las prácticas de convección natural y radiación. Todos los elementos tanto electrónicos como mecánicos se los presentará detalladamente a continuación.

#### 3.2.1.1. SENSOR DE PRESIÓN DE VACÍO

Recordando la definición de presión citada de Giancoli(2006) “La presión se define como fuerza por unidad de área, donde la Fuerza F se entiende como la magnitud de la fuerza que actúa de forma perpendicular al área de la superficie A” (p.257), representa por la ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (32)$$

Para objetivos del equipo se debe definir también la presión atmosférica y la presión de vacío, las cuales veremos a continuación. Según Ercilla, E. Burbano García, & C. Gracia Muñoz (2003)“ Presión atmosférica: Un cuerpo cualquiera en la atmosfera está sometido a fuerzas perpendiculares a su superficie en todos sus puntos y de sentido hacia el interior del cuerpo, originadas por el aire que rodea la tierra” (p.267) y Moran & Shapiro, (2005) afirma qué “ Cuando la presión atmosférica local es mayor que la presión en el sistema, se utiliza el término presión de vacío” (p.15) dada por:

$$P_{vacío} = P_{atm}(absoluta) - P(absoluta) \quad (33)$$

Al revisar estos conceptos el sensor a seleccionarse deberá cumplir con el requerimiento básico de medir presión de vacío, en la tabla 4 se presentan los posibles sensores y finalmente el escogido.

**Tabla 4**  
**Selección del Sensor de Presión**

SENSOR	CARACTERÍSTICAS	PRECIO
SENSOR DE PRESIÓN DE ESTADO SÓLIDO <b>MODELO: 836E</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Presión: 0-1bar</li> <li>▪ Temperatura Trabajo: -25...+70C</li> <li>▪ Alimentación: 12-30 VDC</li> <li>▪ Protección: IP65</li> <li>▪ Tipo: Piezorresistivo</li> <li>▪ Medidas: Rosca ¼ macho</li> <li>▪ Visualizador: Sin Indicador</li> <li>▪ Unidades: PSI, bar</li> </ul>	\$250,00
VACUÓMETRO DIGITAL DE MEDICIÓN DE VACÍO <b>MODELO: TESTO 552</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Presión: 1100-0mbar</li> <li>▪ Temperatura: -20...+50C</li> <li>▪ Alimentación: 2 pilas AA</li> <li>▪ Protección: IP42</li> <li>▪ Visualizador: Con Indicador</li> <li>▪ Unidades: mmHg, Torr, mbar, InH2O, Pa</li> </ul>	\$400
SENSOR DE PRESIÓN DE VACÍO <b>MODELO: SPAB</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Presión: -1...+1 bar</li> <li>▪ Temperatura: -10...+50C</li> <li>▪ Alimentación: 12- 24 VDC</li> <li>▪ Tipo: Piezorresistivo</li> <li>▪ Visualizador Con Indicador</li> <li>▪ Protección: IP40</li> <li>▪ Unidades: bar, inchH2O, inchHg, kPa, PSI, mmHg, kgf/cm<sup>2</sup></li> </ul>	\$250,00

De los sensores de la tabla 3 se puede ver que el sensor de presión de vacío modelo SPAB cumple con los requerimientos solicitados de medir vacío con una

mínima varianza en la medida y con un indicador para la visualización de la variable (Figura 20), para una mayor información del sensor revisar el Anexo F.



**Figura 20 Sensor SPAB con Visualizador**

### 3.2.1.2. SENSOR DE TEMPERATURA

Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios de señales eléctricas que son procesadas por un equipo eléctrico o electrónico. Los sensores para medir temperatura son generalmente los RTD, termistores y termopar. El equipo necesita medir la temperatura del elemento y también la temperatura del contenedor para demostrar los principios de convección y radiación. A continuación en la tabla 4 se indican los posibles sensores a utilizarse:

**Tabla 5**  
**Selección del Sensor de Temperatura**

SENSOR	CARACTERÍSTICAS	PRECIO
TERMOCUPLA MODELO: TIPO K 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura: -40...1200C</li> <li>▪ Recubrimiento: De Porcelana</li> <li>▪ Medidas: Vástago 24"</li> <li>▪ Cable: 2"</li> </ul>	\$55,56
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura: -40...1200C</li> </ul>	CONTINUA 

**TERMOCUPLA**  
**MODELO: TIPO K**



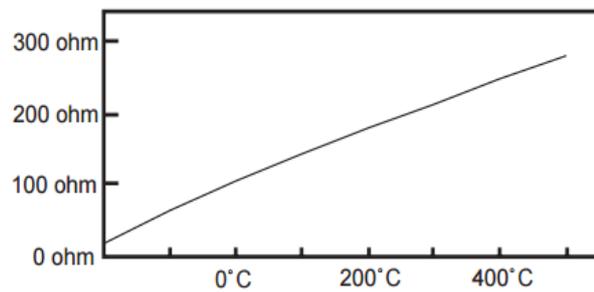
- Recubrimiento:  
Acero Inoxidable
  - Medidas: Vástago  
1/8 x 12"
  - Cable: 48"
- \$60,00

**RTD**  
**MODELO: PT100**



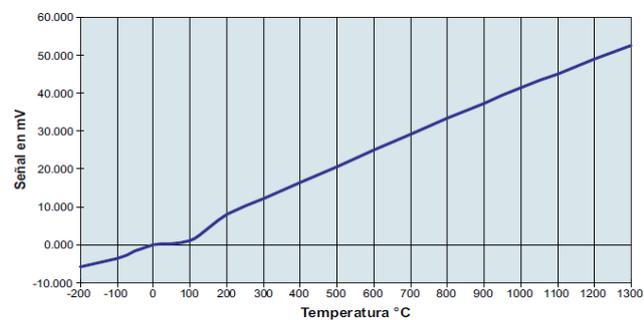
- Temperatura:  
-20...450C
  - Medidas: Vástago  
4x30"
  - Recubrimiento:  
Acero
  - Cable: 49 cm
- \$13,00

Para la elección de este sensor aparte de la tabla presentada se analizará la curva característica del PT-100 y de la Termocupla tipo K, las cuales son:



**Figura 21** Curva característica de un PT-100

Fuente: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>



**Figura 22** Curva característica de una Termocupla tipo K

Fuente: RodaMovimiento S.A.

Por tal razón al ver los valores y en especial la necesidad de medir la temperatura del elemento de cobre y éste al estar ubicado a una distancia de 15 cm se necesita un vástago de aproximadamente esa medida y un rango de temperatura de hasta 250C, al considerar que ambos elementos necesitan un acondicionamiento de señal y para este caso se utilizó un MAX6675, se optó por una Termocupla de acero inoxidable de largo del tubo 12" y diámetro del elemento 1/8 (Figura 23) y para mayor información se expondrá la información en el Anexo G.



**Figura 23** Termocupla tipo K de Acero Inoxidable de largo del tubo 12" y diámetro del elemento 1/8



**Figura 24** Acondicionador MAX6675 para Termocuplas Tipo K

**Fuente:** <http://www.aliexpress.com/item-img/Free-shipping-MAX6675-K-type-thermocouple-temperature-sensor-module-for-Arduino/32250299599.html#>

### 3.2.2. SELECCIÓN DE TARJETA BASADA EN MICROCONTROLADOR

Según Pérez (2007) “Un microcontrolador es un circuito integrado monolítico que contiene todos los elementos de un procesador digital secuencial sincronizado programable de Arquitectura Harvard o Princeton (Von Neumann). Se le suele denominar también microcomputador integrado y está especialmente orientado a tareas de control y comunicaciones”. Para la realización de este proyecto se consideró las siguientes opciones las cuales se presentarán en la tabla 5

**Tabla 6**  
**Selección de Tarjeta Basada en Microcontrolador**

ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS	PRECIO
 MICROCONTROLADOR PIC32MX340F512	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ FÁCIL DE GRABAR, MEDIANTE DIFERENTE PUERTOS</li> <li>▪ CONTROLAR, PROGRAMAR Y SINCRONIZAR TAREAS ELECTRÓNICAS</li> <li>▪ PIC MICROCHIP ESTÁN EN TODO EL MERCADO</li> </ul>	\$29,95
 MICROCONTROLADOR AVR ARDUINO MEGA 2560	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ASEQUIBLE</li> <li>▪ MULTIPLATAFORMA</li> <li>▪ ENTORNO DE PROGRAMACIÓN SIMPLE Y DIRECTO</li> <li>▪ SOFTWARE AMPLIABLE Y DE CÓDIGO ABIERTO</li> </ul>	\$26,80
 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) SIEMENS S7-1200 1212C	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ MODULAR</li> <li>▪ SALIDAS RELÉ</li> <li>▪ 2 ENTRADAS ANALÓGICAS</li> <li>▪ ENTRADAS DIGITALES</li> </ul>	\$400,00

Desde la parte técnica se debe hacer un análisis de la tarea que se va a realizar en este proyecto, es recomendado tomar en cuenta qué; el proyecto necesita visualización de variables, monitoreo y adquisición de datos. Por lo que el AVR y el PIC presentan las siguientes ventajas uno sobre el otro, primero; Arduino es programado en software libre es decir se puede realizar programación de alto nivel a través de Arduino IDE (gratis) lo que facilita su programación e investigación de programas guía, por otro lado en un PIC para programar en software libre se utiliza el programa MPLAB (lenguaje de bajo nivel) y requiere cierto nivel de conocimiento en cuanto a programación, segundo; el precio presentado en la tabla 5 del PIC es referenciado a su valor en EE.UU en cambio el precio del AVR es del mercado Ecuatoriano, tercero; el AVR presenta facilidad y factibilidad de complementos para reducción de diseño y cableado frente a la elaboración de algún circuito extra en un PIC, cuarto; ambos microcontroladores poseen placas desarrolladas de fábrica la PIC es de 32 bit mientras que el AVR 8 bits lo que significa que las arquitectura del PIC posee un mayor almacenamiento de instrucciones y mayor velocidad, pero para la aplicación a realizarse no se necesita mayormente que una arquitectura de 8 bits la cual puede realizar todas las operaciones necesarias para el proyecto; aunque la desventaja de la Arduino frente al PIC recae al ser de código abierto y éste puede ser plagiado.

Al ver que el microcontrolador AVR presenta sus ventajas sobre el PIC se verá cuán factible es frente a un PLC, dependiendo el ambiente en el que se va a trabajar es importante considerar qué; cuando se trabaja con proyectos pensados a futuras expansiones es necesario un PLC, considerando que se realizó un proyecto de investigación éste no necesita de paros de producción o realizar turnos de operatividad, por tal razón un microcontrolador es más factible, una razón importante es el costo tomando en cuenta esto, un AVR es mucho más práctico, los PLCs de gama baja como el SIEMENS son lentos comparados al procesamiento de un microcontrolador. Para finalmente recalcar que la elección tomada es un AVR Arduino Mega 2560 por los argumentos antes mencionados, para ver un detalle de este componente ver Anexo H.



### 3.2.3. SELECCIÓN DE INDICADORES DIGITALES

Anteriormente el equipo TE.85 contaba con un TE-W Series Temperature Controller usado únicamente como indicador de las variaciones de las termocuplas del sistema (Figura 27), asimismo se utilizaban como indicadores de corriente y tensión unidades analógicas como se aprecia en la Figura 28. Debido a su incorrecto uso y deterioro del tiempo los valores desplegados por estos componentes son inexactos e inaprovechados. Por tal razón se implementa visualizadores digitales y un HMI para el monitoreo de las temperaturas lo que permitirá a los estudiantes de las diferentes carreras realizar de forma concreta y exacta la toma y verificación de datos.



**Figura 27 Controlador de Temperatura TE-W**



**Figura 28 Amperímetro y Voltímetro Analógicos**

### 3.2.3.1. MEDIDOR DIGITAL DE VOLTAJE EN CORRIENTE CONTINUA (VOL TÍMETRO DC DIGITAL)

La variación de tensión del equipo es de 0-15VDC los cuales inicialmente eran medidos por un Voltímetro SIFAM analógico considerando fines prácticos este elemento no será removido pero se implementará a la par un mini Voltímetro Digital 0-30VDC (Figura 29) para mayor información del sensor ver Anexo I, el cual servirá como referencia para la toma de datos en la realización de las prácticas.



**Figura 29 MiniVoltmetro**

**Fuente:** <http://www.equiposderadio.com/nueva/voltmetro-digital-p-483.html>

Este mini voltímetro presenta las siguientes características de fácil instalación, alimentación 4.5-12VDC, precisión (+/- 0.1 V) lo cual es suficiente para cumplir con los requerimientos de las prácticas que se realizarán.

### 3.2.3.2. DISEÑO DE UN MEDIDOR DIGITAL DE CORRIENTE CONTINUA (AMPERÍMETRO DC DIGITAL)

El equipo necesita como parte fundamental poder tener una medición precisa de corriente debido a que esta es la que va a calentar el elemento de cobre dentro del contenedor y un mal medidor ocasiona problemas que abarcarían daños físicos dentro de todo el sistema. El valor de entrada del sistema es de 0-1ADC, los cuáles son regulados por la carga del reóstato (50  $\Omega$ ) y la resistencia fija del elemento de cobre (10  $\Omega$ ) que varían según la tensión suministrado por el operador.

