

**Aplicación de estándares al ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento del laboratorio de suelos de la Universidad del Cauca**



**Ingrid Johana Hurtado Martínez  
Juan Pablo Santiago Pajajoy.**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán, Junio 2019**

**Aplicación de estándares al ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento del laboratorio de suelos de la Universidad del Cauca**



**Trabajo de Grado presentado para optar el título de Ingeniero Automático Industrial**

**Ingrid Johana Hurtado Martínez  
Juan Pablo Santiago Pajajoy.**

**Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda**

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán, Junio 2019**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
1.1 DEFINICIÓN Y RESEÑA HISTÓRICA DEL ASFALTO .....	3
1.2 REFINACIÓN DEL PETRÓLEO PARA LA OBTENCIÓN DEL ASFALTO .....	5
1.3 CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS .....	6
1.4 CATEGORÍAS DE CEMENTO ASFALTICO EN COLOMBIA .....	6
1.5 CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO .....	7
1.5.1 Características químicas .....	8
1.5.2 Características físicas .....	8
1.6 NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA PRUEBAS DE CALIDAD DEL ASFALTO .....	9
1.7 ENSAYO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (ELADMO) EN HORNO - INV E 720-07 .....	9
1.7.1 Descripción del ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento 10	
1.7.2 Equipo utilizado en el ensayo INV E 720-07 .....	10
1.8 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN PARA DETERMINAR LA CALIDAD EN LOS ASFALTOS .....	13
1.8.1 Prueba de penetración .....	13
1.8.2 Prueba de viscosidad .....	14
1.8.3 Prueba de ductilidad .....	14
1.8.4 Prueba de punto de ablandamiento .....	15
1.8.5 Prueba de pérdida de masa .....	15
1.9 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO .....	15
1.9.1 Investigaciones del envejecimiento en el asfalto .....	16
<b>2. INGENIERÍA CONCEPTUAL .....</b>	<b>17</b>
2.1 DIAGRAMA DE FLUJO EN BLOQUES DEL PROCESO ELADMO .....	17
2.2 MODELOS ISA S88 DEL PROCESO ELADMO EN EL LABORATORIO DE LA FIC .....	19
2.2.1 Modelo control de procesos .....	20
2.2.2 Modelo físico .....	22
2.2.3 Modelo control procedimental .....	24
2.3 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ELADMO A NIVEL DE LABORATORIO .....	26
2.3.1 Inspección visual interna y externa de la celda del ELADMO .....	26
2.3.2 Análisis de la encuesta realizada .....	31
2.4 REQUERIMIENTOS DE LA NUEVA CÉLULA Y PROCESO ELADMO .....	33
2.4.1 Requerimientos generales .....	33
2.4.2 Requerimientos de automatización .....	33
2.4.3 Requerimientos técnicos .....	34

<b>3.</b>	<b>INGENIERÍA BÁSICA.....</b>	<b>35</b>
3.1	CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS GENERALES.....	35
3.1.1	<i>Cumplimiento del RG1.....</i>	35
3.1.2	<i>Cumplimiento del RG2.....</i>	35
3.1.3	<i>Cumplimiento del RG3.....</i>	36
3.1.4	<i>Cumplimiento del RG4.....</i>	38
3.2	REQUERIMIENTOS DE AUTOMATIZACIÓN.....	40
3.2.1	<i>Cumplimiento del RA1.....</i>	40
3.2.2	<i>Cumplimiento del RA2.....</i>	40
3.3	DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN P&ID.....	46
3.4	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS.....	48
3.4.1	<i>Cumplimiento del RT1.....</i>	48
3.4.2	<i>Cumplimiento del RT2.....</i>	53
3.4.3	<i>Cumplimiento del RT3.....</i>	54
3.4.4	<i>Cumplimiento del RT4.....</i>	55
<b>4.</b>	<b>PLANTEAMIENTO Y EJECUCIÓN DE MEJORAS EN EL SISTEMA .....</b>	<b>58</b>
4.1	MEJORAS MECÁNICAS.....	58
4.1.1	<i>Reemplazo del motor 1 asociado al rotor jaula de ardilla.....</i>	58
4.1.2	<i>Adecuación eje rotor jaula de ardilla.....</i>	61
4.1.3	<i>Mantenimiento sistema medidor de flujo de aire horno.....</i>	62
4.1.4	<i>Propuesta de limpieza para protección contra residuos asfalto.....</i>	63
4.2	MEJORAS TÉRMICAS.....	65
4.2.1	<i>Perdidas térmicas - Diagrama de Sankey.....</i>	65
4.2.2	<i>Perdidas por falta de aislamiento térmico entre las resistencias eléctricas, la base del horno y la cámara de calentamiento.....</i>	67
4.2.3	<i>Perdidas de la puerta recámara de calentamiento.....</i>	68
4.2.4	<i>Perdidas por los ejes del ventilador.....</i>	69
4.3	MEJORAS ELÉCTRICAS.....	69
4.3.1	<i>Control de temperatura del Horno.....</i>	72
4.3.2	<i>Sintonización del controlador industrial REX C100.....</i>	72
4.3.3	<i>Pruebas de comportamiento del lazo de control sintonizado frente a los disturbios</i>	78
4.3.4	<i>Análisis pruebas.....</i>	81
<b>5.</b>	<b>PRUEBAS DE VALIDACIÓN.....</b>	<b>82</b>
5.1	consideraciones previas.....	83
5.2	Procedimiento.....	84
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>

<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>91</b>
1.	Anexo A: Norma I.N.V.E 720 – 07 .Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento. ....	91
2.	Anexo B: Evolución del estudio del fenómeno del envejecimiento de los asfaltos ..	98
3.	Anexo C: Diagnostico visual del horno de lámina asfáltica delgada con base a la norma INVE 720 -07 .....	102
4.	Anexo D: Cuestionario de encuesta del laboratorio de suelos .....	107
5.	Anexo E: Guía para el desarrollo del proceso del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento .....	111
6.	Anexo F: Acta de entrega de buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento .....	115
7.	Anexo G: Propuesta de formatos de actividades .....	117
8.	Anexo H: Cuadros de Modelo de control, procedimental mejorados. ....	123
9.	Anexo I: Características motor .....	125
10.	Anexo J: Explicación detallada cumplimiento RT2 .....	127
11.	Anexo K: Explicación detallada cumplimiento RT3.....	134
12.	Anexo L: Función de transferencia del horno .....	137

## LISTA DE IMÁGENES

Figura 1 - 1 Composición del asfalto .....	3
Figura 1 - 2 Estados del asfalto. a) estado sólido b) estado liquido .....	3
Figura 1 - 3 Uso del betún como relleno del cuerpo para momificación .....	4
Figura 1 - 4 Antiguo gravado de los trabajadores de la carretera de asfalto .....	4
Figura 1 - 5 Proceso de refinación del petróleo.....	5
Figura 1 - 6 Comportamiento visco elástico del asfalto frente a una carga.....	8
Figura 1 - 7 Ensayo de penetración .....	14
Figura 1 - 8 Viscosímetro capilar de vidrio.....	14
Figura 1 - 9 Moldes para prueba de ductilidad.....	15
Figura 2 - 1 Diagrama de flujo en bloques del ELADMO .....	17
Figura 2 - 2 Diagrama de flujo en bloques del ELADMO por operaciones.....	19
Figura 2 - 3 Plano P&ID del horno.....	29
Figura 2 - 4 Diagrama de lazo de control de temperatura .....	29
Figura 2 - 5 Diagrama de lazo de control de los motores.....	30
Figura 2 - 6 Respuestas respecto a documento guía estructurado para la realización del ELADMO de acuerdo a la norma INV E 720-07 en el laboratorio de suelos de la FIC .....	32
Figura 2 - 7 Respuestas respecto a equipos utilizados en el ELADMO.....	33
Figura 3 - 1 PFD por operaciones del ELADMO.....	41
Figura 3 - 2 Diagrama P&ID de horno del horno de lámina asfáltica delgada .....	48
Figura 3 - 3 Motor tipo jaula de ardilla .....	49
Figura 3 - 4 Propuesta de instrumentación industrial para protección eléctrica de horno....	54
Figura 3 - 5 Propuesta de instrumentación del lazo de control de temperatura para horno .	55
Figura 3 - 6 Posición recomendada para ubicación de sensor .....	56
Figura 3 - 7 Requisitos específicos para termómetros E-1 .....	56
Figura 4 - 1 Distribución de la energía térmica .....	66
Figura 4 - 2 Configuración de los ladrillos en el horno.....	68
Figura 4 - 3 Seguro de la chapa de la puerta principal .....	69
Figura 4 - 4 Lazo cerrado de control de temperatura .....	72
Figura 4 - 5 Modelo de tarjeta electrónica implementado.....	74
Figura 4 - 6 Metodología de desarrollo .....	75
Figura 4 - 7 conexión USB al computador .....	76
Figura 4 - 8 Programa PLXDAC.....	76
Figura 4 - 9 Curva de reacción del comportamiento térmico .....	77
Figura 4 - 10 Constantes obtenidas para el controlador .....	78
Figura 4 - 11 Horno de prueba a temperatura de operación de 163°C .....	78
Figura 4 - 12 Graficación en el software Matlab v15.....	80
Figura 5 - 1 Verificación de peso de la muestra.....	84
Figura 5 - 2 Horno de envejecimiento con la puerta cerrada y temperatura a 163 °C .....	85
Figura 5 - 3 Recipiente con muestra fuera del horno .....	85

Figura 5 - 4 Resultados realización de ELADMO .....	87
Figura A - 1 Esquema del flujo de aire. Vista frontal.....	94
Figura A - 2 Plataforma metálica circular .....	94
Figura A - 3 Botella para muestra .....	95
Figura J - 1 Diagrama de lazo motor 1 .....	132
Figura J - 2 Diagrama de lazo motor 2 .....	132
Figura J - 3 Plano de mando y potencia 1 .....	133
Figura J - 4 Plano de mando y potencia 2 .....	133
Figura K - 1 Lazo control de temperatura realimentado propuesto.....	135
Figura K - 2 Diagrama de lazo del control de temperatura para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.....	136
Figura L - 1 Horno de lámina asfáltica delgada en movimiento .....	137
Figura L - 2 Termocupla tipo K .....	140
Figura L - 3 Max 6675.....	141
Figura L - 4 Sensor de corriente ACS12-20.....	141
Figura L - 5 Relé de estado sólido SSR-40DA-H .....	142
Figura L - 6 Método de cruce por Cero.....	142
Figura L - 7 Arduino Mega Adk 2560.....	143
Figura L - 8 Interfaz de programación Arduino .....	143
Figura L - 9 Programa PLXDAC .....	144
Figura L - 10 Diagrama de conexión de los dispositivos electrónicos para la adquisición de datos.....	145
Figura L - 11 Fotos conexión de los dispositivos electrónicos para la adquisición de datos .....	145
Figura L - 12 Datos adquiridos con SW PLXDAC .....	146
Figura L - 13 SW en Matlab para recolección de datos .....	146
Figura L - 14 Curva de reacción del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento en lazo abierto .....	149
Figura L - 15 Valores de t1 y t2 .....	149

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - 1 Clasificación de los materiales asfálticos	6
Tabla 1 - 2 Especificaciones cemento asfáltico	7
Tabla 1 - 3 Elementos del Horno de lámina asfáltica delgada en movimiento	11
Tabla 2 - 1 Entradas y salidas del ELADMO	18
Tabla 2 - 2 Modelo de proceso del ELADMO	21
Tabla 2 - 3 Modelo físico del ELADMO	23
Tabla 2 - 4 Control procedimental del proceso de ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento	25
Tabla 2 - 5 Estado actual de los equipos de la celda del proceso ELADMO	28
Tabla 3 - 1 Cálculos de eficiencia de los instrumentos presentes en el horno	37
Tabla 3 - 2 Identificación de variables	40
Tabla 3 - 3 Modelo de proceso mejorado para el ELADMO	42
Tabla 3 - 4 Modelo físico mejorado para el ELADMO	43
Tabla 3 - 5 Modelo de control procedimental mejorado para el ELADMO	45
Tabla 3 - 6 Descripción conceptual del horno de lámina asfáltica delgada	47
Tabla 3 - 7 Características - motor tipo jaula de ardilla	50
Tabla 3 - 8 Comparación de valores teóricos y prácticos PT100 vs Termocupla tipo K	52
Tabla 3 - 9 Requisitos específicos para termómetros E-1	57
Tabla 4 - 1 Mejoras mecánicas requeridas para el soporte del motor	59
Tabla 4 - 2 Mejoras mecánicas propuestas para el soporte del motor	60
Tabla 4 - 3 Mejoras requeridas y propuestas para el eje rotor jaula de ardilla	61
Tabla 4 - 4 Mantenimiento sistema medidor de flujo de aire horno	62
Tabla 4 - 5 Propuesta de limpieza para protección contra residuos asfalto	64
Tabla 4 - 6 Pérdidas térmicas más representativas del horno	66
Tabla 4 - 7 Disposición resistencias eléctricas y principales tipos de aislamiento térmico	67
Tabla 4 - 8 Descripción mejoras eléctricas	70
Tabla 4 - 9 Constantes requeridas para la calibración	73
Tabla 4 - 10 Constantes obtenidas para el controlador	77
Tabla 4 - 11 Tiempo que el horno tardaba en alcanzar la temperatura de 163°C	79
Tabla 4 - 12 Cálculos de duración de los disturbios en minutos	80
Tabla 5 - 1 Insumos utilizados para el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento	82
Tabla 5 - 2 Resultados realización de ELADMO.....	86
Tabla A - 1 Métodos de ensayo .....	97
Tabla B - 1 Pruebas de envejecimiento de asfaltos y métodos de evaluación.....	98



Tabla C - 1 Comparación física de la condición actual del horno con las condiciones establecidas por la norma INVE 720 -07.....	102
Tabla E - 1 Parámetros para ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento.....	111
Tabla E - 2 Especificaciones del cemento asfáltico .....	114
Tabla H - 1 Verificar fluidez de la muestra .....	123
Tabla H - 2 Fase medir índice de viscosidad.....	123
Tabla H - 3 Fase medir índice de ductilidad.....	124
Tabla H - 4 Fase medir punto de ablandamiento.....	124
Tabla I - 1 Características motor .....	125
Tabla J - 1 Factores teóricos para la selección del tipo de arranque de los motores .....	127
Tabla J - 2 Factores que se tuvieron en cuenta para la selección del tipo de arranque de los motores .....	127
Tabla J - 3 Apartes considerados de la norma NTC 2050.....	128
Tabla J - 4 Cálculos realizados para las cargas eléctricas que posee el horno .....	129
Tabla J - 5 Capacidad de corriente de cables AWG de acuerdo al amperaje según la norma NTC 20500 .....	129
Tabla J - 6 Calculo de diámetros adecuados para los cables internos .....	130
Tabla J - 7 Selección de interruptores .....	130
Tabla J - 8 Contactor y relé térmicos seleccionados .....	131
Tabla K - 1 Equipos a utilizar en el lazo de control de temperatura .....	134
Tabla L - 1 Parámetros sugeridos por ZyN para el diseño del controlador.....	148
Tabla L - 2 Valores de constantes para el tipo de controlador .....	150

## INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial proporciona una base esencial para el funcionamiento de todos los sectores económicos de una comunidad y genera una amplia gama de beneficios sociales, culturales y por qué no, tecnológicos. Además de esto, permite la comunicación y circulación de la sociedad facilitando así el acceso a educación, salud, vivienda, alimentación e incluso trabajo. Es por ello que conservarla adecuadamente es imprescindible para preservar y aumentar estos beneficios con el menor impacto ambiental posible. Pues la insuficiencia en las inversiones o una mala administración de la red carretera se reflejará en el estado de las vías y por ende tendrá graves consecuencias para la economía y el bienestar social.

Es en este punto donde el asfalto toma fuerza pues es uno de los principales insumos para la pavimentación vial, es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, presenta las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo funciones como impermeabilizar la estructura del pavimento y proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados.

Teniendo clara su importancia y participación en el desarrollo social es que se resalta el compromiso que se debe tener desde la academia y grupos de investigación para aportar elementos que permitan contribuir en la mejora de la calidad tanto en la producción como en el uso de este material.

En este orden de ideas es que surge la necesidad de desarrollar el presente trabajo de grado buscando brindarle a la comunidad en general las herramientas necesarias para la correcta realización del Ensayo de Lámina Asfáltica Delgada en Movimiento (ELADMO), el cual permite determinar la calidad del asfalto antes de ser usado en la pavimentación ahorrando así recursos como dinero y tiempo.

Para ello este trabajo presenta una propuesta de automatización de la célula de proceso del ELADMO, que se encuentra ubicada en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad del Cauca. Para la ejecución de este ensayo se requieren equipos e insumos específicos los cuales se encuentran en el laboratorio, pero desafortunadamente no todos están en óptimas condiciones, lo que obstaculiza la realización del mismo, además no se cuenta con un documento guía formal que describa los pasos requeridos para llevarlo a cabo.

La propuesta de automatización consiste en desarrollar las ingenierías: conceptual, básica y detallada para el ELADMO bajo el estándar ISA S88 parte I. Los resultados que se esperan de cada una son:

- De la ingeniería conceptual: una lista de requerimientos o problemas encontrados en el desarrollo del proceso ELADMO,
- De la ingeniería básica: propuestas y soluciones a cada requerimiento encontrado
- De la ingeniería detallada: la validación de las mejoras planteadas.