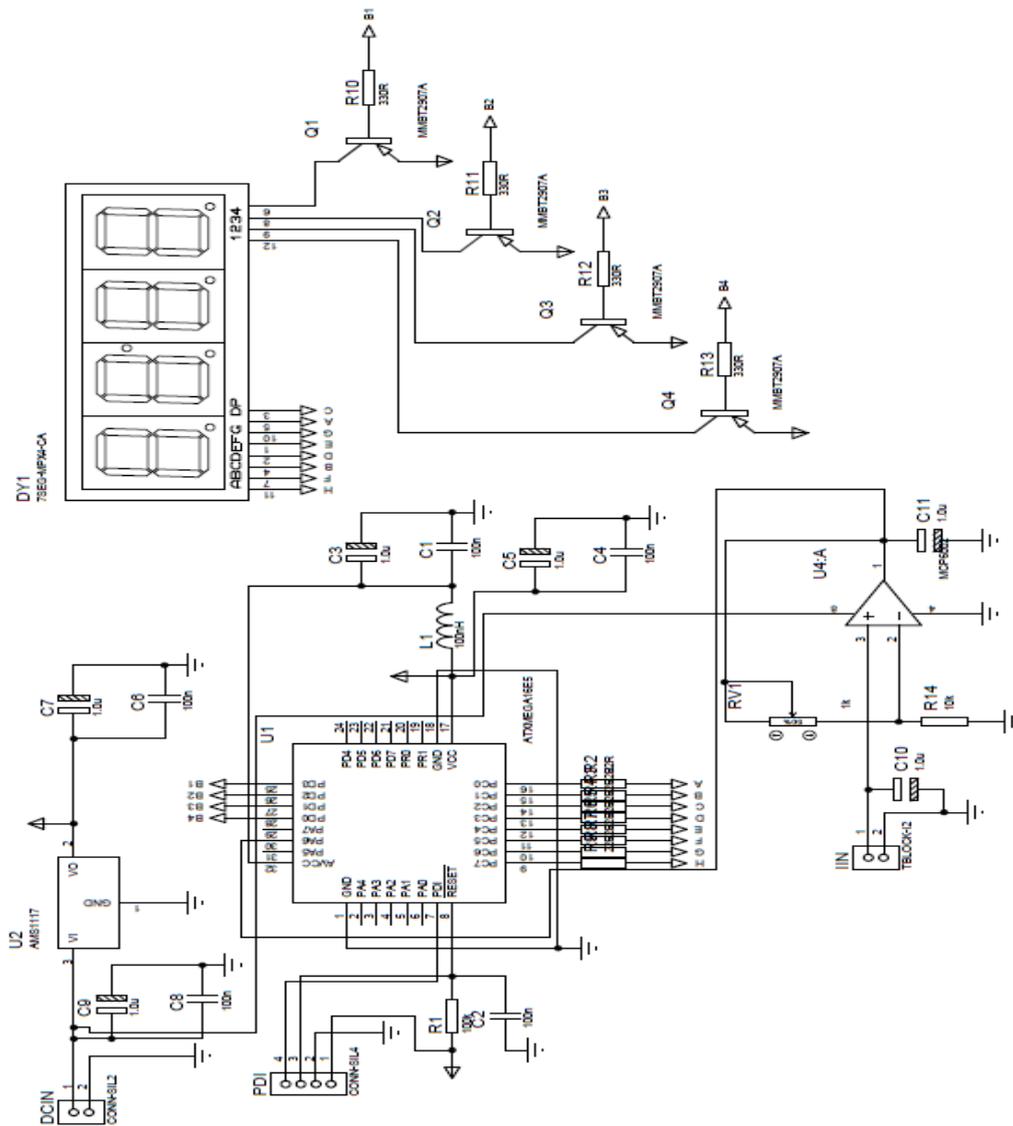
El equipo dispone de un amperímetro SIFAM analógico el cuál con el tiempo presentó fallas en la medición debido a que el movimiento de la pluma era inconsistente, ésta fue solucionada y quedó operativo pero al ser un equipo analógico, se presentan irregularidades en la toma de mediciones mayoritariamente por interpretación del operador, por lo que es necesario obtener un amperímetro digital DC, el cual comercialmente no se encuentra fácilmente debido a que se trabaja más en mediciones de corriente alterna (AC), los pocos distribuidores poseen equipos de rangos de 0-10 ADC, por lo que surge la necesidad de diseñar un amperímetro para el equipo, el cual se detalla más adelante.

### **3.2.3.3. DISEÑO DE LA PLACA DEL AMPERIMETRO DC**

Los requerimientos para el diseño del amperímetro son: rango de medición 0-1 ADC y una precisión de por lo menos  $\pm 1A$ . Por lo al considerar estos requerimientos los parámetros de diseño del amperímetro son:

- Precisión
- Rango de medición
- Resolución

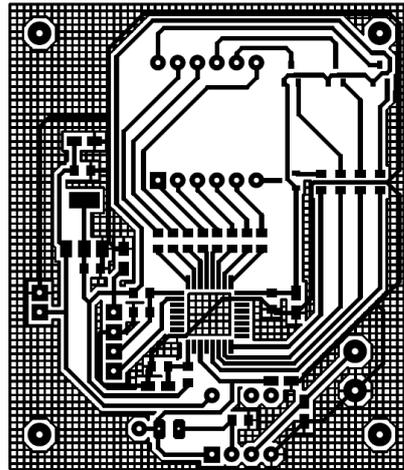
Para responder a estos requerimientos se emplea el Microcontrolador ATXMEGA 16E5 el cuál es de 12 bits ( $2^{12} = 4096$ ,) lo que permite una precisión de 0.24mA en la medición. Lo cual es suficiente para esta aplicación, los cálculos de los componentes se realizaron considerando las ganancias y corrientes que pasa por cada uno de los componentes según la ley de Kirchhoff y mediante las pruebas realizadas no presentó ningún inconveniente. De esta forma el diseño y elaboración del amperímetro se lo hará en Proteus 7 Professional para realizar la placa de circuito impreso (PCB) Ya que la finalidad del diseño de este amperímetro es la visualización de corriente suministrada al elemento, se debe considerar la presentación física en el tablero del mini voltímetro, es por esta razón que además de realizar la PCB se realizará un marco parecido al que ya se tiene en el mini voltímetro (Figuras 30 y 31)



**Figura 30** Esquema del Amperímetro DC en Proteus

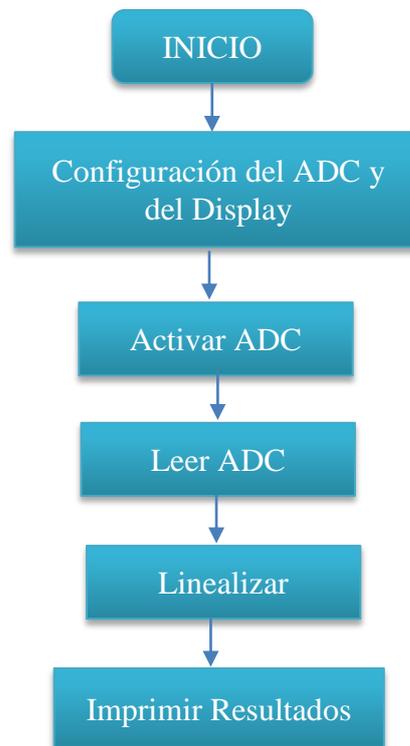
Los elementos del amperímetro son:

- Regulador de tensión LM7805
- Microcontrolador ATXMEGA 16E5
- Display de 7 segmentos
- Capacitores cerámicos y eléctricos (filtros desacople), Resistencia 1/8Ω 16W, Potenciómetro 10K, Borneras,
- Transistores PNP
- Amplificador Operacional MCP6004



**Figura 31** Esquema de la Pista del Amperímetro DC

La Figura 31 presentada es la PCB utilizada para implementar el amperímetro DC, a continuación se presenta el diagrama de flujo del programa pero para mayor información se podrá ir al Anexo O para ver su código.



**Figura 32** Diagrama de Flujo del Programa del Amperímetro DC

### **3.3. MONTAJE DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN**

Una vez determinados los componentes necesarios para la realización del proyecto, se procede a realizar su montaje en el tablero del equipo cada uno de ellos. Respecto al sistema anterior, implementar un nuevo sistema de instrumentación presenta los siguientes beneficios:

- Visualización digital de la Información
- Procesado de las señales medidas
- Calibración automática
- Facilidad en la transmisión de señales.

Considerando que se eligieron elementos de medición y acondicionamiento, se optó por aquellos que tenga beneficios sobre otros, tal como se describió anteriormente, se procede al montaje de cada uno de ellos, el cual se detalla a continuación.

#### **3.3.1. MONTAJE DEL SENSOR DE PRESIÓN DE VACÍO**

Una vez determinado el sensor a utilizarse se procedió a instalarlo en el tablero de prácticas de Convección Natural y Radiación, tomando las siguientes consideraciones.

Al ser necesario tener una medición de presión exacta se realizó el cambio de las conexiones de tuberías para evitar fugas, cambiando las conexiones hechas de acero a cobre. Procediendo como se describe a continuación:

- Se comprobó el estado de las tuberías y se observó que estas conexiones poseían una curva innecesaria lo que ocasionaba una caída de presión. (Figura 33).



**Figura 33 Conexiones de Tuberías Anteriores del Equipo**

- La implementación de la nueva tubería se rigió por los siguientes pasos, primero se visualizó y esquematizó la nueva forma de las tuberías, segundo; se procedió a cortar, limar y hacer encajar todos los elementos necesarios, tercero; una vez hecha la pieza de tubería se utilizó estaño y un soplete de gas para hacer que el componente quede compacto y sin fugas, como se observa en las Figuras 34, 35, 36 y 37



**Figura 34 Nuevos Elementos y Herramientas para Realizar la Nueva Conexión**



**Figura 35 Nuevos Componentes de la Tubería y Limado**



**Figura 36 Componentes para Soldar la Tubería**



**Figura 37 Forma Final de la Tubería**

- Considerando la necesidad de obtener una buena medición de la presión circundante por la tubería, se incorporó dentro de la tubería que se acopla directamente al sensor un pequeño filtro para evitar que cualquier tipo de impureza afecte al dispositivo electrónico (Figura 38).



**Figura 38 Incorporación de un Filtro a la Tubería del Sensor Electrónico**

- El sensor no fue ubicado en el tablero por la razón de que sus dimensiones son de 3x3 cm y es demasiado pequeño para ubicarlo en ese lugar, pero es adecuado situarlo en las conexiones de tuberías realizadas y verificadas, además debe existir un acople de manguera de alta presión para evitar el pandeo que genera la bomba de vacío, el control se lo realiza de forma manual (abriendo y cerrando el paso de la válvula) y al contar con un visualizador se puede verificar la variación de presión que está teniendo el sensor por la manipulación de la válvula parte del operador.



**Figura 39** Ubicación del Sensor de Presión de Vacío SPAB

- Una vez colocado el sensor de presión de vacío la tubería quedó de la siguiente forma (Figura 40).



**Figura 40** Conexiones de Tuberías Actuales

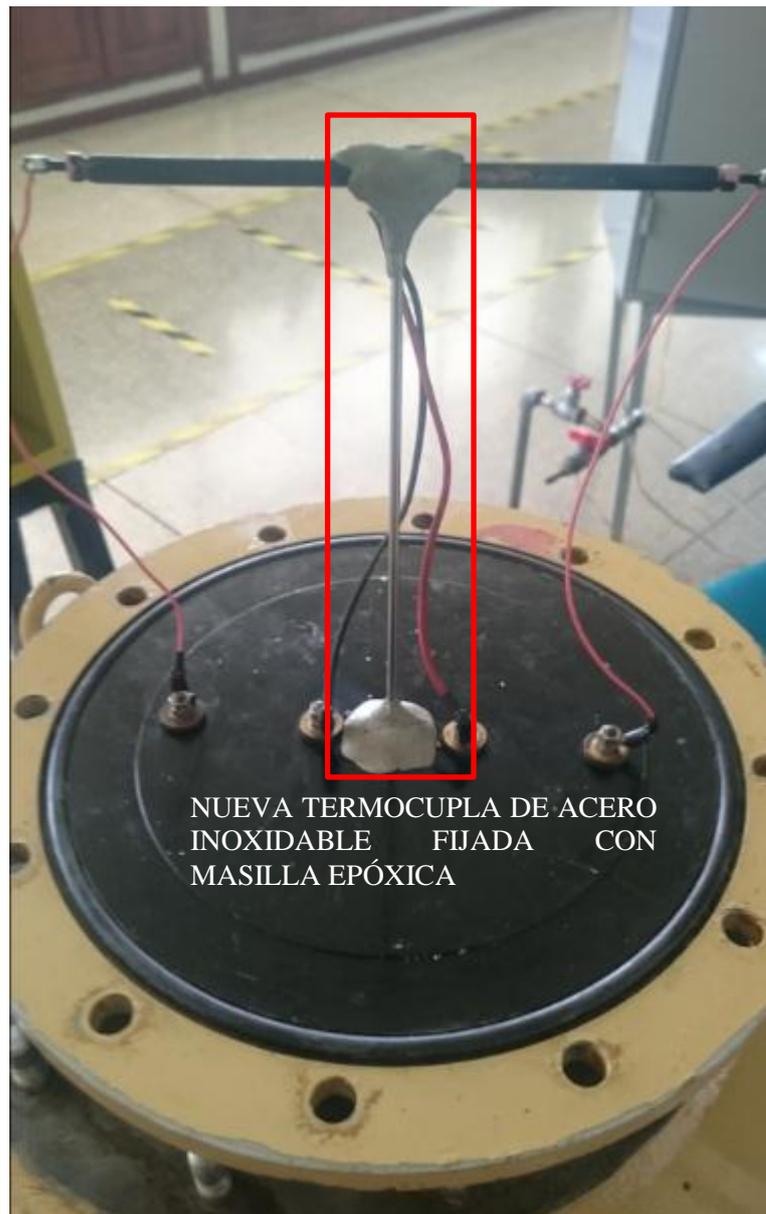
### 3.3.2. MONTAJE DEL SENSOR DE TEMPERATURA

Dentro de la etapa de montaje de los sensores de temperaturas, termocuplas tipo K, se comenzó por la termocupla que está ubicada en la tapa del contenedor, esta termocupla media la temperatura del elemento, pero había sido mal utilizada, porque se le removió el vástago y a éste se lo unió con estaño al elemento, lo que hace que en parte la curva característica de ésta termocupla cambie, dando valores de mediciones de  $\pm 8$  a 10 C, tal como indica la Figura 41.



**Figura 41 Termocupla Original del Elemento**

Entonces es reemplazada por una termocupla tipo k de acero inoxidable de vástago 1/8x12", la cual es suficiente para llegar al elemento sin dañar algún componente de la termocupla para dejarla fija elemento se utiliza masilla epóxica debido a su tolerancia a las altas temperaturas y al no afectar la función de transferencia de la termocupla tipo K.

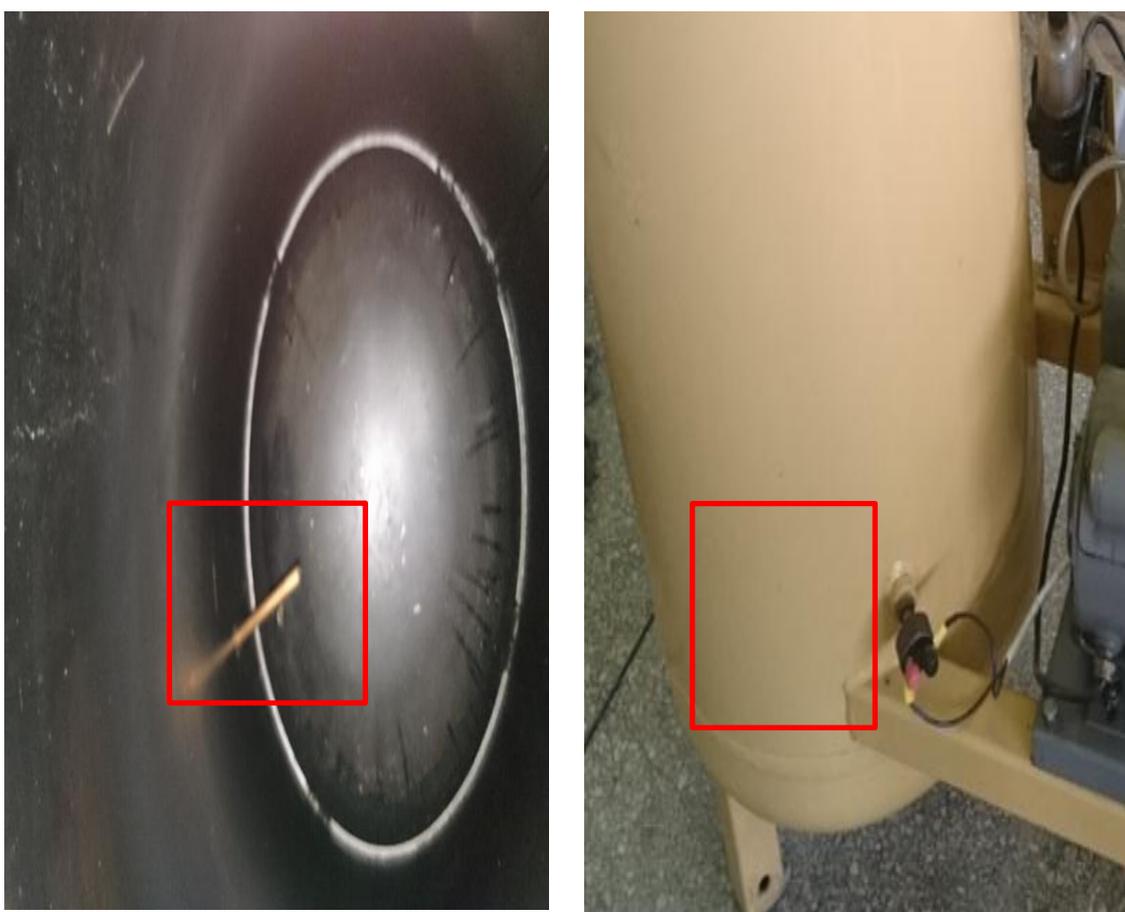


**Figura 42 Fijación de la Nueva Termocupla tipo K al Elemento**

Como se puede observar en la Figura 42 gracias a la masilla epóxica y su facilidad de fijación la termocupla queda perfectamente adapta al elemento justo en la parte media y sin hacer contacto directo al vástago de la termocupla, lo que facilitará y mejorará la toma de mediciones que varía en el rango de 0-250C que son suministrados eléctricamente. La termocupla del contenedor ubicada alado de este, no será reemplazada debido a que aún está operativa y solo necesito un mantenimiento de los cabezales por corrosión., por lo que se la volvió a usar como se ve en la Figura 43 y 44



**Figura 43** Termocupla Tipo K del Contenedor Corroída y Desatornillada



**Figura 44** Termocupla tipo K del Contenedor

### 3.3.3. MONTAJE DEL MINI VOLTÍMETRO DIGITAL

Este componente es instalado en el tablero de control debajo del voltímetro analógico a una distancia de 5cm, lo que facilita la comparación de los valores registrados, como se aprecia en las Figuras 45 y 46.



**Figura 45 MiniVoltmetro Modelo D85-30**

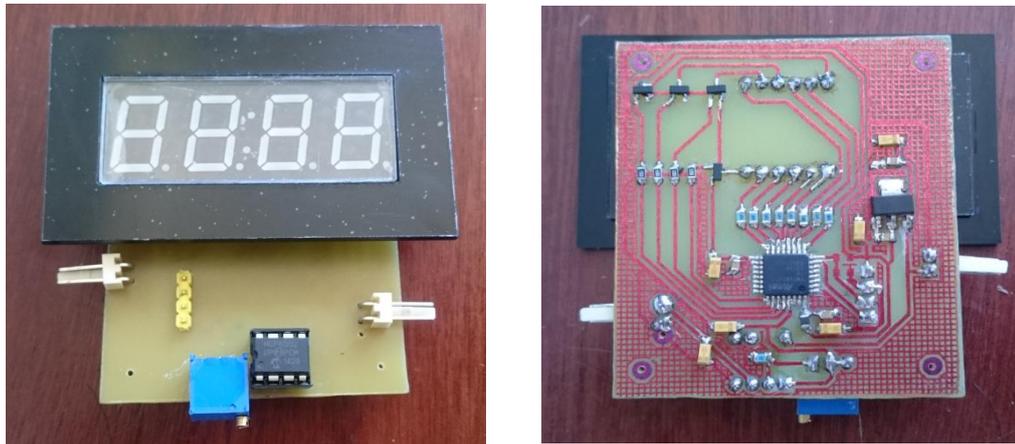
**Fuente:** <http://www.velasco.com.ec/velasco/producto.php?id=3163>



**Figura 46 Voltímetro Analógico y MiniVoltímetro Digital**

### 3.3.4. MONTAJE DEL AMPERÍMETRO DIGITAL

El componente finalizado se lo puede apreciar en la Figura 47 y 48 de igual forma debajo del amperímetro analógico para una comparación de valores.



**Figura 47 Amperímetro Digital DC**



**Figura 48 Amperímetro Analógico y Digital**

### 3.4. CONEXIONES ELÉCTRICAS, MECÁNICAS Y DE PROCESO DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Una vez realizados todos los montajes de los componentes eléctricos/electrónicos se procederá a mostrar en la Figura 49 brevemente la nueva conexión realizada, para la parte mecánica se aumentó únicamente las conexiones de las tuberías las cuales serán descritas en el diagrama P&ID de la Figura 50. Para mayor entendimiento revisar los Anexos D y E.

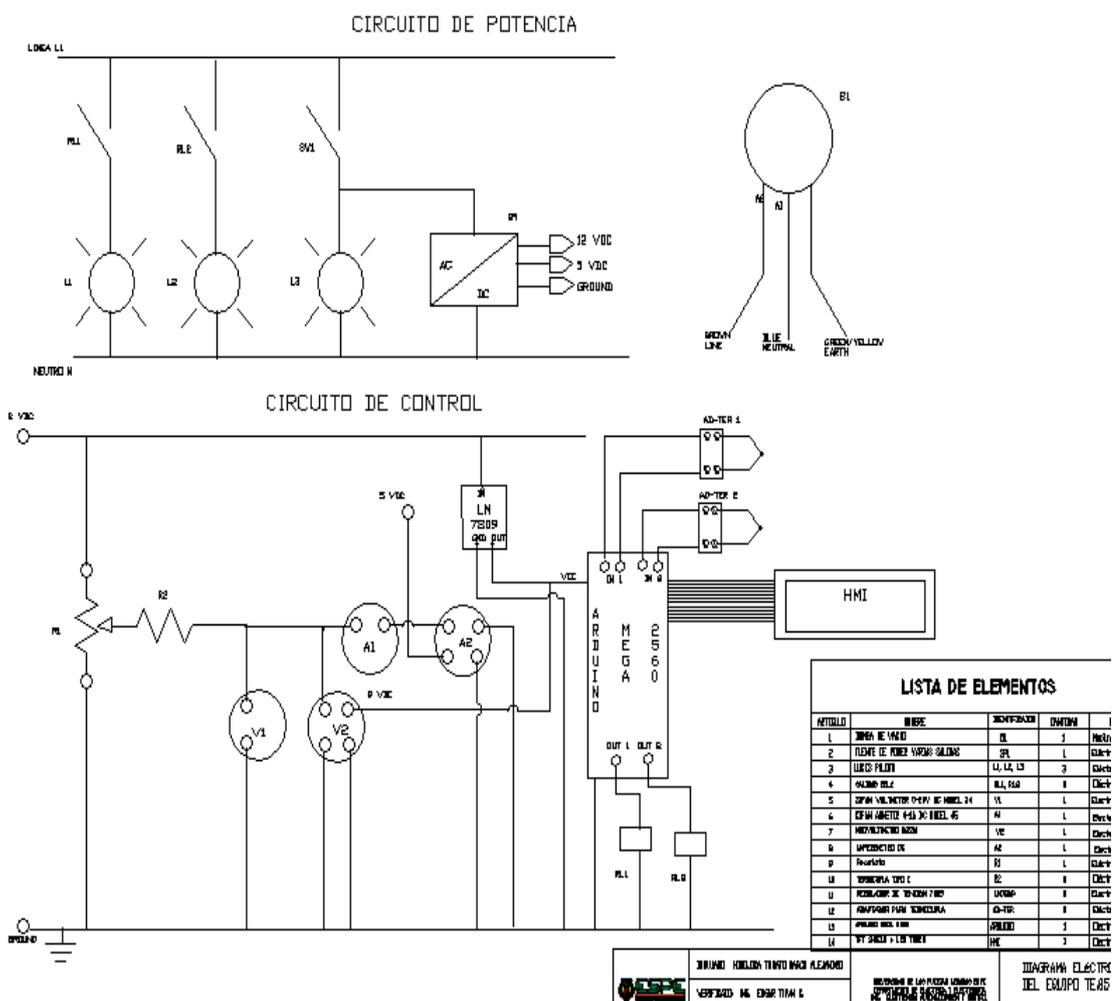
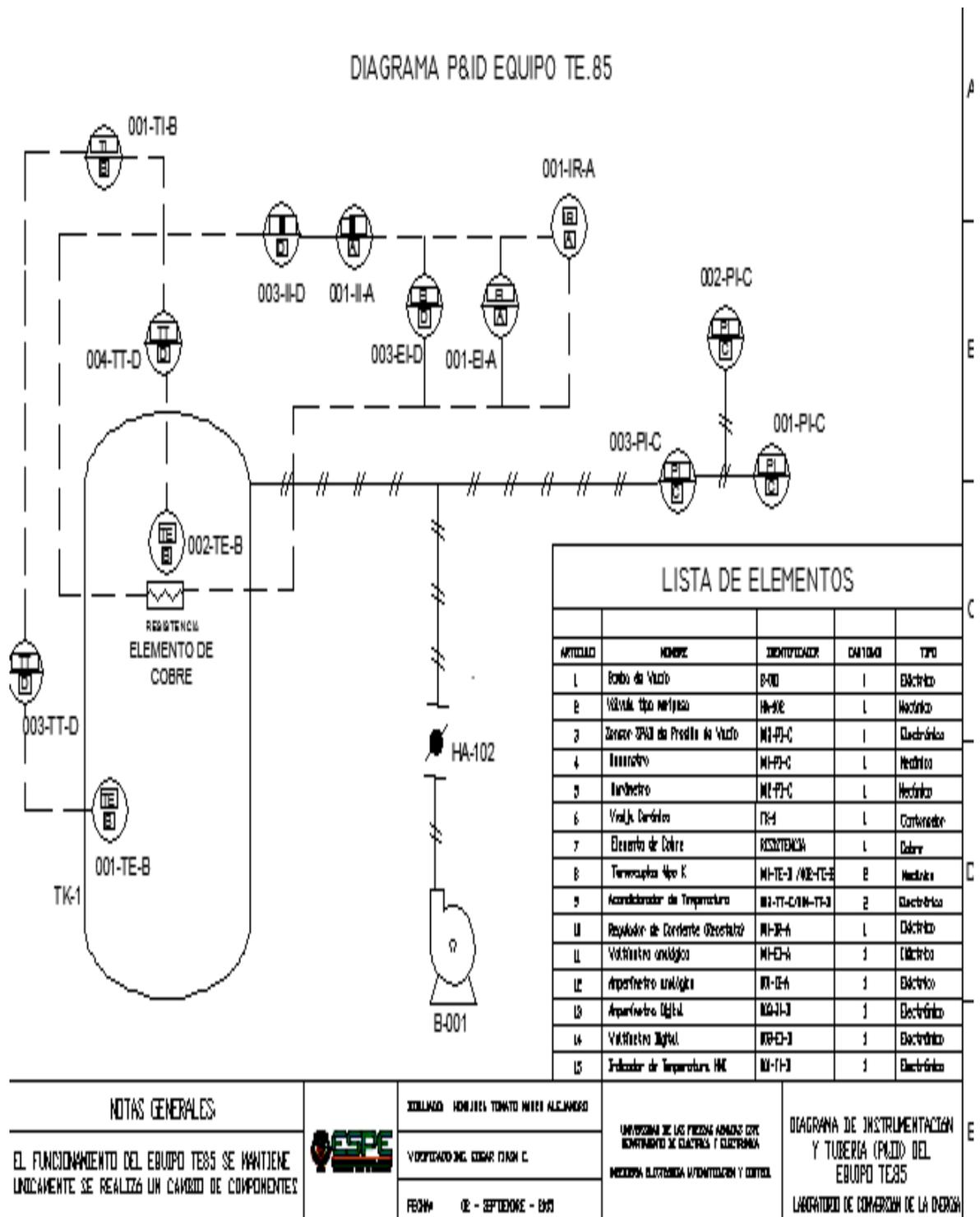