Logrando con esto llevar a cabo por primera vez y en adelante el ELADMO en el laboratorio de la FIC de la Universidad del Cauca

Para la ejecución del presente trabajo de grado se plantearon los siguientes objetivos:

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer un método basado en las normas I.N.V.E -720- 07 e ISA S88 y protocolos de calibración de equipos para la realización del ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento, en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

### **Objetivos específicos**

- Determinar las actuales condiciones del ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento, realizado en el laboratorio de suelos de la FIC, que no satisfacen la norma I.N.V.E -720- 07.
- Proponer nuevos diseños procedimentales, modelados con ISA S88, y mejoras tecnológicas soportadas en protocolos de calibración al ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento, acordes a los requerimientos establecidos por la norma I.N.V.E -720-07.
- Realizar una prueba de validación del método propuesto para la realización del ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento según la norma I.N.V.E -720- 07.

Para abordar los diferentes objetivos, se desarrolla el presente documento que contiene un primer capítulo de generalidades, un segundo capítulo de ingeniería conceptual, un tercero de ingeniería básica, un cuarto capítulo de planteamiento y ejecución de mejoras en el sistema y un quinto capítulo correspondiente a las pruebas de validación, además se encuentran las conclusiones, trabajos futuros, bibliografía y anexos correspondientes.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 DEFINICIÓN Y RESEÑA HISTÓRICA DEL ASFALTO

- **Definición:**

El asfalto es un material bituminoso, constituido principalmente por asfaltenos y maltenos, los cuales poseen resinas, aceites (Ver Figura 1 - 1) y otros elementos que le proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad. El asfalto es de color negro y pegajoso, puede ser sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Es un material que al exponerse al calor toma consistencia líquida (Ver Figura 1 - 2), puede ser derivado de forma natural o a través del procesamiento de petróleo [1].

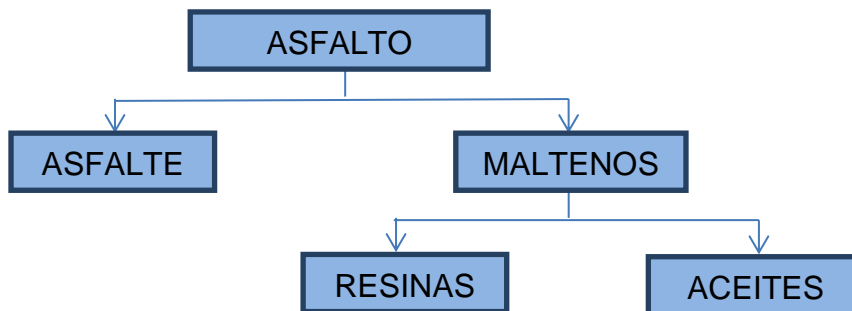


Figura 1 - 1 Composición del asfalto  
Fuente [1]



a)

b)

Figura 1 - 2 Estados del asfalto. a) estado sólido b) estado líquido

- **Reseña histórica del asfalto:**

Según [2], la palabra asfalto se deriva del acadio “*Sphalto*” que significa “lo que hace caer”, luego fue adoptada por el griego, pasó al latín, más adelante, al francés y posteriormente, al español *asfalto*. Su utilización antigua data aproximadamente del año 3200 a.C. donde estudios constataron que los sumerios le daban diferentes

usos, como por ejemplo unir ladrillos, realizar pisos de interiores o como impermeabilizante de paredes y techos. Además, los egipcios lo empleaban en el proceso de momificación (ver Figura 1 - 3) y los árabes desarrollaron una solución medicinal con asfalto, el cual se ha extendido hasta la época actual [2].



Figura 1 - 3 Uso del betún como relleno del cuerpo para momificación  
Fuente: [3]

Más adelante (hacia el siglo XIX) en Europa se utilizó el asfalto con fines de pavimentación, con lo cual se innova en la construcción vial (ver Figura 1 - 4), y hacia 1890 aparece la primera mezcla en caliente con asfalto natural y a partir de 1902 se empieza a utilizar el asfalto destilado de petróleo por sus características de pureza en comparación con los asfaltos naturales, esto los convirtió en la principal fuente de abastecimiento actualmente [2].

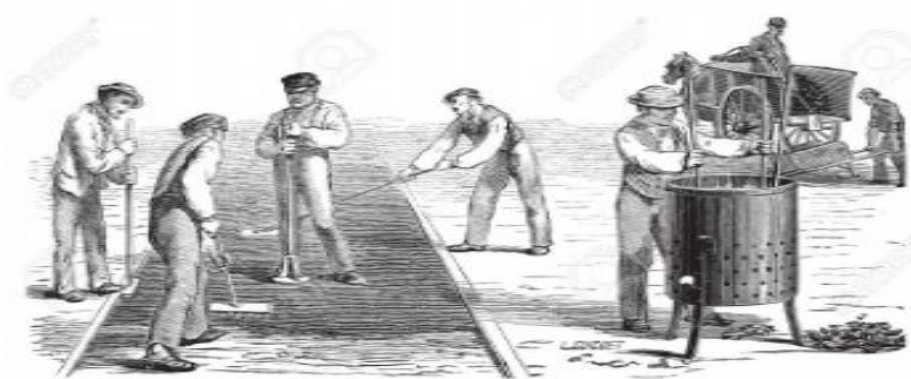


Figura 1 - 4 Antiguo gravado de los trabajadores de la carretera de asfalto  
Fuente: [4]

## 1.2 REFINACIÓN DEL PETRÓLEO PARA LA OBTENCIÓN DEL ASFALTO

La refinación es el proceso al que se somete el crudo del petróleo, que consiste en separar los diferentes productos de este a través del aumento de la temperatura en los hornos tubulares, este proceso conocido como destilación (Ver Figura 1 - 6 Comportamiento visco elástico del asfalto frente a una carga). La destilación simple separa los productos livianos, mientras que los productos más pesados o gasóleos, como el asfalto, requieren para la separación una combinación de calor y vacío [5].

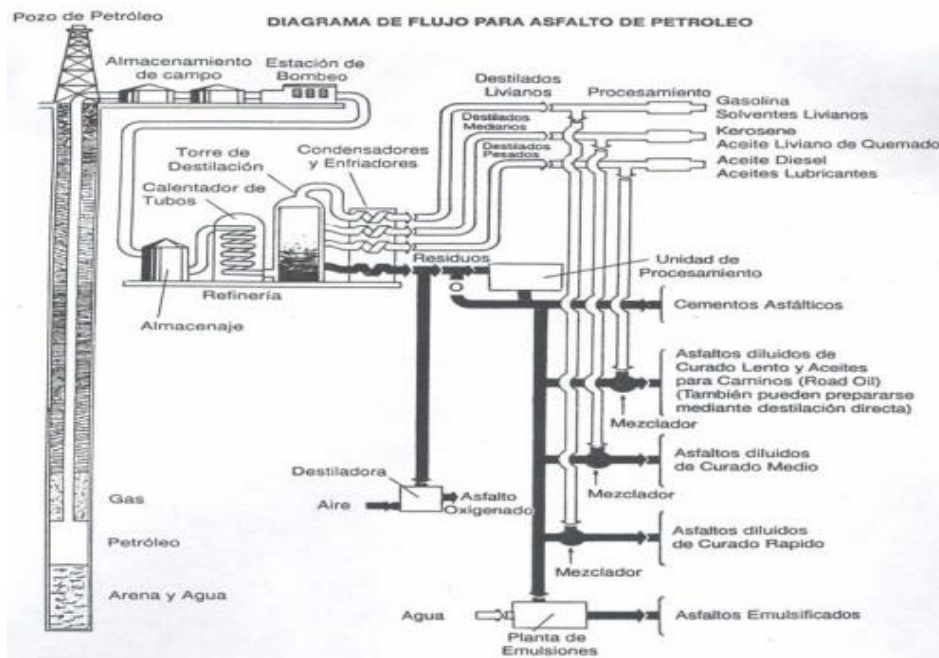


Figura 1 - 5 Diagrama de flujo para asfalto de petróleo

Fuente [1]

Dado que cada necesidad requiere un tipo de asfalto diferente, cuyas características cumplan con los requisitos del usuario, se hace necesaria la mezcla de varios tipos de crudo previo a la refinación, con el fin de modificar las propiedades y la calidad del asfalto resultante. Posterior a la mezcla de crudos de petróleo, se puede emplear dos procesos para la producción del asfalto:

- Destilación por vacío, en la cual se emplea el calor y vacío para separar el asfalto del crudo
- Extracción con solvente en la cual se logra un asfalto residual, posterior a la separación de varios componentes del crudo.

Al cambiar los asfaltos resultantes controlando las proporciones, se obtiene un nuevo asfalto con propiedades totalmente modificadas y según requerimientos específicos. [7]

Existen diferentes tipos de asfalto, los cuales de acuerdo a su materia asfáltica tienen diferentes usos, la clasificación de asfaltos se presenta a continuación.

### 1.3 CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS

Los materiales asfálticos se clasifican en: cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, según su uso (Ver Tabla 1 - 1) [1].

Tabla 1 - 1 Clasificación de los materiales asfálticos

Material asfáltico	Método para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elementos base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados. Son excelentes ligantes pues las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones. Las emulsiones asfálticas son los materiales líquidos asfálticos estables.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de sub-bases y bases hidráulicas. Son los asfaltos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente que se clasifican según su velocidad de fraguado.

Fuente: [1]

Se resalta que en el presente trabajo se considerara el cemento asfáltico para el estudio. A demás de la clasificación del cemento, se exponen las diferentes categorías del cemento asfáltico utilizadas en Colombia.

### 1.4 CATEGORÍAS DE CEMENTO ASFALTICO EN COLOMBIA

Según el Instituto de Desarrollo Urbano [6], la categorización del cemento asfáltico está asociada a su grado de penetración en décimas de milímetros. Con base en lo anterior y en la disponibilidad de los asfaltos que se producen en Colombia, existen tres categorías de cemento asfáltico: 40–50, 60–70 y 80–100, cada uno de ellos con sus respectivas especificaciones. La Tabla 1 - 2 presenta algunas de las características principales como son el índice de penetración, la viscosidad, el punto de ablandamiento entre otros, con sus respectivas unidades, norma de ensayo y los valores para cada categoría de cemento asfáltico mencionada.

Tabla 1 - 2 Especificaciones cemento asfáltico

Característica	Unidad	Norma de ensayo	40-50		60-70		80-100	
			Min	Max	Min.	Max	Min.	Max.
<b>Asfalto original</b>								
Penetración	0.1mm	INV E 706-07	40	50	60	70	80	100
Índice de penetración	–	--	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0	-1.0	+1.0
Viscosidad a 60°C	Pa-s	ASTM D-4402	200	400	150	300	100	200
Viscosidad a 135°C	Pa-s	ASTM D-4402	0.27	0.65	0.22	0.45	0.15	0.40
Punto de ablandamiento	°C	INV E- 712-07	49	59	45	55	42	52
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	INV E- 702-07	100	--	100	--	100	--
Solubilidad en tricloroetileno	%	INV E- 713-07	99	--	99	--	99	--
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	INV E- 709-07	232	--	232	--	232	--

Fuente: [6]

### 1.5 CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico presenta características de un material elástico a bajas temperaturas y a altas temperaturas, características de un material viscoso, por lo que se dice que tiene un comportamiento visco elástico (ver Figura 1 - 6); siendo esta la característica más destacada, puesto que este efecto durante su procesamiento y uso es de gran importancia. Otra característica del cemento asfáltico es la capacidad de reacción con el oxígeno para producir la oxidación en su estructura, proceso que da endurecimiento al asfalto y mayor fragilidad [1].



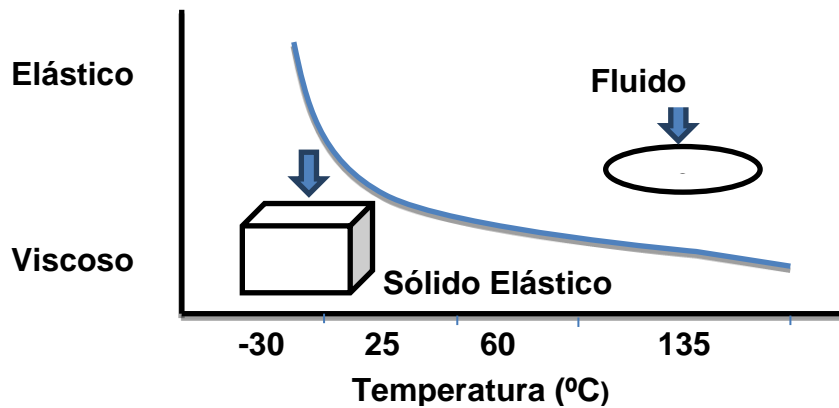


Figura 1 - 6 Comportamiento visco elástico del asfalto frente a una carga  
Fuente: [3]

Además de las características nombradas, el cemento asfáltico tiene características químicas y físicas que se describen a continuación según [7].

### 1.5.1 Características químicas

El cemento asfáltico está compuesto por combinación de hidrocarburos, teniendo como principales componentes el carbono, el hidrogeno y el azufre (en menor cantidad), nitrógeno, oxígeno, metales como vanadio, níquel, calcio y magnesio.

El asfalto una vez es expuesto ante un solvente no polar puede ser dividido en dos mezclas: la primera, una fracción soluble compuesta por resinas, aromáticos y parafinas, son los que le confieren al asfalto la adherencia o la cualidad de ser pegajoso; el otro componente de la fracción soluble son los aceites ya que sirven de medio de transporte de los elementos.

### 1.5.2 Características físicas

Los asfaltos presentan ciertas propiedades físicas de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, dichas propiedades son:

- **Durabilidad:** indica la capacidad que posee el asfalto para mantener las propiedades con las que fue fabricado, esta propiedad es afectada por el diseño de la mezcla, las características del agregado y la mano de obra en la construcción.
- **Adhesión y cohesión:** es la capacidad para adherirse al agregado, el asfalto debe mantener la unión de los agregados en la mezcla de pavimentación sin cambios de firmeza y posición.
- **Susceptibilidad a la temperatura:** es uno de los factores más importantes en el procesamiento y uso del asfalto, debido a esta característica, se puede

indicar la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado e indicar la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla.

- **Endurecimiento:** al ser expuesto el asfalto al aire, se produce un proceso llamado oxidación que a su vez le ocasiona un endurecimiento aumentando así su fragilidad. A mayor temperatura, más rápido se produce la oxidación y por tanto más pronto podría perder endurecimiento.
- **Envejecimiento:** esta característica se explica en el numeral siguiente debido a la relevancia de la misma.

## **1.6 NORMATIVIDAD COLOMBIANA PARA PRUEBAS DE CALIDAD DEL ASFALTO**

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) es una agencia de la Rama Ejecutiva del Gobierno de Colombia a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas, carreteras y el mantenimiento de las mismas. Esta entidad basada en las normas ASTM D2872-07 y AASHTO T 240 – 03, ha realizado la adecuación de estas para generar una serie de normas de ensayo de materiales para carreteras, con el fin de que los procedimientos de muestreo y pruebas para proyectos que se realizan en laboratorios, sigan un estándar establecido. Estas normas fueron agrupadas en secciones de acuerdo al objetivo a abordar. En el caso de las secciones 700 y 800 corresponden a “Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos”, dentro de las cuales se encuentra la norma de Ensayo del Instituto Nacional de Vías de Colombia número 720-07 (INV E-720 -07), titulado “Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria”, el cual es elegido como referencia para ser utilizado en gran parte del país. Para la aplicación óptima del ensayo INVE 720 -07 es necesario aplicar el artículo 410-13 suministro de cementos asfálticos establecido por INVIAS.

## **1.7 ENSAYO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (ELADMO) EN HORNO - INV E 720-07**

La norma INV E 720-07 tiene como objetivo medir el efecto del calor y del aire sobre una lámina delgada de asfalto en movimiento, para lograr determinar los cambios producidos en una muestra, se hace uso de un horno con características específicas el cual permita que esta llegue al punto de envejecimiento que se desea analizar, se debe hacer la medición de ciertas propiedades del asfalto antes y después de realizar el ensayo.

La norma INV E 720-07 establece el siguiente método para poner en práctica el ensayo: calentar la película de material asfáltico en movimiento en un horno a 163°C, durante 85 minutos. Los efectos del calor y del aire se determinarán a partir de los cambios en los valores físicos antes y después del tratamiento en el horno.

La aplicación de esta norma indicará el cambio producido en las propiedades del asfalto durante el proceso convencional de mezclado en caliente, aproximadamente a una temperatura de 150°C, mediante medición de la viscosidad (si se desea, se pueden efectuar también medidas de la penetración o de la ductilidad). Lo anterior produce un residuo diferencial que se aproxima a la condición del asfalto, cuando va a ser usado en procesos de pavimentación. Para más detalle acerca de la norma ver Anexo A: Norma I.N.V.E 720 – 07 .Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento..

### **1.7.1 Descripción del ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento**

Para realizar el ensayo primero se debe calentar la muestra asfáltica en un horno adicional, de tal manera que pase de un estado sólido a un estado líquido; adicionalmente se requieren ocho recipientes cilíndricos de vidrio, en cada uno de ellos se verterá un promedio de 35 gramos de la muestra, con el horno a temperatura de operación, se disponen los recipientes que contienen el asfalto en una plataforma, de forma tal que quede balanceada, se cierra la puerta y se hace girar la plataforma a una velocidad de 15 revoluciones por minuto (RPM), se inicia el flujo de aire a 4000 milímetros por minuto (ml/min). Se mantienen las muestras en el horno girando por 85 minutos a una temperatura de 163°C, la cual debe alcanzarse en los primeros 10 minutos una vez iniciado el ensayo, de no ser así el ensayo debe suspenderse.

Adicional a esto se realizan unas pruebas para analizar características como: viscosidad, pérdida de masa, penetración, punto de ablandamiento y ductilidad, cuyos índices reflejan los cambios físicos producidos en la muestra, por lo tanto deben realizarse las mediciones al inicio y al final del ensayo de envejecimiento a fin de establecer una comparación.

A continuación, se expone con más detalle las pruebas de calidad que pueden realizarse para determinar la calidad en los asfaltos.

### **1.7.2 Equipo utilizado en el ensayo INV E 720–07**



Para la realización del ensayo INV E 720–07, se requiere de ciertos equipos e instrumentos establecidos por la norma los cuales se describen a continuación:


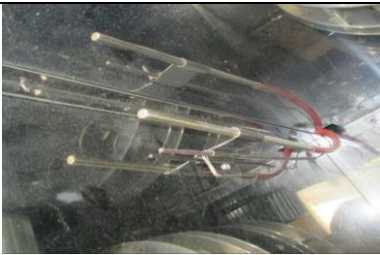
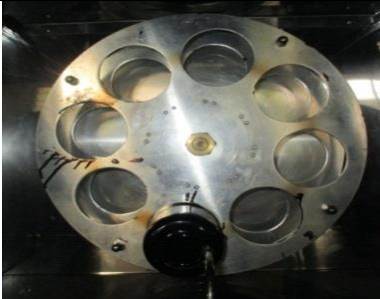


- **Horno:** Debe ser de pared doble del tipo convección los cuales tienen la capacidad de generar una temperatura uniforme dentro del mismo gracias a la acción de los ventiladores para llevar el calor a cada parte en su interior, la puerta debe tener una ventana que permita la vista sin obstrucción del interior del horno (Ver Tabla 1 - 3, ítem 1). En su interior, en el punto intermedio a lo ancho del horno en la pared superior, debe tener un ventilador del tipo jaula de ardilla, instalado de tal forma que el sentido de giro sea en

dirección opuesta a sus paletas, con el fin de que este sistema de ventilación sea de succión (Ver Tabla 1 - 3, ítem 2). Además, el horno debe tener un control termostático, adecuado para mantener la temperatura a 163°C. Los elementos de calefacción son dos resistencias que se hallan en la parte inferior debajo del piso del horno (Ver Tabla 1 - 3, ítem 3); el elemento sensor de temperatura está ubicado en la pared izquierda del horno (Ver Tabla 1 - 3, ítem 4), adicional debe haber un termómetro que permite visualizar la temperatura real dentro del horno mientras se realiza el ensayo.

Por otra parte, el horno en su interior dispone de una plataforma circular vertical que tiene a su vez aberturas y ganchos adecuados para sostener los ocho recipientes en posición horizontal, esta plataforma es mecánicamente guiada a una velocidad de 15 +/- 0.2 rpm. (Ver Tabla 1 - 3, ítem 5). Por último, el horno debe tener un dispositivo de chorro, cuyo objetivo es soplar aire caliente dentro de cada botella en su punto de recorrido más bajo; el dispositivo de chorro se conecta a un tubo de refrigeración de cobre el cual debe estar roscado y debe permanecer sobre el fondo plano del horno y conducir aire fresco, seco y libre de polvo (Ver Tabla 1 - 3, ítem 6).

Tabla 1 - 3 Elementos del Horno de lámina asfáltica delgada en movimiento

Ítem	Nombre del elemento	Gráfica
1	Ventana de vidrio en la puerta del horno	
2	Ventilador del tipo jaula de ardilla	

3	Elementos de calefacción	
4	Elemento sensor de temperatura	
5	Plataforma circular vertical	
6	Serpentín, tubo de refrigeración de cobre	
7	Medidor de flujo	

8	Controlador de temperatura	
9	Recipientes	

- **Estante enfriador**, construido de lámina metálica de estaño, aluminio o acero que permita colocar los recipientes que contienen la muestra en posición horizontal para que se enfríen.
- **Termómetro**, este debe medir la pérdida de calor, conforme con la exigencia de la ASTM E-1.

## 1.8 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN PARA DETERMINAR LA CALIDAD EN LOS ASFALTOS

Debido a que la construcción temprana de pavimentos asfálticos fue empírica, se vio la necesidad de renovar los métodos para el control de calidad, donde se proponen diversas pruebas para normalizar las características físicas de los cementos asfálticos, en la actualidad se destacan: prueba de penetración, prueba de viscosidad, prueba de punto de ablandamiento, prueba de ductilidad, prueba de pérdida de masa, entre otras.

Las principales pruebas se exponen a continuación

### 1.8.1 Prueba de penetración

El objetivo principal de esta prueba de caracterización es determinar la consistencia de un asfalto con una composición es cien por ciento (100%), a una temperatura específica. Para realizar esta prueba lo primero que se debe hacer es estabilizar la muestra a una temperatura de 25°C, para posteriormente colocar una aguja en la superficie con una carga de 100 gramos en un tiempo de 5 segundos (ver Figura 1 - 7), esto con el fin de establecer si la consistencia es suave o dura [8].

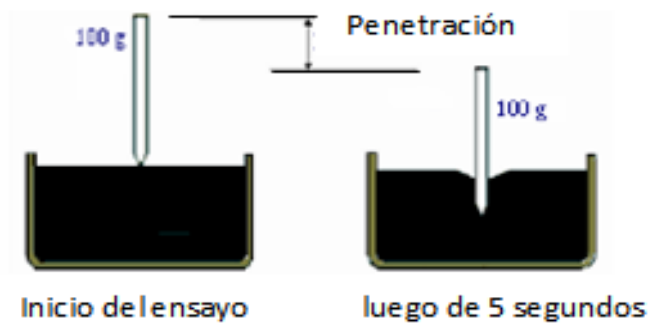


Figura 1 - 7 Ensayo de penetración  
Fuente: Modificada de [3]

### 1.8.2 Prueba de viscosidad

Esta prueba de caracterización tiene como objetivo, medir la viscosidad aparente del asfalto a elevadas temperaturas, iniciando en los 60°C hasta los 200°C, para la medición se emplea un viscosímetro capilar de vidrio a una temperatura controlada de 60°C (ver Figura 1 - 8). La viscosidad se calcula multiplicando el tiempo en segundos que demora la muestra en atravesar el tubo capilar por el factor de calibración del viscosímetro [8].



Figura 1 - 8 Viscosímetro capilar de vidrio

### 1.8.3 Prueba de ductilidad

El objetivo de esta prueba de caracterización es determinar la ductilidad de los materiales asfálticos, cuya consistencia puede ser sólida o semisólida. El ensayo se realiza a una temperatura de 25°C y a una velocidad de tracción de 50 +/- 2.5 mm por minuto. Para la realización de la prueba, lo primero que se debe hacer es preparar los moldes (Ver Figura 1 - 9) engrasando las paredes laterales de los centros y se procede al llenado de los moldes con un chorro fino de asfalto caliente de extremo a extremo (evitando la inclusión de burbujas de aire), se deja secar a temperatura ambiente, posteriormente se pone en un baño de agua, se deja en el

ductilómetro por un determinado tiempo, posteriormente se estira la muestra tanto como sea posible y la medida de la longitud en la que se rompa el material asfáltico será el resultado de la misma [8].



Figura 1 - 9 Moldes para prueba de ductilidad

#### **1.8.4 Prueba de punto de ablandamiento**

Esta prueba de caracterización determina el punto de ablandamiento de los productos bituminosos, utilizando el aparato de anillo y bola, índice de gran utilidad para clasificarlos y determinar la tendencia del material al fluir cuando se somete a temperaturas elevadas. Para realizar la prueba se calienta dos discos de material bituminoso fundidos entre anillos de bronce en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero. El punto de ablandamiento es considerado como el valor promedio de las temperaturas, a las cuales los dos discos se ablandan lo suficiente, para permitir que cada bola caiga desde una distancia de 25 milímetros [8].

#### **1.8.5 Prueba de pérdida de masa**

Esta prueba de caracterización ayuda a determinar cantidad de masa que pierde la muestra una vez se efectúa el ensayo de envejecimiento, por lo cual es necesario pesar la muestra antes y después de realizarlo, la diferencia entre las medidas permite determinar la cantidad de masa perdida a causa del envejecimiento.

En este caso de estudio se tendrá en cuenta únicamente la prueba de caracterización de pérdida de masa para determinar el envejecimiento que sufre el asfalto debido a la disponibilidad de elementos para realizarla.

### **1.9 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO**

El transcurrir del tiempo es un factor al que inevitablemente se expone el asfalto y es de gran importancia en los cambios que sufren el mismo, ya que produce modificaciones en su composición físico química y por ende altera sus propiedades, este fenómeno es conocido como envejecimiento, lo cual se refleja en la durabilidad



del asfalto. Algunos autores definieron el envejecimiento oxidativo como la reacción de grupos lábiles del asfalto con el oxígeno; sin embargo, este proceso involucra otros cambios a nivel estructural. De este proceso de envejecimiento depende entonces, las futuras inversiones y pérdidas a que haya lugar en caso de que se presentara un deterioro prematuro del asfalto [9].

Desde que inicia el proceso de elaboración de una mezcla asfáltica, comienza también la oxidación, y junto con ella, el fenómeno de envejecimiento sobre el que influyen también las condiciones climáticas a las que estará expuesta el pavimento. De aquí que sea necesario e importante estudiar el proceso de oxidación y la composición del asfalto a fin de determinar la durabilidad, calidad y comportamiento del mismo en mallas viales, para apoyar los procesos de diseño [9].

### **1.9.1 Investigaciones del envejecimiento en el asfalto.**

Inicialmente se consideró el envejecimiento del asfalto como un proceso de endurecimiento físico pero progresivamente fue siendo reconocido como un fenómeno complejo con repercusiones en la durabilidad y las propiedades fisicoquímicas del asfalto, de acuerdo a los estudios realizados por diversos investigadores, se concluye que el ensayo de envejecimiento de asfaltos en horno rotatorio de lámina delgada es válido y confiable como medio de verificación para la simulación del envejecimiento del asfalto en laboratorios, en comparación con nuevas tecnologías [9].

En el Anexo B: Evolución del estudio del fenómeno del envejecimiento de los asfaltos se presenta un cuadro resumen con los resultados de las diversas investigaciones más relevantes.

Las ventajas que presenta la realización de este ensayo consisten en la posibilidad de analizar las características del cemento asfáltico de forma previa a su implementación, lo que permite tomar medidas preventivas y decisiones de manera oportuna.

De acuerdo a lo presentado en este capítulo, se decide abordar el estudio de envejecimiento del cemento asfáltico a través del ELADMO, debido a la importancia que implica el mismo en los procesos de estudio y análisis de las características de las muestras de forma previa a su implementación en los pavimentos.

## 2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

En este numeral, se desarrolla una descripción técnica del proceso del ELADMO a partir de la construcción de un diagrama de flujo y los modelos propuestos por el estándar ISA S88 parte I, el cual se toma como referencia ya que establece los modelos de control de procesos, físico y de control de procedimiento, a través de los cuales es posible conocer y entender mejor el ensayo a realizar. También, se presenta un diagnóstico detallado del estado del proceso en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad del Cauca analizando las necesidades en cuanto a documentación, automatización, mantenimientos de equipos y con base en esto se genera un listado de requerimientos de tres tipos: generales, de automatización y técnicos.

### 2.1 DIAGRAMA DE FLUJO EN BLOQUES DEL PROCESO ELADMO

De acuerdo a la descripción del ELADMO (numeral 1.8), se desarrolla un diagrama de flujo en bloques del proceso (ver Figura 2 - 1), que representa la secuencia que sigue la materia prima a lo largo del proceso hasta que se obtiene un producto final. En el diagrama los cuadros pequeños hacen referencia a las pruebas de caracterización (PC) que se deben efectuar a pequeñas cantidades de la muestra de cemento asfáltico antes (PC inicial) y después (PC final) de realizar el ELADMO, los cuadros de mayor tamaño representan las etapas principales del proceso con sus entradas y salidas.

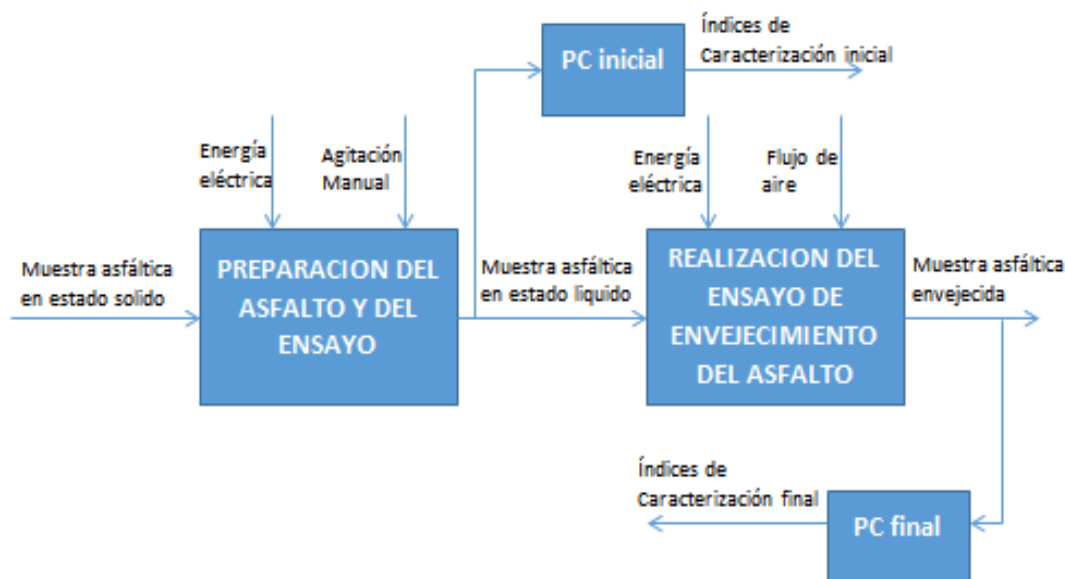


Figura 2 - 1 Diagrama de flujo en bloques del ELADMO

A continuación, se procede a describir cada una de las entradas y salidas de las diferentes etapas del proceso y operaciones de caracterización (Ver Tabla 2 - 1); este diagrama representa el flujo de materiales que ingresan a cada etapa y el subproducto que se obtiene a la salida de la misma.

Tabla 2 - 1 Entradas y salidas del ELADMO

Entrada	Trasformación	Salida
Muestra asfáltica (sólido), libre de agua.	Recepción y acondicionamiento de la muestra asfáltica.	Muestra asfáltica (fluida), libre de burbujas de aire.
Muestra asfáltica (estado líquido).	Pruebas de caracterización iniciales.	Índices de caracterización de la muestra asfáltica.
Recipientes con muestra asfáltica fluida (35 g de muestra en cada recipiente).	Ensayo INV E 720 07	Muestra asfáltica envejecida
Muestra asfáltica envejecida	Pruebas de caracterización finales.	Índices de caracterización de la muestra envejecida.

Con la identificación de entradas y salidas del ELADMO, se procede a elaborar el diagrama de flujo en bloques por operaciones (Ver Figura 2 - 2) el cual inicia con la recepción de la materia prima (muestra asfáltica en estado sólido libre de agua), para ser acondicionada por medio de energía térmica y obtener a la salida una muestra asfáltica en un estado líquido la cual debe estar libre de burbujas de aire, es decir, en condiciones aptas para proceder al desarrollo del ELADMO, antes de realizar esta operación, se toman pequeñas cantidades de la muestra y se realizan cuatro pruebas de caracterización iniciales, a la salida se obtienen los valores iniciales característicos del asfalto que servirán de referencia para determinar la calidad del mismo. Además, se considera la operación de precalentamiento del horno la cual consiste en encender el horno a temperatura de operación durante un periodo de 16 horas antes de desarrollar el ensayo. La etapa de ensayo de la norma INV E 720-07, requiere de energía térmica ya que se desarrolla a 163°C, también requiere de flujo de aire a una tasa de asentamiento de 4000 +/- 300 mil /min. A la salida de esta etapa se obtiene una muestra asfáltica envejecida, a la cual se le realizaran las mismas pruebas de caracterización.