Figura 49 Parte del Diagrama Eléctrico de la Nueva Conexión del Equipo TE.85



**Figura 50 Nuevo Diagrama P&ID del Equipo TE.85**

### 3.5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI)

Parte primordial de la realización del proyecto es implementar un HMI para una mayor facilidad e interpretación de los valores de temperatura medidos en el equipo TE.85, además de otras consideraciones que se explicarán más adelante.

Según Cobo (2008):

Las siglas HMI significan “Human Machine Interface” es decir es el dispositivo o sistema que permite el interfaz entre la persona (operador) y la máquina (proceso). Tradicionalmente estos sistemas consistían en paneles compuestos por indicadores y comandos, tales como luces piloto, indicadores digitales y análogos, etc. En la actualidad, es posible contar con sistemas HMI bastantes más poderoso y eficaces, además de permitir una conexión más sencilla y económica con el proceso o máquinas.

Por tal razón el tipo de HMI que se implementa es: Tipo Terminal de Operador, la cual consiste en tener un dispositivo que se lo instala en ambientes donde se necesita se visualicen números, caracteres alfanuméricos o gráficos. Y pueden ser pantallas sensibles al tacto, y en este caso será un LCD Display Touch 3.2", como se visualiza en la Figura 51.



**Figura 51** LCD Display Touch para Arduino Mega

**Fuente:** <http://www.amazon.co.uk/Generic-Display-Module-SSD1289-Controller/dp/B00EQ1URO8>

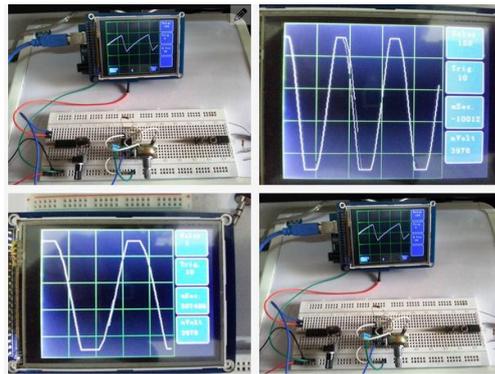
Las normativas y estándares aplicados a los HMIs son:

- ISO 11064.- Establece los principios, recomendaciones y requerimientos para ser aplicados en el diseño de centros de control
- Norma EEMUA 191.- es un conjunto de directrices para la gestión de alarmas
- GEDIS.- guía ergonómica de diseño de interfaz, ofrece directrices genéricas sobre criterios ergonómicos en el diseño de las interfaces de sistemas críticos.

El HMI que se incorporará al tablero de prácticas se lo ejecutará tomando la guía GEDIS como referencia ya que esto permite realizar un HMI ergonómico y de fácil interpretación para el operador. Las ventajas que se obtendrán al incorporar un HMI son:

- Simplicidad
- Monitoreo
- Visualización de datos esenciales
- Verificación y Control de Alarmas
- Visualización del proceso

Como se ve en la Figura 52, la Arduino mega y el LCD touch permiten de muchas maneras obtener un HMI de simple pero robusto. Al ser de código libre la programación es relativamente fácil ya que este presenta la facilidad de tener librerías ya disponibles para la realización de diferentes proyectos, además gracias al TFTShield se tiene acoplamiento de los niveles de voltaje, regulación de las salidas de la Arduino al TFT a 3.3 VDC, 65K colores, bajo consumo de corriente y en las pruebas realizadas no se presentó ningún inconveniente en cuanto a visualización, interpretación de datos o utilización.

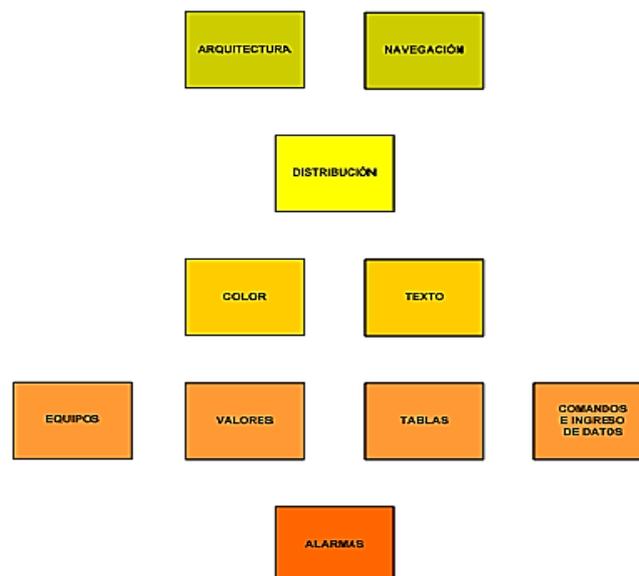


**Figura 52** Ejemplo con LCD Display Touch 3.2" utilizado como HMI

**Fuente:** [http://www.instructables.com/id/Make-an-Oscilloscope-Using-the-SainSmart-Mega2560/-/](http://www.instructables.com/id/Make-an-Oscilloscope-Using-the-SainSmart-Mega2560/)

### 3.5.1. DISEÑO DE PANTALLA

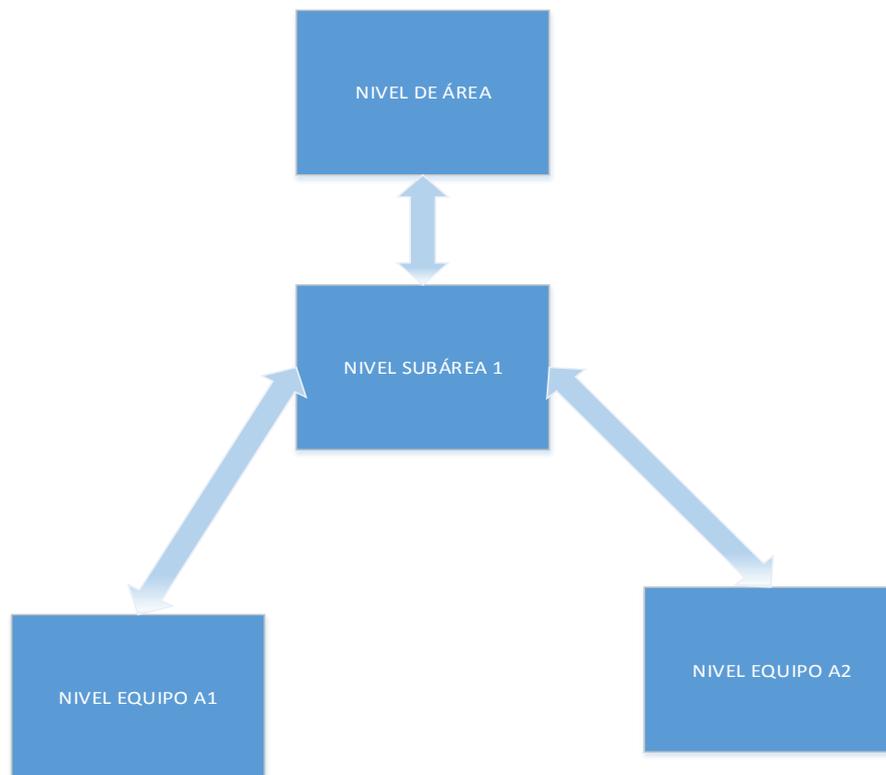
La metodología que plantea la guía GEDIS para el diseño de HMIs es una dónde constan 10 niveles que fueron obtenidas por una investigación extensa y de diferentes documentos. “La secuencia que se debe seguir para la especificación de la interfaz parte de los niveles superiores y va descendiendo hasta definir los aspectos específicos tales como representación de los equipos, los valores analógicos, las alarmas y los comandos de operador”. Granollers (2009,p.3)



**Figura 53** Esquema General de la Metodología de Desarrollo de la Interfaz

**Fuente:** <http://www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/pantalla.pdf>

Para iniciar con el proceso diseño e implementación se comenzará definiendo las diferentes pantallas con las que contará el operador para interactuar con el sistema de automatización y control.



**Figura 54** Arquitectura y Navegación entre Pantallas para el Proyecto

Los tipos de pantallas incluidos en este proyecto deben ser:

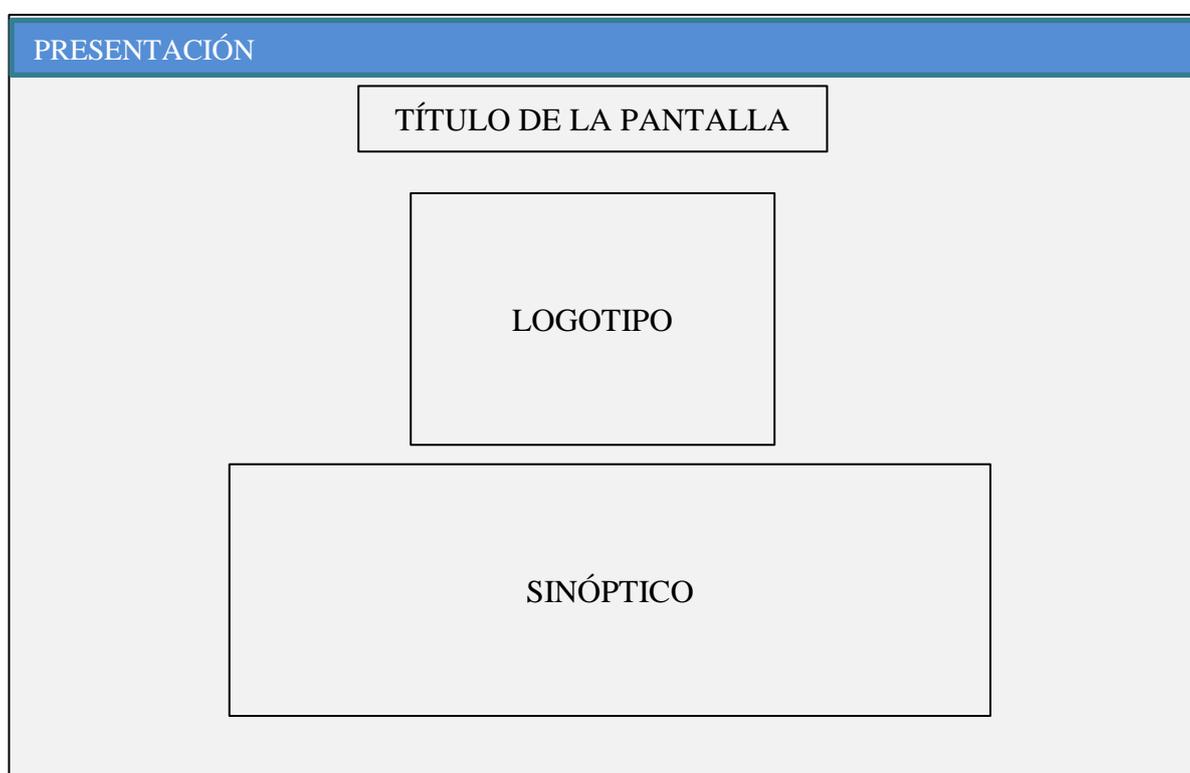
- Pantalla de proceso.- muestran el estado de los equipos y del proceso mismo.
- Pantalla de tendencias.- aquí se muestran los valores de las variables más importantes del proceso.
- Pantalla de alarmas.- se representan las alarmas
- Pantalla de ayudas.- proporciona información general sobre el funcionamiento del equipo al usuario.