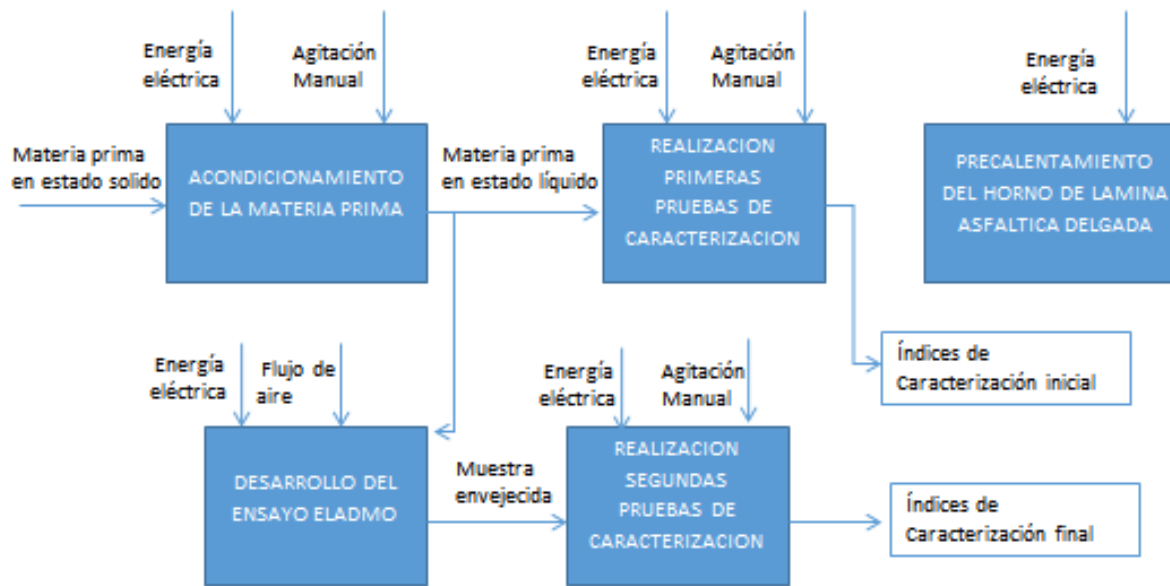


Figura 2 - 2 Diagrama de flujo en bloques del ELADMO por operaciones

## 2.2 MODELOS ISA S88 DEL PROCESO ELADMO EN EL LABORATORIO DE LA FIC

La norma ISA S88, a nivel industrial se usa para unificar el lenguaje de todas las partes involucradas en el diseño, construcción y ejecución de procesos de producción; la parte uno (que es la que se considerará) del estándar define los modelos de referencia para la implementación de sistemas de control de procesos por lotes y permite altos niveles de flexibilidad y reusabilidad, entre otros beneficios. En términos generales, el estándar divide el proceso de modelado en: modelo de proceso, modelo físico y modelo de control procedimental, esto con el objetivo de organizar la información de manera metódica y estandarizada de tal forma que pueda ser entendida y reproducida para estudios posteriores [10].

Por lo anterior, el estándar ISA S88 se aplica al ELADMO para tener una visión completa del mismo, el procedimiento convencional para levantar los modelos es apreciar y registrar la información durante la ejecución del proceso y/o preguntando a los operarios expertos, sin embargo, en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) nunca se ha realizado ELADMO a pesar de poseer los equipos necesarios para tal fin; lo que se constituye en una fuerte limitante, pues, por lo que se procede de acuerdo a la fuente de información disponible; la norma INV E 720–07.

### 2.2.1 Modelo control de procesos

Con base a la norma ISA S88 parte I, el modelo de control de procesos se implementa para describir procesos productivos de las empresas, esta descripción se realiza en términos de: proceso, etapas de proceso, operaciones de proceso y acciones de procesos en forma jerárquica.

A continuación, se presenta la definición y el desarrollo del modelo de control de procesos aplicado para el ELADMO, que se realiza con base en lo descrito en la norma INV E 720-07, de donde solo se puede inferir acciones de proceso, para complementar el modelo fue necesario definir en el presente trabajo de pregrado: el proceso, las etapas de proceso y las operaciones de proceso.

- **Proceso:** el estándar ISA S88, define un proceso como una secuencia de actividades químicas, físicas o biológicas para la transformación, transporte o almacenamiento de materia y energía. Para el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento se define: proceso de ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento.
- **Etapas de proceso:** el estándar ISA S88, define una etapa de proceso como una parte del mismo, la cual opera independientemente de otra, por lo general resulta de una secuencia planeada de cambios físicos o químicos en el material procesado. Para el ELADMO se identificaron dos (2) etapas de proceso, siendo éstas: la preparación tanto del asfalto como del ensayo y el ensayo de envejecimiento del asfalto.
- **Operaciones de proceso:** el estándar ISA S88, define las operaciones de proceso como una actividad mayor de proceso, que conforman las etapas de proceso y representan actividades especializadas de procesamiento, que resultan de un cambio físico o químico del material que está siendo procesado y se establecen en un orden específico para desarrollar la etapa. Para el ELADMO se determinan cinco (5) operaciones: acondicionamiento de la materia prima, realización de las primeras pruebas de caracterización, precalentamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, desarrollo del ELADMO y realización de las segundas pruebas de caracterización.
- **Acciones de proceso:** el estándar ISA S88, define las acciones de proceso como actividades de procesamiento menor que se combinan para formar las operaciones de proceso. Para el ELADMO se determinan 31 acciones de procesos.

Una vez determinada cada parte del modelo de control de procesos se describe el proceso de ELADMO en términos de proceso, etapas de proceso, operaciones de proceso y acciones (Ver Tabla 2 - 2).

Tabla 2 - 2 Modelo de proceso del ELADMO

Proceso de ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento		
Etapas	Operaciones	Acciones de proceso
Preparación del asfalto y del ensayo	Acondicionamiento de la materia prima	Muestra asfáltica libre de agua. Verificado
		Verter la muestra asfáltica en un recipiente metálico
		Calentar la muestra asfáltica
		Muestra asfáltica en estado fluido. Verificado
		Agitación manual de la muestra.
		Muestra asfáltica libre de burbujas de aire. Verificado
	Realización de las primeras pruebas de caracterización	Medición del índice de pérdida de masa
		Medición del índice de ductilidad
		Medición del índice de penetración
		Medición del índice de punto de ablandamiento
		Medición del índice de viscosidad
	Precalentamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento	Parámetros de operación del horno de lámina asfáltica delgada. Verificado
		Encender el horno de lámina asfáltica delgada.
		Horno a temperatura de operación. Verificado
Ensayo de envejecimiento del asfalto	Desarrollo del ELADMO	Verter las muestras asfálticas en cada uno de los recipientes.
		Disponer los recipientes en la plataforma.
		Plataforma balanceada. Verificado
		Cerrar puerta del horno
		Temperatura de control retorna dentro de un periodo de recalentamiento. Verificado
		Hacer girar la plataforma.
		Encender ventilador tipo jaula de ardilla
		Iniciar flujo de aire.
		Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido durante el tiempo del ensayo.
		Retiro de los recipientes del horno.
		Enfriar los recipientes en los que se va a determinar pérdida de masa.
		Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo, dentro de un recipiente suficientemente grande.
		Realización de las segundas pruebas de caracterización
	Medición del índice de ductilidad	
Medición del índice de penetración		

		Medición del índice de punto de ablandamiento
		Medición del índice de viscosidad

Lo planteado en el modelo de procesos, es analizado de acuerdo a las condiciones del laboratorio, de lo cual se tiene que:

Este está configurado para obtener un solo servicio y tiene una única ruta, consta de dos etapas: preparación del asfalto y del ensayo y ensayo de envejecimiento del asfalto, la primera tiene tres operaciones y la segunda dos. Es de tipo batch por que en cada una de sus dos etapas de proceso se tratan cantidades finitas de material, sometiéndolas a tareas ordenadas de procesamiento y usando uno o varios equipos durante un tiempo definido.

Como operaciones de proceso, existen actividades encaminadas a acondicionar adecuadamente la materia prima y realizar las primeras pruebas de caracterización, se debe precalentar el horno para su posterior uso en el ensayo, se procede a desarrollar el ELADMO a una temperatura de 163°C durante un periodo de 85 minutos, finalmente se realizan las segundas pruebas de caracterización a la muestra ya envejecida. Durante estas 5 operaciones de proceso se ejecutan 31 acciones que garantizan el proceso de envejecimiento del asfalto. Es importante resaltar que se realizó el levantamiento de este modelo con la información que se pudo inferir de la norma INV E 720-07 y con el fin de cumplir con el estándar ISA S.88 se determinan las etapas y operaciones del proceso. Este modelo inferido de la norma excluye actividades de limpieza, preparación y disponibilidad de equipos requeridas en el proceso.

### 2.2.2 Modelo físico

Continuando con la norma ISA S88 parte 1, el siguiente modelo a desarrollar es el modelo físico. La norma ISA S88 plantea que el modelo físico puede usarse para describir los activos físicos en términos de empresa, sitios, áreas, células de proceso, unidades, módulos equipo y módulos control, de la misma forma los activos físicos de una empresa involucrados en la fabricación por lotes están organizados usualmente en una forma jerárquica. Este modelo tiene siete niveles, en la parte superior se encuentran: empresa, sitio y área, niveles que se definen por consideración comercial, organizacional, geográfica y de negocio que no se modelan más allá en este documento, en la parte inferior los cuatro niveles más bajos están enfocados a nivel de la planta de producción; por lo tanto, estos se desarrollan a profundidad en el presente trabajo de pregrado [10].

Antes de continuar, vale la pena exponer los conceptos propuestos por el estándar ISA S88 para los niveles inferiores de la jerarquía del modelo físico, a fin de que el procedimiento sea claro y entendible, estos conceptos son:

- **Nivel de célula de proceso:** Una célula de proceso es una agrupación lógica de procesos que incluye todo el equipo requerido para la producción de uno o más lotes.
- **Nivel de unidad:** una unidad es un conjunto de equipos de procesamiento y control necesarios para desarrollar actividades mayores de proceso. Operan relativamente independientes unas de otras.
- **Nivel de módulo de equipo:** combina los equipos de procesamiento y control necesarios para llevar a cabo un número finito de actividades específicas de procesamiento menor. Generalmente se centra en una pieza de equipo de procesamiento.
- **Nivel de Módulo de Control** es un dispositivo que tiene conexión directa al proceso y es operado como una entidad única.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se determina el Modelo Físico del ELADMO implementado en el laboratorio de suelos de la FIC de la siguiente manera: a nivel de Empresa está la Universidad del Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán, Colombia; a nivel de sitio se encuentra la FIC de la Universidad del Cauca, situada frente a la sede del Tulcán y a nivel de área está el laboratorio de suelos de la FIC en el que se desarrolla el proceso; estos 3 niveles (empresa, sitio y área) no son presentados en el diagrama pero deben tenerse en cuenta. Ahora centrándose en lo que es el ELADMO, se tiene que su célula de proceso denominada “Celda de proceso del ensayo de envejecimiento del asfalto”, cuyo objetivo es la obtención del asfalto envejecido, está conformada por 2 unidades:

- a) Unidad de adecuación de la muestra
- b) Unidad de envejecimiento del cemento asfáltico

Además de 5 módulos de equipo y 15 módulos de control (Ver Tabla 2 - 3).

Tabla 2 - 3 Modelo físico del ELADMO

Celda de proceso del ensayo de envejecimiento del asfalto		
Unidades	Módulo de equipo	Módulo de control
Adecuación de la muestra	Equipo de pesado: balanza	Operario
	Equipo de calentamiento: horno	Sensor de temperatura
		Controlador de temperatura
	Resistencias eléctricas	
Envejecimiento del asfalto	Equipo de envejecimiento: Horno	Operario
		Pt 100
		Controlador de temperatura
		Resistencias eléctricas



		Termómetro indicador de pérdida de calor
		Ventilador tipo jaula de ardilla
		Motor 1 (girar ventilador)
		Plataforma circular metálica
		Motor 2
		Recipientes de vidrios
		Perillas
	Equipo de suministro de flujo de aire: Compresor	Rotámetro
		Válvula de regulación de presión manual
		Operario

Lo planteado en el modelo de procesos, es analizado de acuerdo a las condiciones del laboratorio, de lo cual se tiene que:

Tanto para la unidad de adecuación de la muestra asfáltica como para la unidad de envejecimiento del asfalto, el laboratorio cuenta con equipos que poseen las características adecuadas para la realización de las fases pertinentes del proceso. Por otra parte, el elemento utilizado como “controlador de temperatura” no garantiza que la temperatura en el equipo de envejecimiento sea la indicada para la realización del ensayo y es importante por último resaltar que en este modelo hace falta los módulos equipos que garanticen la realización de las pruebas de caracterización, pues esta información no se puede inferir directamente de la norma INV E 720–07.

### 2.2.3 Modelo control procedimental

El modelo de control de procedimiento, permite definir secuencial y organizadamente las acciones que se deben llevar a cabo de forma jerárquica en un proceso determinado, además especifica las acciones que se deben ejecutar sobre los equipos en un orden cronológico [10].

Los niveles que componen el modelo de control procedimental son:

- **Procedimiento:** Define la estrategia para llevar a cabo una acción de procesamiento importante como realizar un *batch*. Está definido en términos de un conjunto ordenado de procedimientos de unidad [10]. Teniendo en cuenta esta definición, el procedimiento para el proceso de ELADMO es: **obtención del asfalto envejecido.**
- **Procedimiento de unidad:** Definido como un conjunto ordenado de operaciones que causa una secuencia de producción continua que tendrá lugar dentro de una unidad [10]. El proceso de ELADMO cuenta con dos (2) procedimientos de unidad: preparar el asfalto y el ensayo, y desarrollar ensayo de envejecimiento del asfalto.
- **Operaciones:** conjunto ordenado de fases que define una secuencia de procesamiento mayor que lleva el material dentro del proceso de un estado

a otro, y por lo general incluye un cambio físico o químico [10]. Siguiendo la definición se identificaron cinco (5) operaciones: acondicionar la materia prima, realizar las primeras pruebas de caracterización, precalentar el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, desarrollar el ELADMO y realizar las segundas pruebas de caracterización.

- **Fases:** es el elemento más pequeño de control procedimental que puede llevar a cabo una tarea orientada al proceso. Una fase puede subdividirse en partes más pequeñas [10]. De esta manera, se establecieron 34 fases.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se determina el Modelo de control procedimental del ELADMO implementado en el laboratorio de suelos de la FIC de la Universidad del Cauca (ver Tabla 2 - 4), el cual especifica los procedimientos de unidad, las operaciones de unidad y las fases del proceso.

Tabla 2 - 4 Control procedimental del proceso de ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento

Control procedimental del proceso para la obtención del asfalto envejecido			
Procedimiento de unidad	Operaciones de unidad	Fases de proceso	
Preparar el asfalto y el ensayo	Acondicionar la materia prima	Disponer de la materia prima.	
		Determinar cantidad de muestra asfáltica	
		Verificar que la muestra se encuentre libre de agua.	
		Verter la muestra asfáltica en recipiente metálico.	
		Calentar la muestra a una temperatura no mayor a 163°C.	
		Verificar que la muestra asfáltica este en estado fluido.	
		Agitar manualmente la muestra.	
		Verificar que no se incorpore burbujas de aire a la muestra.	
	Realizar las primeras pruebas de caracterización	Medir índice de pérdida de masa.	
		Medir índice de ductilidad.	
		Medir índice de penetración.	
		Medir índice de punto de ablandamiento.	
		Medir índice de viscosidad.	
	Precalentar el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento	Establecer los parámetros de operación del horno.	
		Encender el horno de lámina asfáltica delgada por un periodo de 16 horas.	
		Verificar la temperatura de operación del horno	
			Verter 35 +/- 0.5 gramos en cada recipiente.

Desarrollar ensayo de envejecimiento del asfalto	Desarrollar el ELADMO.	Disponer los recipientes en la plataforma.
		Verificar que la plataforma este balanceada.
		Cerrar puerta del horno.
		Verificar que la temperatura de control retorne 163°C en los primeros 10 minutos de recalentamiento.
		Hacer girar la plataforma a 15 rpm.
		Encender ventilador tipo jaula de ardilla.
		Iniciar flujo de aire a una rata de asentamiento de 4000 ml/mm
		Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido por un tiempo de 85 minutos.
		Controlar la temperatura dentro del horno a 163°C.
		Retirar los recipientes del horno.
		Dejar enfriar los recipientes para determinar pérdida de masa.
		Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo en un recipiente suficientemente grande.
	Realizar las segundas pruebas de caracterización	Medir índice de pérdida de masa.
		Medir índice de ductilidad.
		Medir índice de penetración.
	Medir índice de punto de ablandamiento.	
	Medir índice de viscosidad.	

Dentro de las cinco operaciones presentadas encontramos dos relacionadas con las pruebas de caracterización, operaciones que en detalle implicarían más de una fase, pero se manejó de acuerdo a la información disponible en la norma INV E 720–07, por otra parte este modelo excluye operaciones y fases referentes a limpieza, preparación y disponibilidad de equipos.

## 2.3 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO ELADMO A NIVEL DE LABORATORIO

Para llevar a cabo el diagnóstico del ELADMO se comprueba: en primer lugar, las condiciones físicas de cada uno de los equipos y elementos que conforman la celda de proceso, esto se logra haciendo una inspección visual interna y externa de los mismos, en segundo lugar, se aplica una encuesta al personal del laboratorio para identificar sus necesidades y expectativas respecto del ensayo, se analiza los resultados obtenidos en la encuesta consignada en el Anexo D: Cuestionario de encuesta del laboratorio de suelos.

### 2.3.1 Inspección visual interna y externa de la celda del ELADMO

Para la inspección visual interna y externa se hace un diagnóstico de la célula así: como primer paso se lleva a cabo un reconocimiento visual interno y externo de los

equipos y elementos de cada unidad de la celda del ELADMO y posteriormente se efectúa una verificación de funcionamiento de cada uno de los elementos y equipos internos y externos de cada unidad de la celda. De acuerdo a lo mencionado se tiene:

- ***Reconocimiento visual interno y externo de la planta del proceso ELADMO***

A la celda de proceso del ensayo de envejecimiento del asfalto del laboratorio de suelos se le hace un reconocimiento visual donde se observó que el laboratorio cuenta con la disponibilidad de un 100% de los equipos y elementos requeridos para la realización del ensayo y que los elementos principales de cada unidad se encuentran todos en el laboratorio de suelos de la FIC, es importante destacar que aunque todos los equipos y elementos están en el laboratorio se encuentran dispersos unos de otros.

La inspección visual da lugar a comprobar la disponibilidad y estado físico de cada uno de los equipos y elementos necesarios en la celda del ELADMO. Dentro de la inspección es necesario comprobar que los equipos requeridos para la proceder con el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento cumplan con la información suministrada por la norma I.N.V.E 720-07, para ello se realiza una comparación física del equipo en su condición actual frente a los requerimientos establecidos por la norma, las inspecciones realizadas son soportadas con imágenes (Ver Anexo C: Diagnostico visual del horno de lámina asfáltica delgada con base a la norma INVE 720 -07). Como resultado de esta parte del diagnóstico se infiere las siguientes condiciones:

El horno de lámina asfáltica delgada en movimiento cumple en su mayoría con las especificaciones que establece la norma INVE 720 -07, que hacen referencia a la parte física del equipo como son: dimensiones (alto, largo, ancho y separación entre placas), ubicación de elementos dentro del mismo, cuenta con todos los equipos requeridos por la norma exceptuando el termómetro de vidrio, el cual debería estar presente en el interior del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

Por otra parte, se realiza la inspección visual de la parte eléctrica donde se observa que en la unidad de envejecimiento del asfalto hay algunas falencias, por lo que es necesario un estudio más exhaustivo del manual del equipo, la hoja de vida y su cronograma de mantenimiento. las personas encargadas del mismo afirman que no existe dicha información, ya que no se le ha realizado ningún tipo de mantenimiento.

- ***Verificación de funcionamiento de la celda de proceso ELADMO***

Para una correcta verificación del estado funcional de los equipos de la celda de proceso ELADMO, es necesario comprobar equipo por equipo su funcionamiento y a su vez verificar que se cumplan los requerimientos que establece la norma INV E

720-07 ; por ello en la Tabla 2 - 5 se presenta el resultado del análisis realizado a los equipos que pertenecen a cada unidad y se evidencia que el equipo de envejecimiento, es decir el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento no cumple con lo establecido por la norma, puesto que no alcanza la temperatura de operación del ensayo.

Tabla 2 - 5 Estado actual de los equipos de la celda del proceso ELADMO

Unidad	Módulo de equipo	Estado
	Equipo de pesado: balanza	Buen funcionamiento
	Equipo de precalentamiento: horno	Buen funcionamiento.
	Equipo de agitación.	
Envejecimiento del asfalto	Equipo de envejecimiento: Horno	Mal funcionamiento. No alcanza la temperatura de operación del ensayo.
	Equipo de suministro de flujo de aire: - Compresor - Rotámetro - Válvula	Buen funcionamiento. Buen funcionamiento Buen funcionamiento
Caracterización	Equipo de viscosidad: viscosímetro	Buen funcionamiento
	Equipo de ductilidad: ductilómetro	Buen funcionamiento
	Equipo de punto de ablandamiento	Buen funcionamiento
	Equipo de penetración:	Buen funcionamiento

Para encontrar el problema que presenta el equipo de envejecimiento se procede a desmontar uno a uno los dispositivos que lo conforman con el fin de probarlos con instrumentos idóneos.

Se realiza un plano P&ID, el diagrama de lazo de control de temperatura y el diagrama de lazo de control de los motores con base en la inspección de las conexiones internas, la revisión de manuales y planos de hornos similares que cumplen con el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, con el fin de entender el funcionamiento del equipo, esto debido a que el horno que posee la FIC no cuenta con un manual de usuario que pueda tomarse como guía; el plano desarrollado muestra los dispositivos que lo componen con sus conexiones respectivas, los voltajes de trabajo utilizados y a su vez se detalla cuáles de ellos presentaban fallas.

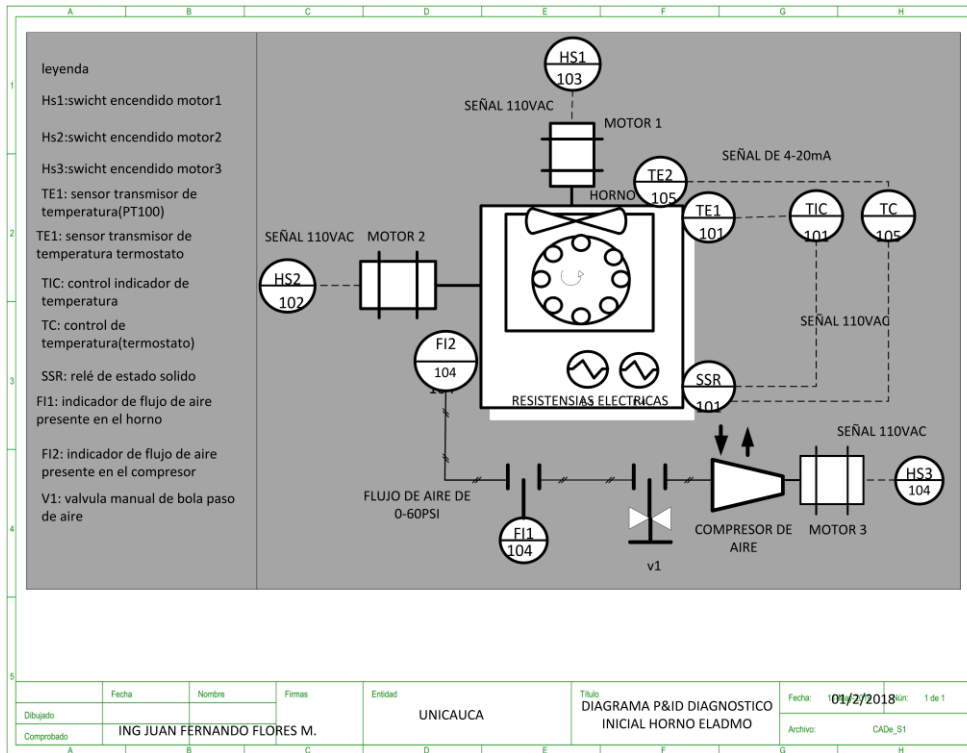


Figura 2 - 3 Plano P&ID del horno

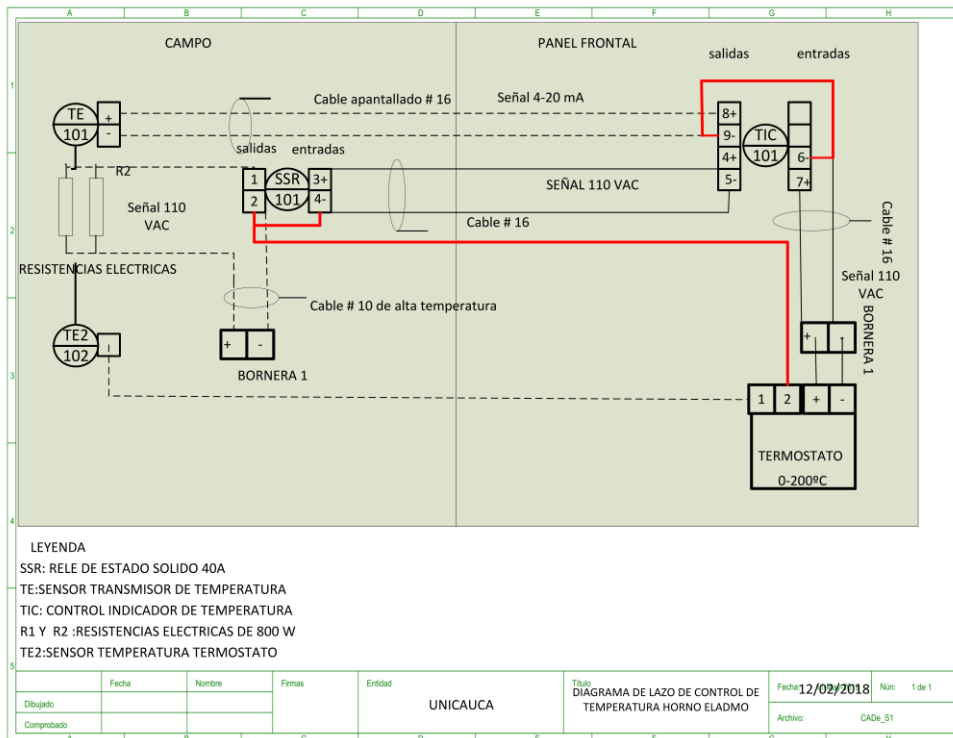


Figura 2 - 4 Diagrama de lazo de control de temperatura

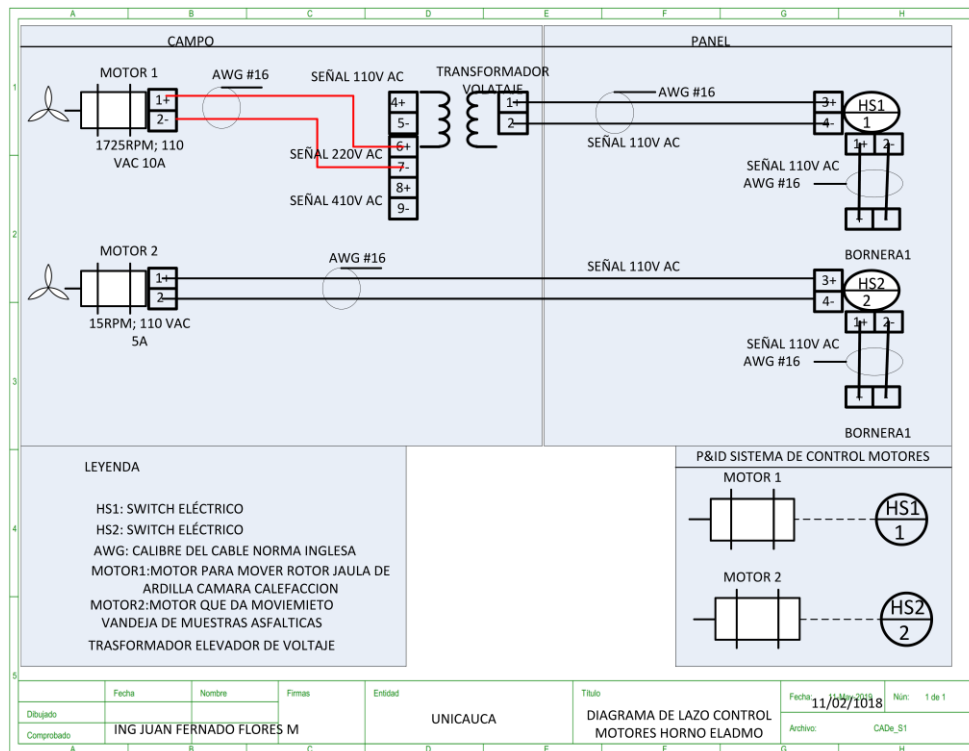


Figura 2 - 5 Diagrama de lazo de control de los motores

Del análisis realizado se encontró lo siguiente:

- El dimensionamiento del cableado eléctrico no era adecuado para el manejo de la potencia requerida por el sistema, debido a se utilizaba un calibre inferior al requerido como se muestra en la Figura 2 - 5, lo que conlleva a errores en el sistema en general.
- El motor 1 asociado al ventilador tipo jaula de ardilla se encontraba quemado como se muestra en la Figura 2 - 5, y la configuración del transformador que lo alimenta era errónea.
- El motor 2 no presenta fallas en su funcionamiento.
- El transformador se encontraba funcionando, pero con una mala configuración.
- El controlador PID industrial marca Honeywell presentaba daño debido a la mala conexión entre las tarjetas de entradas y salidas ocasionando un corto eléctrico en él, como se muestra en la Figura 2 - 4.
- El relé de estado sólido (SSR) estaba conectado erróneamente como se muestra en la Figura 2 - 4, se observó que solo ingresa una línea de control a la entrada del SSR y de acuerdo a su manual de usuario se requiere dos cables de activación a su entrada; además, se observa mala conexión entre las tarjetas de entrada y salida.
- El sensor de temperatura (PT100) estaba dañado.

- Las resistencias eléctricas se encontraban en un estado que no permitía su correcto funcionamiento.

Este análisis permite determinar donde se presentan las fallas puntuales a fin de posteriormente abordarlas en busca de una posible solución que permita alcanzar los objetivos propuestos para el presente trabajo.

### **2.3.2 Análisis de la encuesta realizada**

Uno de los métodos utilizados para la recolección de información respecto a los equipos fue la técnica de la entrevista, acompañada de un cuestionario estructurado como instrumento, con el fin de que se convirtieran en elementos de apoyo al proceso de diagnóstico.

En el proceso de construcción del cuestionario se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

1. Se determinó que la base lógica para este caso son cuestiones a comprobar
2. Segundo, se determinan cuatro tipos de preguntas:
  - a. Preguntas de apertura: este tipo de preguntas son abiertas, tienen como objetivo romper el hielo e iniciar una conversación fluida con el entrevistado
  - b. Preguntas cerradas: son aquellas que contienen las posibles respuestas, en este caso el entrevistado debe limitarse a la opción que más se aproxime a su posición
  - c. Preguntas de acción: que tienen como propósito ver si la persona ha realizado o no algo concreto
  - d. Preguntas de intención: este tipo de interrogante dará respuesta a una posible acción del individuo ante una situación que se le presente
3. Se procede a listar en conjunto las preguntas que se cree sean de interés para el análisis del diagnóstico
4. Se procede a realizar una prueba piloto, la cual consiste en entrevistar a 10 personas con intereses a fines al laboratorio de suelos de la FIC. En el Anexo D: Cuestionario de encuesta del laboratorio de suelos, se consigna el cuestionario que se utilizó para realizar la prueba piloto.

De la población inicial de 10 personas, 8 contestaron la guía, entre las personas entrevistadas está el ingeniero Eugenio Chavarro coordinador del laboratorio de suelos y asfaltos de la universidad, la geo-tecnóloga Martha Cecilia García, dos laboratoristas, dos estudiantes de geotecnología y dos ex alumnos de la Universidad del Cauca. El objetivo de la entrevista fue obtener respuestas correspondientes a la identificación de las necesidades de documentación, automatización y mantenimiento propios para la correcta ejecución del ELADMO.

Como resultado de la entrevista se tiene la Figura 2 - 6, de la cual se resalta que: 100% de las personas afirman que la realización del ensayo del horno de lámina



asfáltica delgada en movimiento INV E 720–07 es importante para los intereses del laboratorio, el 75% de las personas nunca han realizado el ensayo a pesar de que el laboratorio cuenta con el equipo de lámina asfáltica delgada en movimiento, el 88% de las personas afirman tener conocimiento sobre cómo se realiza el ensayo, puesto que el 88% de las mismas consideran que la información descrita en la norma INV E 720–07 es suficiente para llevar a cabo el ensayo; por otra parte, un 75% de las personas afirman que hace falta un documento guía estructurado en el laboratorio diferente a la norma INV E 720–07, considerando que debería incluir información más detallada sobre cómo realizar el ensayo y la forma como operan los equipos.

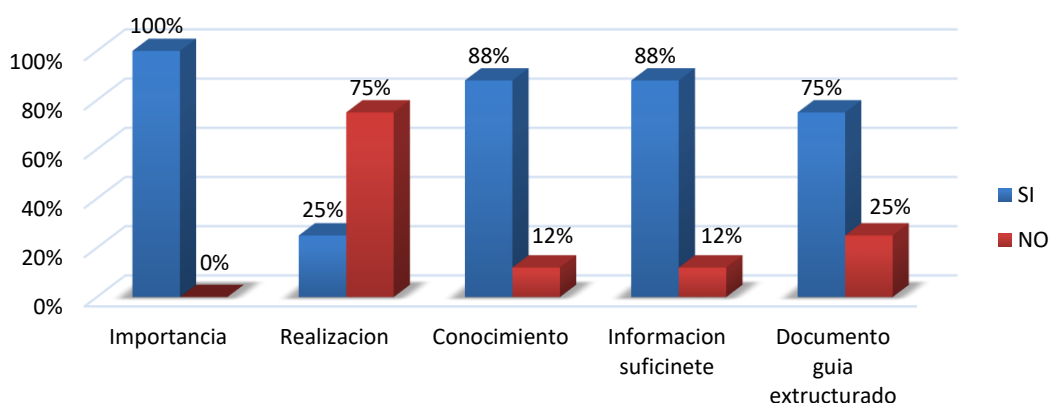


Figura 2 - 6 Respuestas respecto a documento guía estructurado para la realización del ELADMO de acuerdo a la norma INV E 720–07 en el laboratorio de suelos de la FIC

Por otro lado el análisis de los resultados de la encuesta permitió determinar que, el 100% de las personas tiene conocimiento teórico acerca de los equipos necesarios para la realización del ensayo, se tiene también que el 100% de las personas afirma que el laboratorio de suelos de la FIC cuenta con el equipamiento necesario para poder llevar a cabo el ensayo de forma correcta; por el contrario, el 88% de las personas responden no tener conocimiento acerca de las características físicas y de funcionamiento de los equipos, tales como son tiempo máximo de trabajo, frecuencia de mantenimiento, velocidad, hoja de vida de equipos, etc. (ver Figura 2 - 7).