### 3.4.1.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS PANTALLAS

Siguiendo con la metodología plantea las plantillas deberán cumplir los siguientes conceptos:

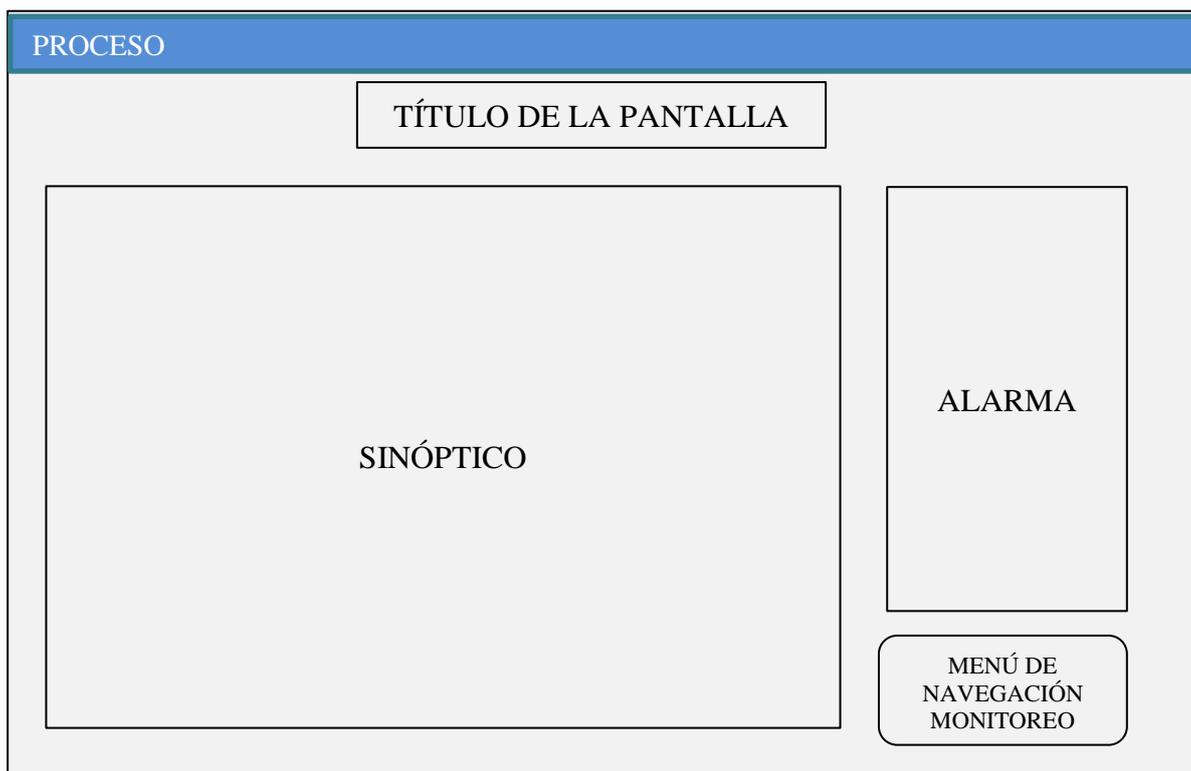
- Ubicación del título de la pantalla, hora, fecha y logotipo de la empresa
- Si será utilizado, ubicación del menú del sistema
- Ubicación de funciones genéricas, tales como confirmación de alarmas

El ejemplo de la plantilla de sinópticos que se muestra a continuación en la Figura 55, 56, 57 y 58 serán las que se utilizarán para el HMI.

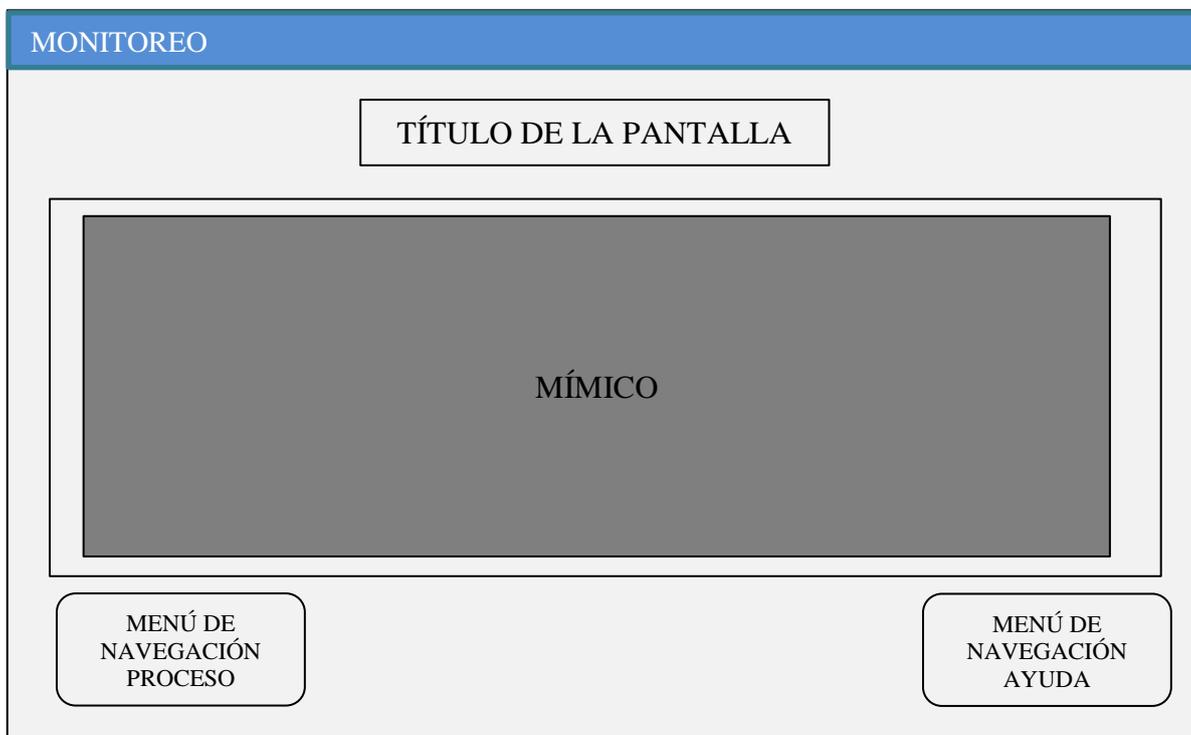


**Figura 55 Plantilla para Presentación**

En esta pantalla se indicará el logo de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE más el nombre del Equipo. En la pantalla de Proceso por otro lado indicará los valores de temperatura medidos más indicadores de alerta, la pantalla de Monitoreo indicará en el mímico la variación de temperaturas en forma gráfica mientras que la pantalla de Ayuda dará una breve idea de cómo evitar posibles errores.



**Figura 56** Plantilla para sinóptico de Proceso



**Figura 57** Plantilla para Monitoreo



**Figura 58 Plantilla de ayuda**

Las plantillas presentadas consideraron los diez pasos de la metodología del desarrollo de interfaces y los requerimientos del responsable del laboratorio que fueron:

- Observar las temperaturas de las termocuplas
- Observar las variaciones de presión del equipo
- Comprobación de los valores de corriente y voltaje por indicadores digitales

Pero además de estas exigencias se adicionará:

- Una plantilla de presentación para identificación del equipo y la Universidad
- Para el despliegue de los valores de temperatura se consideró que al no estarse realizando un control puede ocurrir eventualidades como dejar demasiado tiempo calentar el elemento y ocasionar problemas, para

solventar esta necesidad en la plantilla de monitoreo los valores si están en el rango de 0 C a 220 C estarán en color VGA\_AQUA pero si sobrepasa los 220 C tendrá un color VGA\_YELLOW (ver Anexo N) para alertar al estudiante y de manera física encendido de luces piloto.

- En la plantilla de proceso también se incluyó alarmas, las cuales consideran únicamente la desconexión de alguna termocupla o el no sensado de ellas, en caso de darse esto se encenderá una luz piloto exterior y también una representación de esta en el HMI en cuanto a los valores se desplegará un valor número de -1 que indicará que no se está midiendo ningún valor
- En la plantilla de monitoreo se incorporó una gráfica en tiempo real de la variación de temperaturas para demostrar los principios de convección natural y radiación
- Además se incluye un botón de ayuda en la plantilla de proceso que al presionarlo se dirige a la plantilla de monitoreo de igual forma en la plantilla de monitoreo se insertó otro botón que despliega la pantalla de ayuda y en esta plantilla con el botón se regresa a la plantilla de proceso.
- Para el caso de la medición de presiones el sensor posee directamente su indicador por lo que ya tiene descrito como es su funcionamiento y sus posibles problemas y alarmas

#### **3.4.1.2. USO DEL COLOR E INFORMACIÓN TEXTUAL**

Los colores dentro del interfaz humano máquina permiten que el operador evite la fatiga visual e identifique de mejor manera qué es lo que está pasando en el proceso por lo que se consideró los siguientes aspectos:

- Colores para simbolizar el estatus de los equipos de la planta (puesta en marcha, paro, fallas, estado manual, entre otros)
- Color de las alarmas (críticas, advertencias, etc.)
- Color del fondo de pantalla (general, de detalle, etc.)
- Color de valores de proceso (Temperaturas, presiones, niveles, etc.)

Además la información presentada al usuario puede ser en varias formas comúnmente usando textos. Por lo que es importante regirse a establecer un estándar para el tamaño, fuente, alineación, espaciamiento, acrónimos y abreviaturas. Por lo que la guía GEDIS especifica lo siguiente:

- No se deben utilizar más de tres fuentes en la interfaz
- No usar más de tres tamaños de la misma fuente
- El tamaño de la fuente debe ser tal que se pueda leer a distancia por el operador
- No usar letras mayúsculas en todas las letras del texto, procurar combinarlas en casos especiales
- El color del texto debe contrastar con el fondo de la pantalla y debe respetar el código de colores previamente definidos
- Cuando se usa color en el texto se debe usar en toda la palabra y no solo en ciertos caracteres
- Alinear el texto en pantalla: etiquetas a la izquierda, números a la derecha
- El punto decimal siempre debe ir alineado
- Utilizar el mínimo posible de alineamientos verticales
- Espaciar el texto tanto horizontal como verticalmente y así evitar aglutinamientos
- Sobre todo cuando se muestra información crítica, esta debe ser espaciada con suficiencia.

Por tal razón al tener en cuenta todos estos aspectos nuestro HMI también considera el manual Multi-Platform Universal TFT display library (UTFT), Anexo J porque este es la librería utilizada para nuestro LCD, por lo que el HMI estará.

**Tabla 7**  
**Color y Texto de las Plantillas**

PLANTILLA	COLOR	TEXTO
PRESENTACIÓN	FONDO: VGA_WHITE	FRASE 1: GROTESK 16x32 pixels
		CONTINUA 

	LETRAS: VGA_BLACK	FRASE 2: ARIAL BOLD 16x26 pixels
PROCESO	FONDO: VGA_BLACK	FRASE 3 y 4: GROTESK 16x32 pixels
	LETRAS 3 y 4: VGA_WHITE	FRASE 5 y 6: GROTESK 24x38 pixels
	LETRAS 5 y 6: VGA_AQUA	FRASE 7 y 8: FONT 16x16
	LETRAS 7 y 8: VGA_YELLOW	FRASE 9: UBUNTU BOLD 24x32
	LETRA 9: VGA_WHITE	FRASE 10: ARIAL BOLD 16x16 pixels
AYUDA	FONDO:VGA_WHITE	FRASE 11: SMALL FONT 8x12 pixels
	LETRAS 10: VGA_RED	
	LETRAS 11: VGA_BLACK	

Para una mejor comprensión de la tabla 6 se procederá a explicar cuáles son las frases de la tabla 6 y que es un pixel. Un pixel es según Alegsa (2010) es “ Menor unidad posible con la que se compone cualquier imagen digital en una computadora. El plural es píxeles. En cuanto a las imágenes estas pueden medirse a través del ancho y del largo en píxeles” . Entonces las frases (palabras/ textos) de la tabla 6 lo que representan es el espacio que ocupan dentro del LCD determinado por sus dimensiones como por ejemplo la frase 1 que es de 16x32 pixels es decir 512 píxeles que ocupan de todo el LCD que tiene un tamaño de 320x240 pixels.