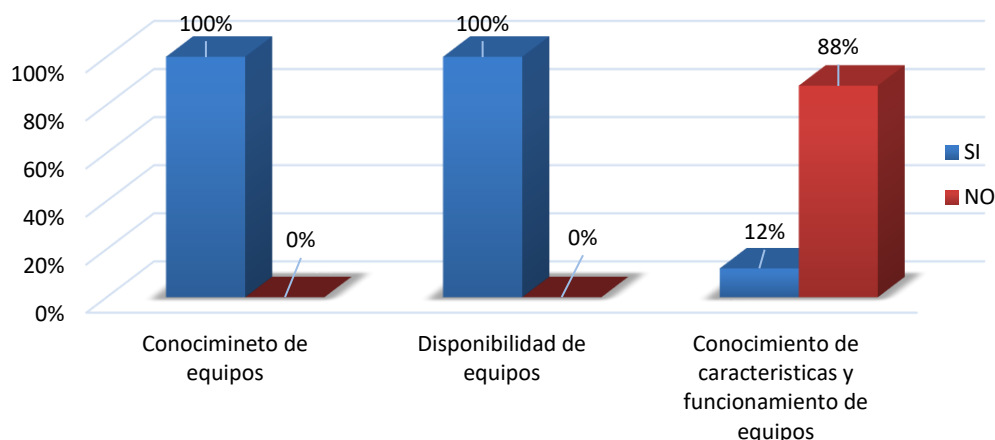


Figura 2 - 7 Respuestas respecto a equipos utilizados en el ELADMO

## 2.4 REQUERIMIENTOS DE LA NUEVA CÉLULA Y PROCESO ELADMO

A partir del diagnóstico realizado en la sección previa, se logra identificar los requerimientos generales, de automatización y técnicos los cuales se proponen teniendo en cuenta los problemas más significativos que tiene el proceso, estos deben ser abordados a fin de lograr una mejor ejecución del ELADMO siguiendo la norma INV E 720-07 en el laboratorio de suelos de la FIC.

### 2.4.1 Requerimientos generales

**RG1.** Realizar una guía práctica para el ensayo lámina asfáltica delgada en movimiento.

**RG2.** Generar un acta de entrega de buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

**RG3.** Proponer formato de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

**RG4.** Proponer formato de calibración para algunos instrumentos de lazo de control de temperatura.

### 2.4.2 Requerimientos de automatización

**RA1.** Identificar variables de proceso (manipuladas, controladas, disturbios).

**RA2.** Realizar la documentación técnica y formal de todo el proceso ELADMO, modelando en términos de ISA S88, de tal manera que se facilite la reproducción de la información. Además, elaborar diagramas de mando, de potencia, diagrama de flujo de procesos (PFD) y P&ID de acuerdo a la norma ISA 5.1.

### **2.4.3 Requerimientos técnicos**

**RT1.** Diseñar un sistema de protección eléctrica para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento para evitar futuros daños en componentes eléctricos y electrónicos.

**RT2.** Proponer la instrumentación del lazo de control de temperatura del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

**RT3.** Proponer la adquisición de un sensor de temperatura que permita medir pérdida de calor y que este conforme a la exigencia de la ASTM E-1 para termómetros E-1.

### 3. INGENIERÍA BÁSICA

En este capítulo se desarrolla la ingeniería básica de la propuesta de automatización del ELADMO, se describen las diferentes propuestas que dan solución a los Requerimientos Generales, de Automatización y Técnicos planteados en la sección 2.4. Se hace una breve descripción del origen de cada requerimiento y se consignan las diferentes especificaciones técnicas y de diseño necesarias para los componentes que integran el sistema propuesto como solución. Además, se desarrollan los modelos basados en ISA S88: proceso, físico, de control procedimental para el ELADMO, finalmente se realizan diagramas de flujo de proceso, de instrumentación y tuberías.

#### 3.1 CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS GENERALES

##### 3.1.1 Cumplimiento del RG1

**RG1.** Realizar una guía práctica para el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento.

Para dar cumplimiento al RG1, se realiza una guía práctica (ver Anexo E: Guía para el desarrollo del proceso del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento) con base a la información que suministra el modelo de control procedimental, debido a que este modelo entrega de manera secuencial y organizada las acciones que deben ejecutarse en el ELADMO; en la guía se presenta información con respecto los elementos requeridos, las consideraciones previas y el procedimiento que se debe llevar a cabo.

El objetivo de la guía es comprender paso a paso como realizar el ensayo INV E 720-07, el cual determinara el grado de envejecimiento que sufre el asfalto al ser compactado en campo y para determinar su grado de envejecimiento se aplica la prueba de caracterización de pérdida de masa. Esta guía se elabora con detalle de tal forma que pueda ser entendida por estudiantes y laboratoristas.

##### 3.1.2 Cumplimiento del RG2

**RG2.** Generar un acta de entrega de buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

Para dar cumplimiento al RG2, se elabora un documento donde se exponen cada una de las mejoras realizadas al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, se lleva a cabo este proceso ya que el equipo de la celda no cumplía con las condiciones óptimas para realizar el ensayo. En el documento se hace mención a los estudiantes que realizaron las mejoras y se citan los participantes que en este caso serían las personas encargadas del laboratorio de suelos y el ingeniero Eugenio Chavarro, junto con el director del trabajo de grado Ingeniero Magister Juan Fernando Flores personas que darán constancia del buen funcionamiento del

mismo (Ver Anexo F: Acta de entrega de buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento).

### 3.1.3 Cumplimiento del RG3.

**RG3.** Proponer formato de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

Actualmente las empresas ven la importancia de cuidar sus activos físicos, con el fin de evitar sobrecostos de funcionamiento, paros inesperados en la producción o evitar posibles infortunios en los operarios que manipulan los equipos. Por lo cual se pone en evidencia la necesidad de realizar mantenimientos tanto preventivos como correctivos, que generalmente implican un 40% de los costos ocasionados por un equipo.

En el mantenimiento preventivo se genera un plan por anticipado, se revisan los equipos constantemente de acuerdo con su historial de averías o por recomendaciones del fabricante. Mientras que en el mantenimiento correctivo los equipos se reparan bien sea cuando fallan por completo o cuando están en su etapa final de desgaste, cabe aclarar que el costo de este tipo de mantenimiento es mayor que el del mantenimiento preventivo, ya que es más especializado y puntual de acuerdo a las fallas.

De acuerdo a lo mencionado, es recomendable realizar mantenimientos preventivos de forma periódica para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos, es importante tener una idea aproximada del tiempo de buen funcionamiento de un equipo o tiempo medio entre fallos (*Mean Time Between Failures*, MTBF) con el objetivo de determinar el grado de confiabilidad de un sistema (R) y con esta información planificar los periodos de mantenimiento adecuados.

Teniendo en cuenta, que el laboratorio de suelos y de asfaltos de la Universidad del Cauca, no posee un registro histórico de los mantenimientos (ni correctivos ni preventivos) realizados al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, se procede a determinar los valores estadísticos del MTBF y de R realizando una aproximación basada en cálculos teóricos [11].

Se calcula la R para un periodo de un año ( $t = 1$  año) teniendo en cuenta los instrumentos más sensibles a fallas del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, como son el controlador industrial de temperatura, el sensor de temperatura, el termómetro de mercurio, el lazo de control de temperatura y el motor siemens. En la Tabla 3 - 1 se presenta este cálculo, además de la probabilidad de que los instrumentos funcionen bien o de que fallen en un periodo en un año.

Tabla 3 - 1 Cálculos de eficiencia de los instrumentos presentes en el horno

Instrumento	MTBF	R	Probabilidad de que funcione bien por un año	Probabilidad de falla en un año
Termopar	2-10	0.8187	81.18%	18.82%
Controlador de temperatura	0.5-2	0.1353	13.53%	86.47%
Termómetro de mercurio	33	0.9701	97.01%	2.99%
Lazo de control de temperatura	0.5-1	0.2865	28.65%	71.35%
Transmisor de temperatura inteligente	22.94	0.9573	95.73%	4.27%
Motor Siemens	--	--	95%	5%

Según los valores obtenidos para la probabilidad de falla en un año, es posible determinar cuáles de los instrumentos considerados requieren de un mantenimiento preventivo periódico, para evitar que se dé un deterioro en los mismos y que llegue a necesitarse un mantenimiento correctivo.

De acuerdo a lo mencionado, es necesario realizar regularmente procesos que permitan mantener el estado funcional de los equipos y dado que la universidad no cuenta con un método establecido para ello, se plantean los formatos que se mencionan a continuación (los formatos se encuentran en el Anexo G: ):

- **Formato de hoja de vida de equipo**, en este se incluye el nombre del equipo y la serie, se debe asignar un código único que lo identifique, se solicitan datos del fabricante o proveedor a fin de establecer contacto fácilmente en caso de requerirlo, considera las dimensiones del equipo, algunas características generales y los insumos que se hayan utilizado para garantizar su correcto funcionamiento. Es importante mantener este formato actualizado ya que permite conocer características puntuales del equipo además de las posibles reparaciones que se le hayan realizado previamente.
- **Formato de inventario de equipos y herramientas**, aquí se relaciona el código único que identifica al equipo, una descripción, marca, modelo, serie, capacidad, ubicación del equipo y las observaciones que se requieran. Este formato facilita la gestión de los recursos disponibles en el laboratorio, así como el control de los mismos.
- **Formato de inspecciones preoperacionales planeadas para equipos herramientas e instrumentos**, incluye el lugar en el que se realiza la inspección, una breve descripción del equipo, el estado (puede ser bueno, regular o malo), la condición del entorno que pueda llegar a ocasionar accidentes y su clasificación según la escala de valores de condiciones subestándar dada por la norma NTC 4114 y finalmente se registran las

observaciones. Este formato debe llenarse para todo equipo que vaya a ser puesto en marcha, al cual se le efectúa una inspección previa con el objetivo de saber si funciona correctamente.

- **Formato de reporte de fallas**, en este debe especificarse la información general del lugar en el que se presenta la falla y del responsable de elaborar el reporte, datos sobre el equipo, se describe técnicamente la falla y posteriormente se especifica la acción correctiva que se implementó. Este formato tiene como fin precisar las fallas que se hayan presentado en un equipo y las acciones tomadas al respecto.
- **Formato para solicitar mantenimiento**, debe indicarse si es de tipo preventivo o correctivo y el equipo al cual se le realizará, así como el estado en que se encuentra; también relaciona los responsables del mantenimiento y la fecha en que se solicita. Es importante este formato ya que permite dar seguimiento a las solicitudes efectuadas y por tanto calcular el tiempo de respuesta necesario para cada una.
- **Procedimiento de mantenimiento**, este formato incluye una lista de las actividades que deben realizarse bien sea para mantenimientos preventivos o correctivos, quien será el responsable de la actividad, si se tomó algún documento como referencia, los registros relacionados y las observaciones en caso de ser necesarias.

Los anteriores formatos sirven para complementar el Sistema de gestión de calidad que actualmente posee la Universidad del Cauca ISO 9001:2016.

### 3.1.4 Cumplimiento del RG4

**RG4.** Proponer formato de calibración para algunos instrumentos de lazo de control de temperatura.

Los instrumentos de lazo de control de temperatura que posee el horno son elementos de tipo industrial los cuales pueden medir, transmitir y controlar variables.

Para un correcto funcionamiento de los mismos es necesario asegurar que la relación entre la variable de entrada y la de salida sea lo más fiel posible, esto se consigue mediante el proceso de calibración de los instrumentos de medida a utilizar (termocupla) siguiendo protocolos específicos.

De forma general, se define *protocolo* como un conjunto formal de pautas el cual jerarquiza y ordena los temas más importantes con relación a un procedimiento (o evento), este describe de manera rigurosa el desarrollo de los aspectos fundamentales de un trabajo a realizar [12]. Mientras que, por su parte, *calibración* se define como un proceso de comparación periódica entre uno o varios instrumentos de exactitud no verificada, con un instrumento de medida patrón o un sistema de exactitud conocida, con el objetivo de asegurar una precisión específica según normas internacionales [11].

Por lo tanto, podría decirse que los protocolos de calibración son una serie de pasos preestablecidos para verificar la fiabilidad en el comportamiento de los instrumentos de medida, como resultado de este proceso se obtiene el *Certificado de Calibración*.

Según [11], un instrumento está bien calibrado cuando la diferencia entre las medidas se encuentra dentro de unos límites preestablecidos. Para verificarlo se toma como referencia la guía para calibración de termopares del Instituto Nacional de Metrología Colombiano (INM) [13] el cual especifica que el protocolo de calibración consta de los pasos presentados a continuación:

- Operaciones Previas
  - Descripción del equipo a calibrar
  - Tener en cuenta condiciones del entorno en que se realizará la calibración (temperatura ambiente y humedad relativa)
  - Revisión de factores que puedan alterar la medida como malas conexiones, deterioro en los materiales o interferencias.
- Especificación de los equipos e instrumentos patrones a utilizar para el proceso de calibración
- Registro de los equipos a calibrar en el formato correspondiente (una propuesta de este formato se presenta en el Anexo G: ) y especificación del estado actual.
- Proceso de calibración
  - Se procede con las medidas utilizando el instrumento de referencia y un elemento de apoyo como por ejemplo un multímetro, posteriormente se inicia la toma de medidas desde la temperatura más baja y se va incrementando gradualmente hasta la temperatura permitida por los equipos. El proceso especifica realizar 9 lecturas, 1 cada 20 minutos.
- Análisis de datos
  - Con base en las mediciones obtenidas se describe el comportamiento matemático de la termocupla en los rangos de temperatura analizados. Se obtienen la función de desviación por método de mínimos cuadrados para ambos instrumentos (de referencia y a calibrar), se determina el error en la medida con lo cual se obtiene la función característica del mismo.
- Presentación de resultados
  - Los resultados obtenidos de la prueba se consignan en el documento denominado certificado de calibración.

Dado que la universidad no cuenta con los elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de calibración de los elementos de medida (en este caso la termocupla) ni posee certificados de calibración de los elementos que se encuentran en funcionamiento en el laboratorio, se dice que para el desarrollo del presente trabajo se realizó la verificación de medida, ya que se lleva a cabo un proceso similar al mencionado anteriormente, pero con la diferencia de que no es posible emitir un



certificado de lo realizado, únicamente se concluye que el dispositivo a utilizar se comporta de forma similar al tomado como referencia.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se propone el formato para el procedimiento de calibración de equipo (Ver Anexo G: ), con el cual se busca cumplir con el requerimiento planteado, el formato propone la secuencia de pasos que deben seguirse en caso de que algún instrumento de medida requiera calibración, teniendo en cuenta que debe realizarse una revisión previa

Se recomienda que, si a futuro se busca lograr una certificación en ensayos como es el caso del ELADMO, la universidad adquiera los equipos con su respectivo certificado emitido por el INM o entidades pertinentes.

### 3.2 REQUERIMIENTOS DE AUTOMATIZACIÓN

#### 3.2.1 Cumplimiento del RA1

**RA1.** Identificar variables de proceso (manipuladas, controladas, disturbios).

Para dar cumplimiento a este requerimiento se procede a identificar las variables manipuladas, controladas y de disturbios para el proceso, las cuales se exponen en la Tabla 3 - 2.

Tabla 3 - 2 Identificación de variables

Tipo de Variables	Variables del proceso
Manipuladas	Corriente en las resistencias eléctricas de calefacción
Controladas	Temperatura (°C) Regulación del flujo de aire (ml/min)
De disturbio	- Variaciones de tensión en la red de alimentación (V) - Apertura de la puerta del horno - Modificación del flujo de aire que ingresa a temperatura ambiente (ml/min)

#### 3.2.2 Cumplimiento del RA2

**RA2.** Realizar la documentación técnica y formal de todo el ELADMO, modelando en términos de la norma ISA S88, con base en el diagrama de flujo de procesos (PFD), de tal manera que se facilite la reproducción de la información. Además, elaborar los diagramas P&ID, de mando y de potencia, de acuerdo a la norma ISA 5.1.

Para cumplir con este requerimiento, se construye el PFD, se generan los modelos mejorados del proceso de acuerdo a la norma ISA S88 (modelo de proceso, físico y procedimental), se construye el diagrama P&ID, finalmente se elaboran los diagramas de mando y de potencia correspondientes.

- **Diagrama de flujo de procesos (PFD)**

En cuanto al levantamiento del PFD, se desarrolla con base en las operaciones que presenta el ELADMO. Se cuenta con una primera etapa de “preparación del asfalto y del ensayo” que posee las operaciones de “acondicionamiento y prueba de equipos” (nuevo elemento del modelado), “acondicionamiento de la materia prima”, “realización de las primeras pruebas de caracterización” y “precalentamiento del horno de lámina asfáltica delgada”. La segunda etapa de “ensayo de envejecimiento del asfalto” que posee las operaciones “desarrollo del ELADMO” y “realización de las segundas pruebas de caracterización”. La Figura 3 - 1 representa el PFD mencionado anteriormente.

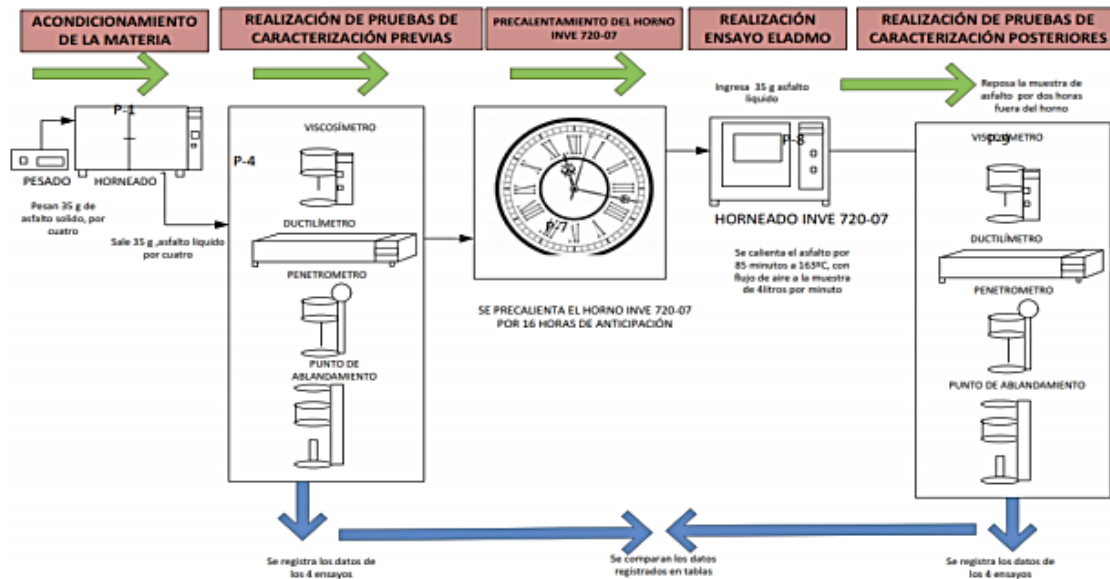


Figura 3 - 1 PFD por operaciones del ELADMO

De acuerdo a la información planteada en el PFD se procede a elaborar los nuevos modelos de proceso, los cuales se presentan a continuación.

- **Nuevos modelos de proceso**

- a) Modelo de procesos mejorado, basado en ISA S88

En el modelado de proceso del ELADMO realizado en la sección 2.1, se considera necesario adicionar una nueva operación denominada “acondicionamiento y prueba de equipos” que pertenecerá a la etapa de “preparación del asfalto y del ensayo”. Esta nueva operación se realiza con el objetivo de incluir dentro del modelo las actividades referentes a limpieza, preparación y disponibilidad de equipos. De igual manera, se detallan acciones que se consideran importantes y necesarias en el proceso las cuales no son consideradas en la norma INV E 720–07. Obteniendo así un nuevo modelo de procesos presentado en la Tabla 3 - 3, en el cual se resaltan en color azul claro los cambios realizados.

Tabla 3 - 3 Modelo de proceso mejorado para el ELADMO

Proceso de ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento.		
Etapas	Operaciones	Acciones de proceso
Preparación del asfalto y del ensayo	Acondicionamiento y prueba de equipos	Disponibilidad de equipos. Verificado
		Equipos limpios y libres de residuos sólidos. Verificado
		Inspección visual de equipos. Verificado
		Inspección de conexiones eléctricas. Verificado
		Equipos conectados a la red eléctrica. Verificado
		Ajuste de parámetros en equipos. Verificado
	Acondicionamiento de la materia prima	Disponibilidad de materia prima. Verificado
		Cantidad de muestra asfáltica en estado sólido. Determinado
		Muestra asfáltica libre de agua. Verificado
		Verter la muestra asfáltica en un recipiente metálico
		Calentar la muestra asfáltica
		Muestra asfáltica en estado fluido. Verificado
		Agitación manual de la muestra.
		Muestra asfáltica libre de burbujas de aire. Verificado
	Realización de las primeras pruebas de caracterización	Medición del índice de pérdida de masa
		Medición del índice de ductilidad
		Medición del índice de penetración
		Medición del índice de punto de ablandamiento
		Medición del índice de viscosidad
		Registro de mediciones
	Precalentamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento	Parámetros de operación del horno. Verificado
		Encender el horno de lámina asfáltica delgada.
		Horno a temperatura de operación. Verificado
Ensayo de envejecimiento del asfalto	Desarrollo del ELADMO	Verter las muestras asfálticas en cada uno de los recipientes
		Disponer los recipientes en la plataforma
		Plataforma balanceada. Verificado
		Cerrar puerta del horno

		Temperatura de control retorna dentro de un periodo de recalentamiento. Verificado
		Hacer girar la plataforma
		Encender ventilador tipo jaula de ardilla
		Iniciar flujo de aire
		Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido durante el tiempo del ensayo.
		Control de temperatura durante el ensayo. Verificado
		Retiro de los recipientes del horno
		Enfriar los recipientes en los que se va a determinar pérdida de masa
		Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo, dentro de un recipiente suficientemente grande
		Medición del índice de pérdida de masa
	Realización de las segundas pruebas de caracterización	Medición del índice de ductilidad
	Medición del índice de penetración	
	Medición del índice de punto de ablandamiento	
	Medición del índice de viscosidad	
	Registro de mediciones	
	Cálculos y documentación	

b) 3.2.1.2.2 Modelo físico mejorado, basado en ISA 88

Partiendo del modelado físico del ELADMO realizado en la sección 2.1, se considera necesario adicionar una nueva unidad llamada “unidad de caracterización” que está conformada a su vez por módulos de equipos y módulos de control necesarios para realizar cada una de las pruebas de caracterización que se deben hacer a la muestra de asfalto antes y después del ensayo de envejecimiento, esta información no se encuentra explícita en la norma INV E 720–07 por tanto se presenta como propuesta en el desarrollo del presente trabajo de grado. El nuevo modelo físico para el proceso del ELADMO se presenta en la Tabla 3 - 4, donde se resaltan las modificaciones planteadas.

Tabla 3 - 4 Modelo físico mejorado para el ELADMO

Celda de proceso del ensayo de envejecimiento del asfalto		
Unidades	Módulo de equipo	Módulo de control
Adecuación de la muestra	Equipo de pesado: balanza	Operario
	Equipo de calentamiento: horno de calentamiento	Sensor de temperatura
		Controlador de temperatura
		Resistencias eléctricas

	Equipo de agitación.	Operario
Envejecimiento del asfalto	Equipo de envejecimiento: Horno lamina asfáltica delgada	Termocupla
		Controlador de temperatura
		Resistencias eléctricas
		Termómetro indicador de pérdida de calor
		Ventilador tipo jaula de ardilla
		Motor 1 (girar ventilador)
		Plataforma circular metálica
		Motor 2 (girar plataforma circular)
		Recipientes de vidrios
		Perillas
Equipo de suministro de flujo de aire: Compresor	Rotámetro	
	Válvula de regulación de presión manual	
	Operario	
Caracterización	Equipo de viscosidad: viscosímetro	Viscosímetro
		Operario
	Equipo de ductilidad: ductilómetro	Moldes
		Placas
		Probeta
		Termómetro
		Operario
	Equipo de punto de ablandamiento	Anillos
		Platos de base
		Bolas
		Soporte de anillo y montaje completo
		Termómetro
		Operario
	Equipo de penetración:	Ajuga de penetración
		Recipiente
		Termómetro
Operario		

c) Modelo de control procedimental mejorado, basado en ISA S88

Al modelo de control de procedimiento del ELADMO realizado en la sección 2.1, se le integra en el procedimiento de unidad “preparar el asfalto y el ensayo” una nueva operación llamada “acondicionar y probar equipos” (ver Tabla 3 - 5), con el objetivo de poder determinar las fases referentes a limpieza, preparación y disponibilidad de los mismos.

Tabla 3 - 5 Modelo de control procedimental mejorado para el ELADMO

Control procedimental del proceso para la obtención del asfalto envejecido		
Procedimiento de unidad	Operaciones de unidad	Fases de proceso
Preparar el asfalto y el ensayo	Acondicionar y probar equipos	Verificar disponibilidad de equipos
		Verificar que los equipos estén limpios y libres de residuos sólidos
		Inspeccionar visualmente el estado de los equipos
		Inspeccionar conexiones eléctricas
		Conectar equipos a la red eléctrica
		Ajustar parámetros de equipos
	Acondicionar la materia prima	Verificar disponibilidad de la materia prima.
		Determinar cantidad de muestra asfáltica
		Verificar que la muestra se encuentre libre de agua.
		Verter la muestra asfáltica en recipiente metálico.
		Calentar la muestra asfáltica a una temperatura no mayor a 163°C.
		Verificar que la muestra asfáltica este en estado fluido.
		Agitar manualmente la muestra.
		Verificar que no se incorpore burbujas de aire a la muestra.
	Realizar las primeras pruebas de caracterización	Medir índice de pérdida de masa.
		Medir índice de ductilidad.
		Medir índice de penetración.
		Medir índice de punto de ablandamiento.
		Medir índice de viscosidad.
		Registrar datos de mediciones
	Precalentar el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento	Establecer los parámetros de operación del horno.
		Encender el horno de lámina asfáltica delgada por un periodo de 16 horas.
		Verificar la temperatura de operación del horno
Desarrollar el ELADMO.	Verter 35 +/- 0.5 gramos en cada recipiente.	
	Disponer los recipientes en la plataforma.	
	Verificar que la plataforma este balanceada.	
	Cerrar puerta del horno.	
	Verificar que la temperatura de control retorne 163°C en los primeros 10 minutos de recalentamiento.	
	Hacer girar la plataforma a 15 rpm.	

		Encender ventilador tipo jaula de ardilla.
		Iniciar flujo de aire a una rata de asentamiento de 4000 ml/mm
		Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido por un tiempo de 85 minutos.
		Controlar la temperatura dentro del horno a 163°C durante el ensayo
		Retirar los recipientes del horno.
		Dejar enfriar los recipientes para determinar pérdida de masa.
		Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo en un recipiente suficientemente grande.
	Realizar las segundas pruebas de caracterización	Medir índice de pérdida de masa.
		Medir índice de ductilidad.
		Medir índice de penetración.
		Medir índice de punto de ablandamiento.
		Medir índice de viscosidad.
		Registrar datos de mediciones
Realizar cálculos y documentar		

El procedimiento se expone con mayor detalle describiendo las fases: medir índice de ductilidad, medir índice de penetración, medir índice de viscosidad y medir índice de punto de ablandamiento (ver Anexo H: Cuadros de Modelo de control, procedimental mejorados.).

### 3.3 DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN P&ID

El diagrama P&ID, es el diagrama de tubería/proceso e instrumentación, que presenta un esquema de tanques, tuberías y maquinas en general, pero con los instrumentos superpuestos indicando lo que se mide y controla. Este diagrama permite ver el flujo tanto del proceso como de los datos entre los instrumentos que miden y controlan el proceso [14].

El diagrama P&ID, está enfocado en la etapa de envejecimiento del asfalto. Antes de levantar los respectivos diagramas, se hace una “descripción conceptual”, respecto a los equipos seleccionados, la cual contiene las siguientes partes:

- Descripción del proceso: se detalla en que consiste el proceso realizado en planta y menciona las acciones más relevantes
- Descripción de variables controladas: se identifican y se listan las variables controladas presentes en la descripción del proceso
- Descripción de las variables manipuladas: son aquellas cuya manipulación influye directamente sobre el comportamiento de la variable controlada
- Descripción de las variables de disturbio: generalmente son variables externas al proceso, aparecen principalmente en las corrientes del proceso,

cuando cambian su valor se presentan afectaciones en la variable controlada.

Adicional se describe el esquema de control y el escenario de automatización.

Teniendo en cuenta lo mencionado, se realiza la descripción conceptual del horno de lámina asfáltica delgada (ver Tabla 3 - 6), relacionado con la etapa de ensayo de envejecimiento del asfalto.

Tabla 3 - 6 Descripción conceptual del horno de lámina asfáltica delgada

<b>Horno de lámina asfáltica delgada</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO</b>
Se lleva a cabo el proceso del envejecimiento del asfalto (proceso convencional de mezclado en caliente), se ingresa una lámina de asfalto delgada que, mediante el efecto de aplicar calor y aire en el interior del horno, se logra producir un cambio en sus propiedades físicas del asfalto, la medición de dichas propiedades determinara la calidad del mismo.
<b>VARIABLES MANIPULADAS</b>
Corriente en las resistencias eléctricas de calefacción (A)
<b>VARIABLES CONTROLADAS</b>
Temperatura (°C) – flujo (regulación del flujo de aire – ml/min)
<b>VARIABLES DE DISTURBIO</b>
- Apertura de la puerta del horno - Modificación del flujo de aire que ingresa a temperatura ambiente
<b>ESQUEMA DE CONTROL</b>
Feedback (resistencias eléctricas) – lazo abierto (compresor)
<b>ESCENARIO DE AUTOMATIZACIÓN</b>
Stand Alone

Para el desarrollo del diagrama P&ID del horno de lámina asfáltica delgada, se asume un lazo de control feedback al interior del master de control del horno, para ejercer control sobre la variable temperatura de las resistencias eléctricas de calefacción internas y un lazo de control abierto para manejar el flujo de aire del compresor (ver Figura 3 - 2).



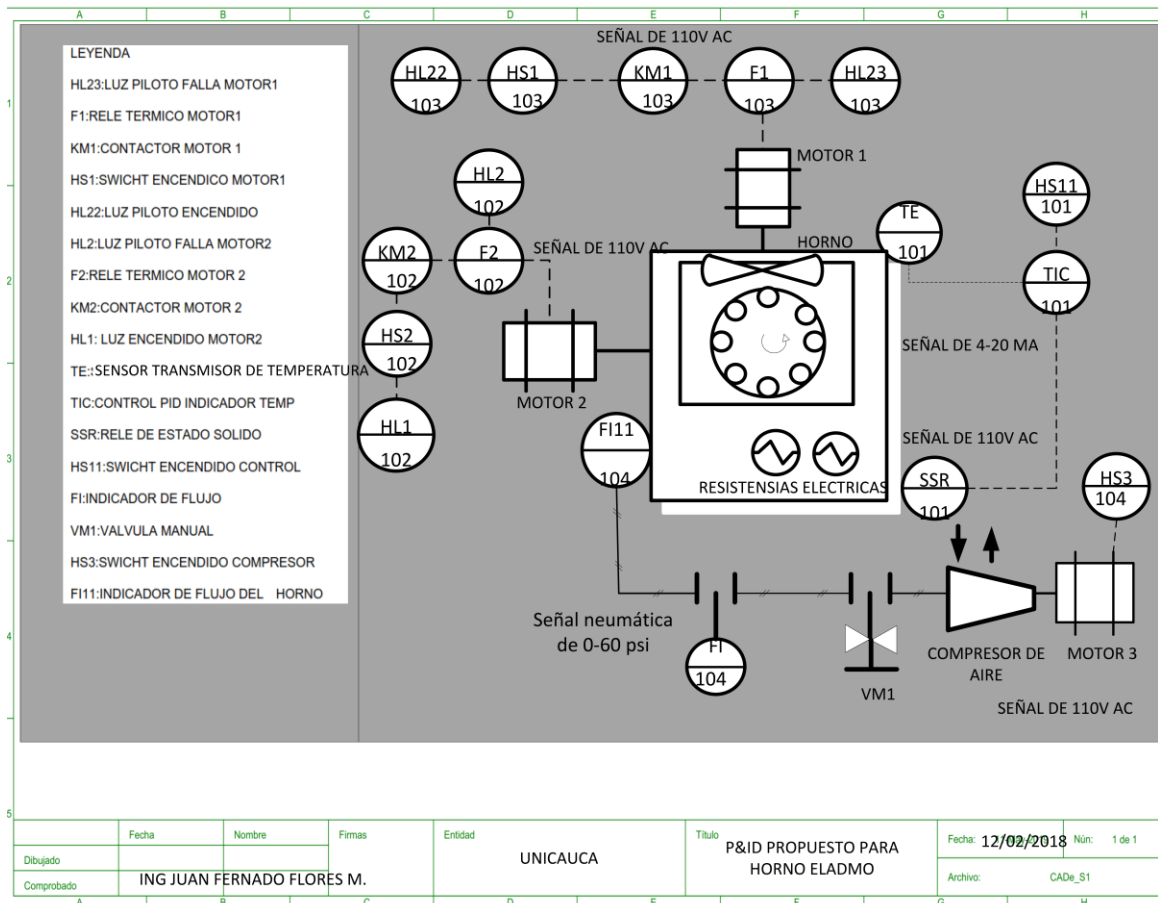


Figura 3 - 2 Diagrama P&ID de horno del horno de lámina asfáltica delgada

### 3.4 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

#### 3.4.1 Cumplimiento del RT1

**RT1.** Identificar los equipos eléctricos y electrónicos que contribuyan al correcto funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

De acuerdo a lo encontrado en la sección 2.1, es necesario realizar acciones sobre ciertos equipos para lograr que funcionen de forma adecuada, como lo son:

- El motor 1 asociado al ventilador tipo jaula de ardilla.
- El transformador.
- El controlador PID industrial marca Honeywell.
- El SSR.
- El sensor de temperatura.
- Las resistencias eléctricas.

Como primera medida se realiza una revisión técnica del funcionamiento de los equipos en mención para determinar si es necesario reemplazarlos o es posible garantizar un buen desempeño de los mismos mediante un mantenimiento.

Como resultado de este proceso se obtiene que los daños presentes es los equipos no pueden solucionarse por lo cual deben sustituirse del todo, a excepción de las resistencias eléctricas, las cuales pueden ser restauradas.