En la tabla anterior está la palabra frase con un número, para entender cuáles son estas se las describe a continuación.

- Frase 1: ESPE-DECEM
- Frase 2: EQUIPO TE85: CONVECCIÓN NATURAL Y RADIACIÓN
- Frase 3 y 4: TEMPERATURA 1, TEMPERATURA 2
- Frase 5 y 6: ####.##, ####.## (VALOR NUMÉRICO DE TEMPERATURA)
- Frase 7 y 8: A1 y A2 (ALARMAS DE LAS TERMOCUPLAS)
- Frase 9 : C (NOMENCLATURA PARA GRADOS CENTÍGRADOS)
- Frase 10: AYUDA: EQUIPO TE-85
- Frase 11:

\* REVISAR LAS CONEXIONES DE LOS SENSORES

\* VERICAR QUE NO EXISTA NINGUNA ALARMA ENCENDIDA

\* EN CASO DE PRODUCIRSE UNA ALARMA EN EL TRANSCURSO DE LA PRÁCTICA REVISAR EL MANUAL DE USUARIO

### **3.4.1.3. INFORMACIÓN Y VALORES DE PROCESO**

Los datos analógicos del proceso son una parte muy importante dentro del HMI ya que esta información indica al operador que es lo que está pasando en la planta, estos valores pueden ser directos o también procesados por el sistema. Las consideraciones para el despliegue de valores son:

- Respetar y aplicar los estándares previamente definidos respecto al color y la información textual
- Evitar el uso de decimales poco significativos
- Es importante que el operador pueda determinar en todo momento las unidades de ingeniería de los datos numéricos pero no necesariamente se deben mostrar siempre
- Para resaltar valores se puede aplicar un cambio de color de su fondo o bien enmarcarlo con un borde negro
- Otros efectos como el cambio dinámico de tamaño y posición se deben usar en casos muy específicos y esporádicos para evitar sobrecarga al usuario con información.

Considerando estas directrices el HMI queda netamente mostrando los valores de las temperaturas sensadas ya que el sensor SPAB de variación de presión tiene incorporado un indicador por lo que no es necesario tener estos valores en el HMI general. Se debe considerar también que las prácticas se las realizan en grupos por lo que nuevamente se corrobora que no es necesario tener el valor de la presión en el HMI porque la persona que está ubicada en la parte de la válvula reguladora de presión directamente interactúa con el sensor hasta un valor de presión deseado

además al tener los indicadores de corriente y voltaje digitales estos facilitan la toma de datos para los estudiantes.

#### **3.4.1.4. ALARMAS**

Las alarmas son una parte necesaria dentro de las consideraciones para realizar un HMI ya que estos parámetros informan al operador que está pasando en su planta y si es necesaria su intervención. En caso de que exista una situación informativa que no requiera una intervención del usuario, se desplegará un mensaje en vez de una alarma.

Las alarmas y mensajes se pueden clasificar por prioridades:

- Críticas: las cuales amenazan la seguridad de la planta y/o que pueden implicar la detención de la producción
- Advertencias: las cuales se pueden convertir potencialmente en situaciones críticas después de un tiempo si el evento que originó la advertencia continúa empeorando el estado del equipo. Se puede considerar también una advertencia cuando se presenta una situación que afecta negativamente la conducción óptima de la planta
- Mensaje: eventos que conviene transmitir al operador pero no representan una amenaza a la conducción del equipo, a la producción o a la seguridad de la planta.

Las consideraciones para ubicar la pantalla de alarmas son:

- Los mensajes y las alarmas deben ser congruentes con los estándares de color, fuentes, texto, tamaño, espaciamiento y alineamiento predefinidos
- Se debe evitar el exceso de alarmas y mensajes superfluos al operador
- En cambio, para constatar el reconocimiento de la situación, el operario debe validar las alarmas críticas

- El código de colores de alarmas debe complementarse con otros elementos como un ícono, la visibilidad de un texto, su posición en pantalla o un sonido

La representación de las alarmas y mensajes deben guiarse por:

- El texto de las alarmas debe mostrar el área/equipo concreto, la condición o parámetro anómalo, la prioridad, además de la hora y fecha del evento
- En todo caso el texto debe ser concreto y claro
- Las alarmas de más alta prioridad (crítica) deben aparecer en la parte superior de la ventana o zona de alarmas
- Los sonidos más agudos y de frecuencias altas deben asignarse a alarmas de prioridad mayor ya que llaman más la atención del operador
- Al reconocer la alarma el sonido asociado debe detenerse aun si la situación anómala aún permanece
- Las alarmas se deben mostrar agrupadas lógicamente a parte de su prioridad y cronología, ya sea por área, subárea, equipos, etc.
- Las alarmas tienen normalmente un componente textual en su ventana y un gráfico en el sinóptico de proceso respectivo
- Los cambios de estado en las pantallas de proceso deben corresponder a lo mostrado en la ventana de alarmas, para confirmar al operador lo sucedido además de permitirle visualizar con un mejor contexto
- No se recomienda el uso de intermitencia para mostrar las alarmas ni en la pantalla de proceso ni en la ventana de textos de las mismas salvo en casos excepcionales
- El operador debe reconocer las alarmas fácilmente y sin tener que desplazarse de su zona actual de trabajo

Considerando todas estas directrices en nuestro HMI se describirán cuáles son las alarmas a considerarse:

- Desconexión de la termocupla 1 (termocupla del elemento), termocupla 2 (termocupla del contendor) o ambas
- Posible sobrecalentamiento del elemento, es decir dejar el equipo encendido y suministrando corriente al elemento por más de 3 horas sin ninguna supervisión.

Si llegaran a suceder algunas de estas alarmas el operador debe revisar el manual de usuario (Anexo K) para realizar su corrección y permitir la continuidad de la práctica. Ahora bien como se dijo anteriormente la variación de presión es un punto importante del proyecto por lo que se describirán las posibles alarmas que pueden existir en el sensor SPAB

- SPAB defectuoso
- La carga está cortocircuitada para que fluya una sobrecorriente
- Durante el ajuste de punto cero, se ha generado presión
- Error de comunicación (conexión interrumpida, variación de producto)
- Margen de medición excedido (B2R, P10R)
- Valor por debajo del margen de medición (B2R, P10R)
- Indicación de 7 segmentos parpadea

Las alarmas anteriores descritas se consideran advertencia ya que afectan el buen desarrollo de la práctica y necesitan de la intervención del operario para restaurarlas pero si se habla de priorizarlas por niveles todas estas tendrían igual nivel de importancia.

Para la plantilla de Proceso, como fue descrito en los ítems anteriores, consta de la visualización de las temperaturas en forma numérica lo que facilita la interpretación y toma de datos para el usuario. El botón de la pantalla de Proceso dirige a la plantilla Monitoreo donde está un mímico en el que se despliega los valores de temperatura en forma gráfica (recta roja para termocupla 1 y recta blanca para termocupla 2) en tiempo real Finalmente considerando todos los puntos antes descritos las plantillas están de la siguiente manera:



Figura 59 Plantilla de Presentación en el LCD Touch 3.2" con Arduino Mega

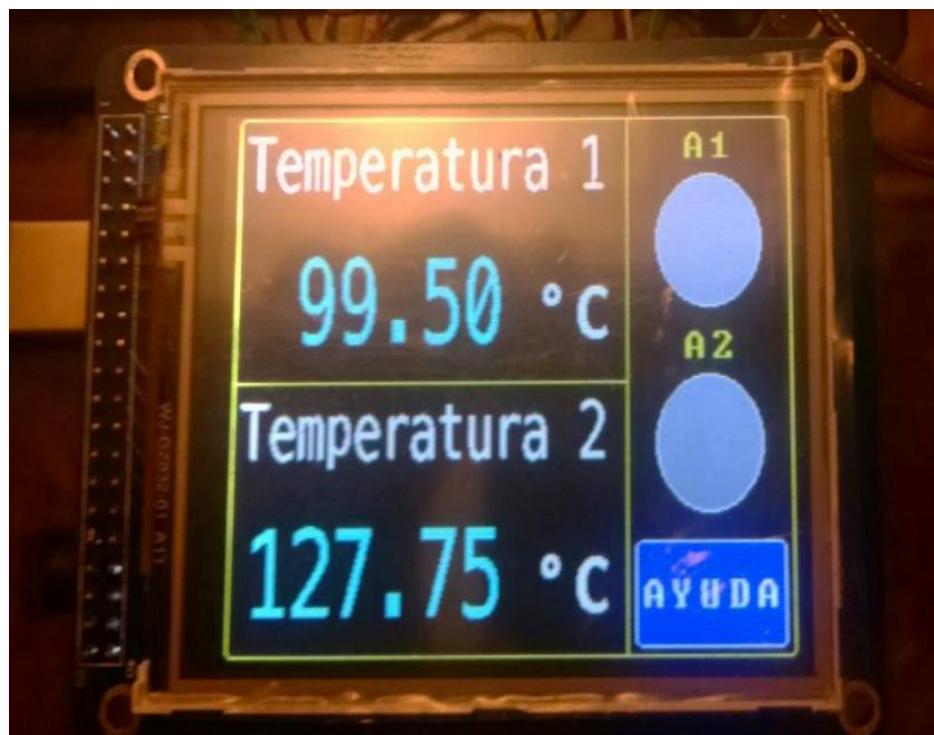
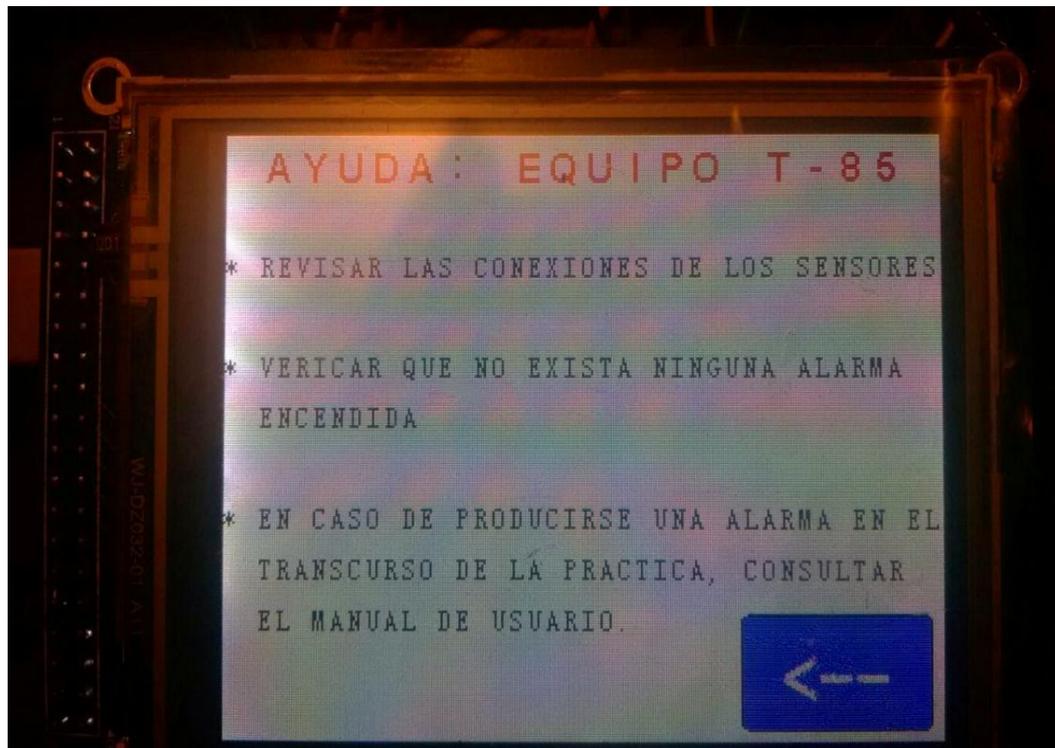


Figura 60 Plantilla de Proceso y Alarmas con LCD Touch 3.2" y Arduino Mega



**Figura 61** Plantilla de Monitoreo en Tiempo Real del Equipo TE.85



**Figura 62** Plantilla de Ayuda del Equipo TE.85

El HMI del sensor SPAB con indicador consta de las siguientes pantallas:



**Figura 63** Plantilla de Proceso del Sensor SPAB de Festo



**Figura 64** Cambio de Unidades del Sensor SPAB

## **CAPÍTULO IV: VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL NUEVO SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN**

### **4.1. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

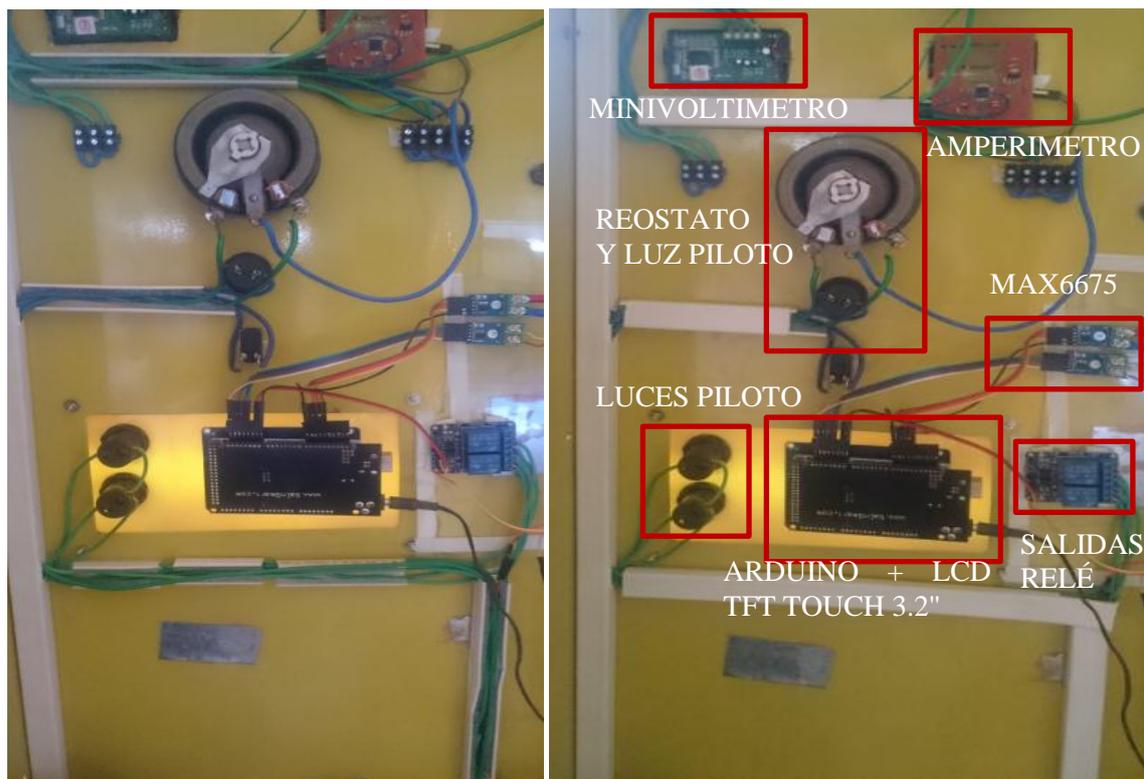
Una vez colocados todos los nuevos componentes electrónicos como los sensores, la tarjeta Arduino, los acopladores de señal, voltímetro, amperímetro digital, switch entre otros se realizarán pruebas sobre el equipo, la primera prueba a realizarse será:

- Verificación de los valores del mini voltímetro y amperímetro digital
- Verificación de los valores del sensor de presión de vacío
- Verificación de los valores de temperatura
- Verificación del funcionamiento en conjunto del equipo
- Verificación del Interfaz Humano Máquina

Todos los ítems anteriores nombrados se los realizará tomando sensores patrón tanto para la temperatura como para las tensiones y corrientes que se medirán. Como se puede apreciar las pruebas realizadas sobre el equipo TE.85 con los nuevos y modernos componentes permitieron realizar de forma eficaz y sobre todo mejorando la precisión de las mediciones tomadas las prácticas de convección natural y radiación.



**Figura 65 Verificación de las Tensiones de Entrada y Salida del Sistema Electrónico**



**Figura 66 Recableado Final del Equipo TE.85**

#### 4.2. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA MECÁNICO

Parte importante de la reingeniería del proyecto fue realizar un cambio de las conexiones de tuberías para evitar en lo posible minimizar fugas o pérdidas de información. Como se detalló anteriormente las tuberías fueron reemplazadas, también se hizo un cambio de los cables unidos a los terminales de las termocuplas por extensiones de cable de termocupla (aproximadamente 3 metros) y borneras para estos, por el hecho de que a la termocupla no se le debe alterar con ningún otro elemento que no sea los metales de los cuales está hecho, se obtuvo mediciones con una variación de temperatura de entre  $\pm 1$  C ,además se pintó nuevamente todo el tablero y se volvió a etiquetar todo el panel principal para una mejor apreciación de éste.



Figura 67 Verificación de Componentes Mecánicos del Equipo TE.85



**Figura 68 Verificación de Cables y Demás Componentes Mecánicos del Equipo TE.85**

#### **4.3. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DEL HMI**

La verificación del Interfaz Humano Máquina fue mediante pruebas de mediciones de temperatura y ocasionando alguna alarma para ver cómo se comporta el HMI tanto en temperaturas como en presión.



**Figura 69 Medición de Valores de Temperatura**

Como se observa en la Figura 70 se tiene las mediciones de las temperaturas a partir de dos termocuplas que vienen incorporadas en el MAX6675. Para realizar la verificación de las temperaturas se utilizó el sensor patrón Digital Thermometer 6802 II (Anexo L) y los pasos fueron:

- Conectar las dos termocuplas del elemento y del contenedor a los MAX6675 del tablero mediante extensiones propias de cable de termocupla tipo K, lo cual es muy importante ya que si se utiliza cualquier otro tipo de cable los valores son erróneos e imprecisos de temperatura. Los valores deben quedar estáticos al menos 2 minutos
- Colocar el Digital Thermometer en las salidas de temperatura tanto del elemento como del contenedor y anotar estos valores.
- Finalmente comprobar el valor que da el Digital Thermometer y el HMI ver Figura 68



**Figura 70 Verificación de la Medición de la Temperatura de la Termocupla del Elemento y Contenedor del Equipo TE.85**



**Figura 71 Representación de las Alarmas del HMI (cambio de color de números) y Externas (luz piloto) Además de Representación Gráfica de los Valores de Temperatura**

Como se puede apreciar en la Figura 71 una vez que los valores de temperatura son los adecuados se proceden a hacer comprobaciones con diferentes valores de corriente y voltaje, además de visualizarlos en forma numérica se implementó una sección gráfica en la cual se observa la variación de temperatura representada en dos rectas en el eje X frecuencia y en el eje Y un rango de 0-300C.

Para realizar las medidas de la presión se debe recordar que se debe tratar de genera un vacío absoluto lo cual para el sensor SPAB equivale a un valor de -14.5 PSI para lograr este proceso se debe dejar encendida la bomba de vacío por aproximadamente 1 hora, al realizar este proceso se debe comprobar con el manómetro y barómetro. Una vez realizado este proceso se debe abrir la válvula de paso del sensor hasta un valor cualquiera y ver que las temperaturas disminuyan. Como se observa en las Figuras 72 y 73



**Figura 72** Medición de Presión con Sensor SPAB después de 1 hora



**Figura 73** Valor de Presión del sensor SPAB al abrir la válvula de paso

#### 4.4. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA COMPLETO

Finalmente se realizará una práctica dada por el encargado del laboratorio dónde se comprobó los valores de temperatura, corriente y voltaje usando como sensor patrón un multímetro FLUKE cuyas características se verán en el Anexo M y las presiones generadas.



**Figura 74 Encendido del Equipo y Demás Componentes**



**Figura 75 Comparación de Valores Corriente y Voltaje Operativos del Equipo TE.8**



**Figura 76** Comparación del Valor de Presión del Sensor SPAB y del Barómetro-Manómetro



**Figura 77** Presentación de las Temperaturas en el HMI

Para su correcta funcionalidad el Equipo TE85 responde al siguiente diagrama de bloques:



**Figura 78 Diagrama de Bloques del Funcionamiento del HMI**

Este diagrama representa la entrada de temperaturas por la termocupla al MAX6675, los valores de este acondicionador son enviados al AVR por transmisión serial y de éste van al TFT Shield acoplándose a un valor de 3.3V para finalmente imprimirse los valores de temperatura o alguna alarma en el LCD Touch



**Figura 79 Equipo TE.85 Operativo**

#### 4.5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MEDIANTE CÁLCULOS

Se presentará a continuación los valores de temperaturas registradas en la práctica de radiación cuya finalidad el encontrar el valor aproximado de la emisividad del elemento del Equipo. Las dimensiones del elementos son: D=1cm y L=15cm

**Tabla 8**

**Tabla de Valores Práctica de Radiación**

Tensión (mV)	Temperatura Elemento (C)	Temperatura Contenedor (C)	Potencia Q=V*I (W)
65	231	23	13
75	261	24	18
85	291	25	23.8
95	324	26	34.2
105	345	26	46.2
115	363	26	55.2

Según la ecuación de Boltzmann tendremos:

$$Q_{radiación} = A * \epsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{atr}^4) \quad (34)$$

Y el área (A) es igual a

$$A = \pi * D * L \quad (35)$$

$$A = \pi * 0.01 * 0.15 = 0.0047124m^2 \quad (36)$$

Despejando el coeficiente de emisividad de la ecuación 34 tendremos:

$$\epsilon = \frac{Q_{radiación}}{A * \sigma * (T_s^4 - T_{atr}^4)} \quad (37)$$

$$\epsilon = \frac{13 W}{0.0047124m^2 * 5.67 * 10^{-8} W/mK^4 * ((231 + 273)^4 - (23 + 273)^4)} \quad (38)$$

$$\epsilon = 0.856 \quad (39)$$

Con ayuda de la tabla 9 se observa que el valor calculado está dentro del rango aceptable con un error del:

$$Error = \frac{Valor\ real - Valor\ medido}{Valor\ real} * 100\% \quad (40)$$

$$Error = \frac{0.88 - 0.856}{0.88} * 100\% = 2.72\% \quad (41)$$

**Tabla 9**

**Valores de Emisividad de Materiales Comunes**

<b>Valores de emisividad de materiales comunes</b>	
<b>Material</b>	<b>Emisividad*</b>
Hierro fundido, pulido	0,21
Carbón, en polvo	0,96
Cromo, pulido	0,1
Arcilla, cocida	0,91
Hormigón	0,54
Cobre, pulido,	0,01
Cobre, bruñido comercial	0,07
Cobre, oxidado	0,65
<b>Cobre, negro oxidado</b>	<b>0,88</b>
Cinta aislante, plástico negro	0,95
Esmalte **	0,9
Formica	0,93
Terreno congelado	0,93

## CAPÍTULO V ANÁLISIS DE COSTOS

### 5.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se expondrán los costos de la realización del proyecto de investigación REINGENIERIA Y MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO TE.85 DE CONVECCIÓN NATURAL Y RADIACIÓN PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL D.E.C.E.M. En el estudio técnico se adquiere diferentes perspectivas de los recursos económicos que implica la realización del proyecto previa su puesta en marcha.

#### 5.1.1. COSTOS DIRECTOS

Según Horngren, Sundem, & Stratton (2006,p. 133) “Los tipos más comunes de costos directos son los de partes y materias primas que constituyen un producto”. Cabe recalcar que el equipo TE.85 fue donado por el laboratorio de Conversión de la Energía del D.E.C.E.M y en este han sido montados e instalados los diferentes componentes del proyecto. En las siguientes tablas se detallan los valores que fueron parte de los costos directos:

**Tabla 10**  
**Equipos e Instrumentos**

EQUIPOS E INSTRUMENTOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	V. UNIT	V.TOTAL
TERMOCUPLA 0-250° MODELO: TIPO K BÁSTAGO 12" DIAMETRO 1/8" MARCA:RODAMIENTO INDUSTRIAL	1	60,00	60,00
		CONTINUA	

SENSOR DIGITAL DE PRESIÓN DE VACIO 0-1bar MODELO: SPAB CON INDICADOR MARCA: FESTO	1	250,00	250,00
MINI FUENTE DE PODER 650W MODELO: PSUM2065 MARCA: ANERA	1	25,00	25,00
ARDUINO MEGA MODELO: 2560 MARCA: ATMEL	1	26,80	26,80
LCD DISPLAY TOUCH 3.2" MODELO: 240374PQ. MARCA: YONGSE	1	30,00	30,00
LCD TFT01 ARDUINO MEGA SHIELD MODELO: v2.0 SHD10 MARCA: ELECFREAKS	1	16,00	16,00
AMPLIFICADOR PARA TERMOCUPLAS TIPO K MODELO: MAX6675 MARCA: ATMEL	2	25,00	50,00
MÓDULO RELE 2 CANALES MODELO: I040 MARCA: TOOGO (R)	1	8,00	8,00
LUZ PILOTO 22mm 100-120 V AC/DC MODELO: AD16-22D/S MARCA: CAMSCO	3	2,50	7,50
MINI VOLTIMETRO DC 0-30 V MODELO: D85-30 MARCA: FITTEK®	1	10,00	10,00
AMPERIMETRO DIGITAL 0- 1A DC	1	110,00	110,00
TRANSFORMADOR 110/220 V 60/50Hz MODELO: GEET66X33, 1 MARCA: GEXXX	1	30,00	30,00
<b>TOTAL USD</b>			623,30

**Tabla 11**  
**Tablero de Montaje**

<b>TABLERO DE MONTAJE</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>CANT.</b>	<b>V. UNIT</b>	<b>V. TOTAL</b>
ETIQUETAS DE IDENTIFICACIÓN VARIAS MEDIDAS EN VINIL			6,00	6,00
ACRÍLICO	TRANSPARENTE	1	6,00	6,00
30cm*15cm				
ACRÍLICO	NEGRO CON LETRAS EN EL FONDO	2	10,00	20,00
4cm*6cm				
PORTA FUSIBLE		3	0,40	1,20
FUSIBLE DE VIDRIO 10 A		3	0,10	0,30
			<b>TOTAL</b>	<b>33,50</b>
			<b>USD</b>	

**Tabla 12**  
**Accesorios**

<b>ACCESORIOS</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>CANT.</b>	<b>V. UNIT.</b>	<b>V. TOTAL</b>
RED COBRE ¾ x ½		1	1,59	1,59
TERMINAL COBRE SO-HI ¾		1	1,83	1,83
TERMINAL COBRE SO-HI ½		3	1,50	4,50
CODO SO-HI ½ x 90		1	2,33	2,33
BUSHING HG ½ " x ¼ "		1	0,38	0,38
BUSHING BR ¼ x 1/8		1	0,70	0,70
CONEXIÓN BR HM ½ x ¼ ROSCADA		1	4,34	4,34
ESTAÑO DE SOLDADURA 500g		1	29,00	29,00
VÁLVULA DE PASO TIPO BOLA		1	26,90	26,90
MANGUERA DE ALTA PRESIÓN 12 cm (DONACIÓN)		1	5,00	5,00
TUBERÍA DE COBRE FLEXIBLE 3/8 x 2m		1	142,00	142,00
PEGAMENTO SUPERGLU		1	0,60	0,60
CABLE ELÉCTRICO MULTIHILLO No. 16 ,13m		1	16,00	16,00
CABLE ELECTRICO FLEXIBLE No. 16, 5 m		1	4,50	4,50
CABLES PARA ARDUINO MACHO-HEMBRA		10	0,90	9,00
CABLES PARA ARDUINO MACHO-MACHO		15	0,90	13,65

CONTINUA



MASILLA EPOXICA			1	4,00	4,00
CANALETAS PLÁSTICAS 20X12 CON ADHESIVO			1	2,50	2,50
ÁNGULO EXTERNO PARA CANALETA			1	1,40	1,40
MASILLA PARA AUTO			1	40,00	40,00
ÁNGULO PLANO PARA CANALETA			1	1,10	1,10
CINTA DE TEFLÓN			1	4,00	4,00
				<b>TOTAL</b>	<b>315,32</b>
				<b>USD</b>	

**Tabla 13**  
**Misceláneos**

<b>MISCELÁNEOS</b>		<b>VALOR TOTAL</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>UDS</b>
SUMINISTROS DE OFICINA		50,00
TRANSPORTE		250,00
MATERIALES VARIOS		150,00
<b>TOTAL USD</b>		<b>450,00</b>

**Tabla 14**  
**Mano de Obra**

<b>DISEÑO</b>		<b>VALOR TOTAL</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>USD</b>
SR. ALFONSO PEREZ		60,00
MARCO HINOJOSA		150,00
<b>TOTAL USD</b>		<b>210,00</b>

**Tabla 15**  
**Asesoramiento**

<b>ASESORAMIENTO</b>		<b>VALOR TOTAL</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>USD</b>
DAVID BARONA		120,00
<b>TOTAL USD</b>		<b>120,00</b>

**Tabla 16**  
**Costos Directos**

<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>VALOR TOTAL</b>
EQUIPOS	E	623,30
INSTRUMENTOS		
TABLERO	DE	33,50
MONTAJE		
ACCESORIOS		315,32
MISCELANEOS		450,00
MANO DE OBRA		210,00
ASESORAMIENTO		120,00
<b>TOTAL USD</b>		<b>1.752,12</b>

### 5.1.2. COSTOS INDIRECTOS

Para entender cuáles son los costos indirectos del proyecto realizado, se citará a Barrera, (2011) “Se utilizan para acumular los gastos indirectos de manufactura se excluye los gastos de venta y los gastos generales y administrativos, porque son costos no relacionados con la manufacturación”. Estos valores se detallan en la tabla 14

**Tabla 17**  
**Costos Indirectos**

<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>VALOR TOTAL USD</b>
ASESORAMIENTO		100,00
PINTURA		30,00
TIÑER		3,00
ELEMENTOS	DE	20,00
CONEXIÓN	DE	
TUBERIA		
MISCELANEOS		80,00
<b>TOTAL USD</b>		<b>233,00</b>

### 5.1.3. COSTO TOTAL

El valor total invertido en la realización del proyecto se detalla en la siguiente tabla 15

**Tabla 18**  
**Costo Total del Proyecto**

<b>COSTO TOTAL</b>	
<b>DES CRIPCIÓN</b>	<b>VALOR TOTAL USD</b>
COSTOS DIRECTOS	1.752,12
COSTOS INDIRECTOS	233,00
<b>TOTAL USD</b>	<b>1.985,12</b>

### 5.2. ANÁLISIS FINANCIERO

Puesto que este proyecto se llevó a cabo para la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, se debe considerar realizar un análisis financiero citando la definición de Álvarez A. (2004, p.10) que dice “El Análisi Financiero forma parte de un sistema o proceso de información cuya misión es la de aportar datos que permitan conocer la situación actual de la empresa y pronosticar su futuro”, por tal razón la puesta en marcha del proyecto mejorará la infraestructura del Laboratorio y la facilidad de realizar prácticas para los estudiantes de cualquier carrera. .

Es importante tomar en cuenta que al desarrollar cualquier proyecto se debe tener una visión de su realización y un estimado de valor a invertir, puesto que de esta forma se incurrirá en desembolso de capital propio o financiamiento externo. Pero al ser este un proyecto de investigación y no de inversión no es necesario realizar un análisis financiero más detallado.

# CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1. CONCLUSIONES

- La información generada en el transcurso del proyecto es base importante para futuras aplicaciones en el Equipo, muchos criterios fueron adaptados según las necesidades y en base a las normas actuales
- El reemplazo del Sistema de Instrumentación del Equipo TE.85 del laboratorio permitirá a los estudiantes comprobar y profundizar en los temas de convección natural y radiación.
- La convección natural es la transferencia de calor que no involucra la corriente de fluidos externos, se generan naturalmente por diferencias de temperatura, en el Equipo para realizar esta práctica se debe tener en cuenta la velocidad que circula en el tanque y que la temperatura del elemento es el parte superior caliente mientras que la inferior fría y esta variará de acuerdo al cambio de presión.
- La radiación es la transferencia de calor entre dos sustancia que están separadas por el vacío la más caliente irradia energía en forma de ondas electromagnéticas, en el Equipo al tener presión constante se observa que la temperatura del elemento es la única que cambia y la del contenedor se mantiene, únicamente al romper el vacío la transferencia de calor pasa de un cuerpo al otro.
- Los valores calculados según los datos tomados en las pruebas permitieron comprobar el valor de la emisividad del elemento de cobre negro es el adecuado, lo que significa una correcta toma de datos en temperatura.

- El desarrollo del Interfaz Humano Máquina permite al operador realizar la toma de datos de manera sencilla, intuitiva y eficaz, ya que cuenta con dos ventanas para la presentación de resultados y el sensor de Presión de Vacío tiene su propio Interfaz de fácil interpretación.
- Los elementos utilizados como rangos de temperaturas, alarmas y representación del mímico en el Interfaz permitió hacerlo más agradable e intuitivo para el operador

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- En el montaje del equipo para las termocuplas es necesario considerar que, no se debe hacer una juntura con otro elemento ya que esto cambia el valor de la temperatura sensada.
- Es necesario esperar alrededor de dos a tres minutos a que la temperatura que se muestra en el HMI se estabilice para realizar la toma de datos.
- En caso de alguna descalibración de los valores presentados acudir a los sensores patrón.
- Dentro de las conexiones de tuberías realizadas es recomendado mantenerlas pero también es necesario hacer el cambio de la válvula de paso por una válvula tipo aguja o de otro tipo que permita un menor paso de aire entre las tuberías.
- Para reducir el tiempo de las prácticas se recomienda dejar con anterioridad el equipo encendido ya que hasta generar el vacío absoluto pasa alrededor de 1 hora y 30 minutos o más, sin olvidar que el valor máximo del sensor es de -145 PSI.
- Evitar contacto con los cables de las termocuplas ya que algún movimiento brusco puede desconectarlas así como a cualquier componente que esté conectado al equipo.
- Es recomendado utilizar el lápiz óptico capacitivo para la activación bajo presión sobre cualquier parte del HMI.
- Se recomienda que, mediante futuras realizaciones de proyectos de investigación se realice en este equipo un control de temperatura y de presión. Lo que facilitaría el aprendizaje de los estudiantes

## Bibliografía

- Alegsa, L. (12 de 05 de 2010). *ALEGSA.com.ar*. Obtenido de <http://www.alegsa.com.ar/Dic/pixel.php>
- Álvarez, A. (2004). *Introducción al Análisis Financiero 3a Ed.* España: Imprenta Gamma.
- Andrade Acosta, L., & Masabanda Narváez, M. (Enero de 2012). Diseño y Construcción de un equipo para el análisis de transferencia de calor por radiación y convección combinadas para el laboratorio de transferencia de calor. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Barrera, R. A. (Octubre de 2011). *Slidershare*. Obtenido de Investigación Costos de Fabricación: <http://es.slideshare.net/rgarza79/costo-indirecto-de-fabricacion-ronny-garza>
- CENGEL, Y. A. (1998). *TRANSFERENCIA DE CALOR*. McGrawHill.
- Cobo, R. (05 de Mayo de 2008). *El ABC de la Automatización*. Obtenido de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf>
- Díaz Hernández, M., Ibarra Alfaro, M., Aguilar Castillo, F., Cruz Saucedo, J., Salazar Villalpando, J., Velázquez Ortega, A., & Lara Rodríguez, R. (2006). *Física 3*. México: Umbral Editorial S.A de C.V.
- Ercilla, S. B., E. Burbano García, & C. Gracia Muñoz. (2003). *Física General 32a Edición*. Tebar S.L.
- Franco, C. A., & D., O. (25 de Abril de 2008). *OpenCourseWare*. Obtenido de Universidad de Sevilla: [http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema9/pagina\\_06.htm](http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema9/pagina_06.htm)
- Frederic P. Miller, Agnes F. Vandome, & McBrewster John. (2010). *Kirchhoff's Law of Thermal Radiation*. VDM Publishing, 2010.
- Giancoli, C. D. (2006). *Física Principios con aplicaciones 6ta edición*. México: Pearson Educación.
- Granollers, P. P. (15 de Mayo de 2009). *Universidad Politénica de Catalunya*. Obtenido de <http://www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/pantalla.pdf>
- Horngren, C., Sundem, G., & Stratton, W. (2006). *Contabilidad Administrativa*. México: Pearson Educacion.
- INCROPERA, F. P., & DeWITT, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: PRENTICE HALL.
- Inzunza, J. (21 de Noviembre de 2010). *UDEC.CL*. Obtenido de <http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/fisica/cap14.pdf>
- Jouglard, C., & Perez, A. (Noviembre de 2010). *DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE NUSSELT PARA TUBERÍAS*. Obtenido de <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/403/388>
- Martín Monroy, M. (1995). *Cap2. Procesos físicos de transferencia de calor*. Las Palmas de Gran Canaria.
- Mena Moreno, S., & Quinchuela Díaz, R. (Marzo de 2012). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA CALANDRA, PARA PLANCHAR SABANAS, MANTELES Y OTROS TEJIDOS UTILIZADOS EN HOTELES Y HOSPITALES QUE PROVIENEN DE LAS LAVADORAS DE LA EMPRESA*

- SANDY CLEAN*. Obtenido de TESIS :  
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/3726/1/UPS.KT00026.pdf>
- Moran, M., & Shapiro, H. (2005). *Fundamentos de Termodinámica Técnica* 2da edición. Reverté S.A.
- Pérez, E. M. (2007). *MICROCONTROLADORES PIC*. MARCOMBO, S.A.
- Reséndiz, S. (29 de Abril de 2010). *Física 1 y 2 (EXAMEN FINAL) SAM*. Obtenido de BlogSpot: <http://samrqfisica1-2.blogspot.com/2010/04/radiacion-del-cuerpo-negro-y-gris.html>
- Sciarini, P. E. (Marzo de 2009). *Ciencias Naturales-Física*. Obtenido de <http://cienciasnaturales-fisica.blogspot.com/2007/03/blog-post.html>
- Welty. (1994). *Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería*. México: LIMUSA NORIEGA-EDITORES.

## **ANEXOS**