Para poder reemplazar los equipos es necesario conocer cuáles son las características técnicas de cada uno, así como su función dentro del sistema general, las cuales se especifican a continuación.

- **Motor 1 asociado al ventilador tipo jaula de ardilla**

El motor constituye el corazón de una planta industrial de cualquier empresa productiva y por tanto todo técnico o ingeniero debe conocer sus características, su forma de arrancado y sus protecciones.

En el caso del horno, el motor utilizado es del tipo jaula de ardilla que se refiere a la forma de la carcasa, tal como se presenta en la Figura 3 - 3.

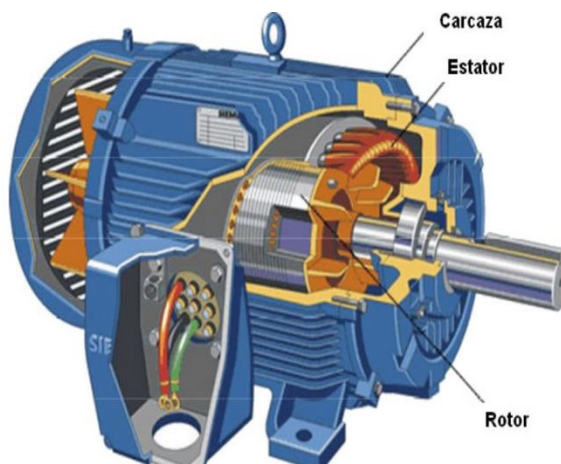


Figura 3 - 3 Motor tipo jaula de ardilla

Fuente [15]

Las características que deben tenerse en cuenta para la selección del motor se encuentran en la placa característica del mismo tales como el número de serie, el tipo de motor, el número de modelo, la potencia nominal, el armazón, el amperaje, el voltaje, la clase de aislamiento, la velocidad, la frecuencia, número de fase, la eficiencia, el factor de potencia, la temperatura de funcionamiento entre otros.

En el Anexo I: Características motor, se presenta una tabla de descripción de las características mencionadas, la cual fue tomada en cuenta para la elección del motor a utilizar junto con los requisitos establecidos en la norma INV E 720-07, según la cual se debe trabajar con un motor a una velocidad de 1725 revoluciones por minuto (RPM) y un tamaño de carcasa considerable para el uso requerido en el horno, con base en esto se hizo un análisis de las opciones ofrecidas por diferentes proveedores nacionales de la cual se identificó que el motor que más se ajustaba a

las necesidades contaba con las características presentadas en la Tabla 3 - 7. Por lo cual se decide utilizarlo como reemplazo del motor original.

Tabla 3 - 7 Características - motor tipo jaula de ardilla

Placa característica motor 1	Cantidad
Tipo	1RF2000008234AB1
Serie	Q2-D17
Tensión	115-230VAC
Corriente	10.4-5.2 A
Velocidad	1725RPM
Eficiencia Normal	$\eta = 55\%$ , $\eta = 59.5\%$
Clase	B
Potencia	0.373KW
Factor De Potencia	$\cos \phi = 0.59$
Temperatura De Funcionamiento	40°C
Caballos de fuerza	1/2
Motor monofásico jaula de ardilla de A.C. abierto a prueba de goteo arranque por capacitor, protección térmica marca: Siemens	

- **El transformador**

El objetivo del transformador es de cierta manera proteger el sistema en caso de que la fuente de alimentación supere los 110v, de acuerdo al análisis de manuales de hornos con características similares, se encontró que su implementación no es obligatoria y dado que los circuitos de corriente alterna que alimentaran el horno no sobrepasan el valor límite establecido, no es necesario incluirlo en el nuevo diseño a proponer ya que la protección se efectuará por medio de la instrumentación adecuada.

- **El controlador industrial PID (marca Honeywell)**

El controlador PID es el dispositivo que se encarga de tomar las decisiones en un sistema de control, podría decirse que es el cerebro del circuito y se encarga de regular el estado de diferentes variables mediante la comparación de señales con un punto de referencia [11].

En el caso del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento se busca regular los niveles de temperatura de acuerdo a lo establecido en la norma INV E 720-07 (163°C), de acuerdo a lo establecido en la sección 2.1 se evidencia la necesidad de reemplazar el controlador industrial PID dado que las fallas no pueden ser resueltas mediante mantenimientos.

Las características a tener en cuenta para la selección del controlador son: que sea de tipo industrial, de alta precisión, que proporcione controles de tipo: PI, PID, ON/OFF, con capacidad de entradas para termopares, que tenga entradas de tipo

detector de temperatura resistivo (RTD), que ofrezca modos de operación manual-automática, que posea salidas con modulación por ancho de pulsos (PWM) con un voltaje de pulso de 0-12v DC y que además sus dimensiones correspondan a las de un cuadrado de 45x45 mm para que pueda ser ubicado dentro del horno en el espacio destinado para este fin [16].

Teniendo en cuenta esto, se realizó una búsqueda en el mercado local de un controlador que lograra satisfacer lo mencionado anteriormente de la cual se obtuvo como resultado que el más conveniente en cuanto relación costo/beneficio era el REX C- 100 [17].

- ***El relé de estado sólido SSR.***

Este elemento permite separar eléctricamente el circuito que controla la entrada o mando del controlador, del circuito de salida mediante un aislamiento óptico [18]. De acuerdo a lo establecido en la sección 2.1 se evidencia la necesidad de reemplazar este elemento debido a que los daños no pueden ser resueltos mediante mantenimientos.

Para el caso del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento se busca que el SSR a implementar cumpla con los siguientes requerimientos:

- Posea una entrada de voltaje alterno de 0-200 v
- Posea una entrada de voltaje directo de 4-32 v
- Utilice un método de control de cruce por cero
- Tenga un tiempo de respuesta de 8.3 ms a 60 Hz
- Una temperatura de operación que vaya de -40°C a 80°C.
- Que tenga un aislamiento de 100MΩ/500v DC

Teniendo en cuenta las posibilidades encontradas en el mercado respecto a las necesidades planteadas, se encontró que el SSR 40 DA-H de la marca FUTEK [19] era el más indicado ya que además de contar con las especificaciones técnicas requeridas para su uso específico, coincide con los rangos de trabajo del controlador a implementar, facilitando el acople de los instrumentos del lazo de control de temperatura.

- ***El sensor de temperatura (PT100)***

Este sensor es una resistencia eléctrica compuesta por platino que varía su valor en función de la temperatura medida. El nombre hace referencia al hecho de que presenta un valor de 100Ω a 0°C y 138.4Ω a 100°C [11].

De acuerdo a lo establecido en la sección 2.1 se evidencia la necesidad de analizar más detenidamente el comportamiento presentado por este elemento. Este proceso se lleva a cabo de acuerdo a las posibilidades del laboratorio.

El proceso realizado consistió en medir la resistencia que presentaba la PT100 a 0°C para verificar que concordara con el valor teórico, se encontró que presentaba una variación de -50Ω, entregando 50Ω en lugar de 100Ω y el error se mantenía

con las variaciones de temperatura, es decir no entregaba los valores esperados para las diferentes mediciones realizadas, esto se sustenta con lo presentado en la Tabla 3 - 8 donde se observan las diferencias entre los valores teóricos entregados por el Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología de Estados Unidos de América (NIST) para la PT100 y los valores obtenidos de forma experimental en el laboratorio de suelos de la FIC; además el tiempo de respuesta no era el adecuado pues tardaba más de lo esperado en estabilizarse ante los cambios considerados, se asume que estas fallas son debidas al deterioro físico del elemento. Finalmente se decide reemplazarlo ya que los daños no pudieron ser resueltos.

Para la elección del nuevo elemento de medida de temperatura se tuvieron en cuenta el dimensionamiento del controlador propuesto, el tiempo de respuesta, los rangos de trabajo y la facilidad en la adquisición del mismo, con lo cual se concluye que una termocupla de tipo K con blindaje metálico es una opción viable, dado que puede manejar temperaturas entre 0-400°C que es suficiente para cumplir con lo estipulado en la norma INVE 720-07 (163°C). En la Tabla 3 - 8 se presenta el análisis de comportamiento de este elemento, el cual se llevó a cabo con el fin de verificar su correcto desempeño y de esta manera evitar futuros inconvenientes.

Tabla 3 - 8 Comparación de valores teóricos y prácticos PT100 vs Termocupla tipo K

PT 100				Termocupla tipo K			
Valores de Referencia NIST		Valores Experimentales		Valores de Referencia NIST		Valores Experimentales	
°C	Ω	°C	Ω	°C	mV	°C	mV
0	100	0	50	0	0.000	0	0.010
10	103.90	10	80	10	0,397	10	0.38
20	107.79	20	70	20	0.798	20	0.92
30	111.67	30	90	30	1,203	30	1.320
40	115.54	40	40	40	1,612	40	1.934
50	119.40	50	100	50	2,023	50	2.4

- **Las resistencias eléctricas.**

Estos elementos son los encargados de elevar la temperatura del horno según se requiera, consiste en un material metálico de aleaciones a base de níquel y cromo (Ni-Cr) enrollado alrededor de un material cerámico, en los extremos posee borneras para la conexión eléctrica. Soportan una potencia de 1000w, el horno posee dos resisten

cias de este tipo conectadas de forma paralela.

El calentamiento de la muestra asfáltica se lleva a cabo de forma indirecta es decir por radiación del calor proveniente de las resistencias por lo cual es indispensable que logren alcanzar la temperatura esperada. De acuerdo a lo establecido en la

sección 2.1 se evidencia que este elemento no responde de forma adecuada por lo cual se procede a realizar un mantenimiento correctivo a fin de reutilizarlas.

De acuerdo a la asesoría de un experto, se lleva a cabo el mantenimiento, el cual consistió en la inmersión de las resistencias eléctricas en ácido sulfúrico por un periodo de 24 horas, como primera medida. Posteriormente, se realizó la inmersión de las mismas en ácido bórico por un periodo de 2 horas y finalmente se realiza la limpieza utilizando lija número 200 para eliminar las impurezas restantes.

Adicional a eso se reemplazaron las borneras eléctricas para garantizar el funcionamiento adecuado.

A modo de prueba se conectaron directamente a un circuito de alimentación eléctrica con lo cual se comprobó que cumplían de forma adecuada la función de calentar, llegando a alcanzar temperaturas de hasta 400°C (que está por encima de lo requerido) por lo cual se garantiza que es capaz de cumplir con los requisitos establecidos por la norma INVE 720-07.

### **3.4.2 Cumplimiento del RT2**

**RT2.** Proponer la instrumentación industrial para la protección eléctrica del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento a fin de evitar futuros daños en componentes eléctricos y electrónicos

Para proponer la instrumentación industrial del horno se utilizó como guía el diagrama P&ID desarrollado para el funcionamiento del horno, presentado en la Figura 3 - 2. Además, para la selección de los dispositivos eléctricos se tomaron como guía algunos capítulos, secciones y artículos del código eléctrico Colombiano NTC 2050 [20], este establece los aspectos de seguridad para instalaciones eléctricas en construcciones, basados en parámetros aplicados y validados mundialmente los cuales garantizan al usuario una utilización segura y confiable de las instalaciones eléctricas.

Las decisiones, cálculos y demás que fueron realizados para el cumplimiento de este requerimiento, se exponen en el Anexo J: Explicación detallada cumplimiento RT2 y en la Figura 3 - 4 se presenta el diagrama eléctrico final del horno una vez se implementan las mejoras propuestas.

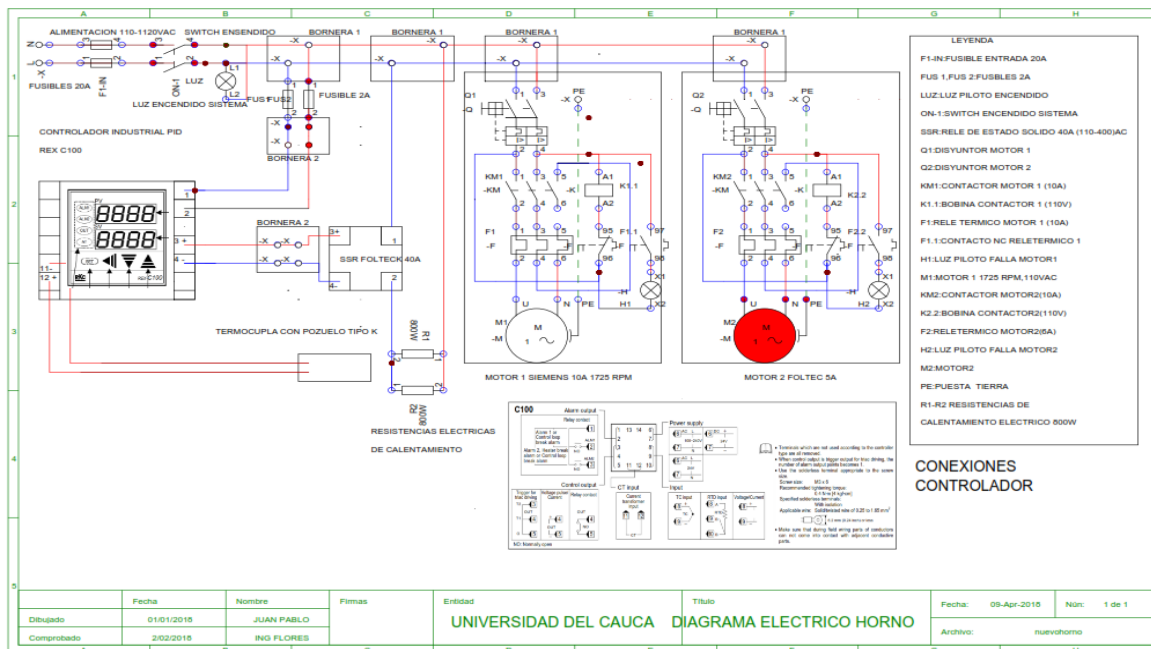


Figura 3 - 4 Propuesta de instrumentación industrial para protección eléctrica de horno

### 3.4.3 Cumplimiento del RT3

**RT3.** Proponer la instrumentación del lazo de control de temperatura del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

la instrumentación planteada se resume en el plano eléctrico presentado en la Figura 3 - 5, que facilita la lectura para la implementación, mantenimiento por parte de técnicos que no conozcan la teoría de la normativa ISA88. La explicación detallada del proceso realizado se encuentra descrita en el Anexo K: Explicación detallada cumplimiento RT3.

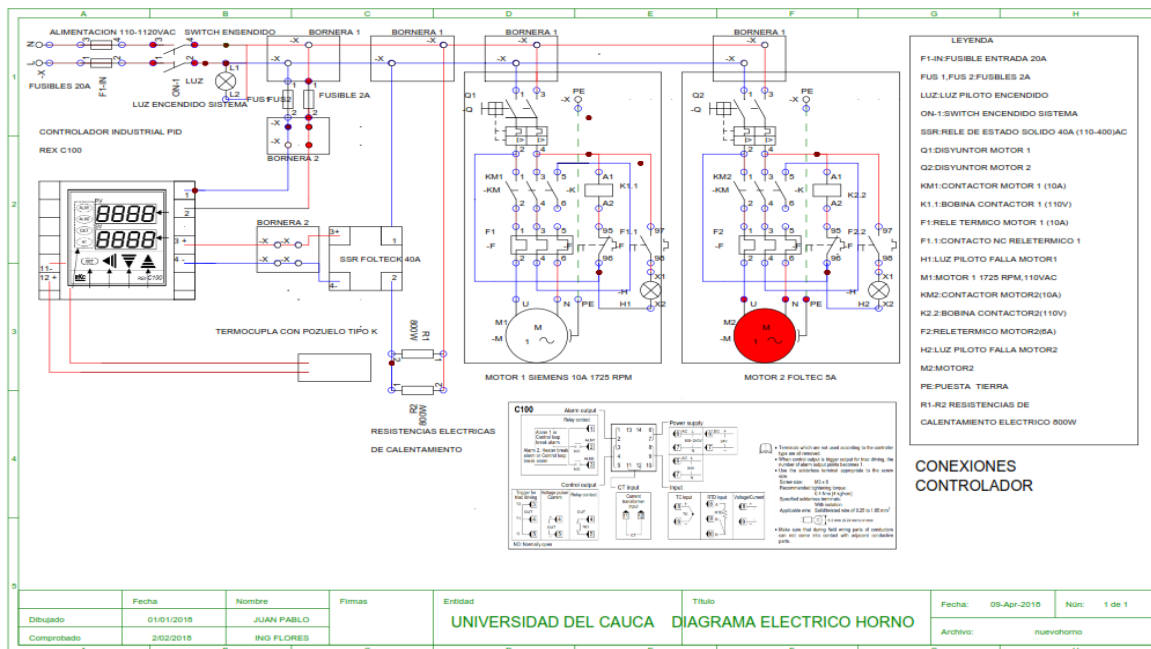


Figura 3 - 5 Propuesta de instrumentación del lazo de control de temperatura para horno

### 3.4.4 Cumplimiento del RT4

**RT4.** Proponer la adquisición de un sensor de temperatura que permita medir pérdida de calor y que este conforme a la exigencia de la ASTM E-1 para termómetros E-1.

La norma INVE 720-07 establece como requisito un sensor de pérdida de calor de tecnología analógica, que sirve para corroborar que la temperatura que mide el sistema de control sea el adecuado. Toma relevancia cuando se abre la puerta de la recamara de calefacción y se verifica que el horno restablezca su temperatura de 163°C en menos de 10 minutos; en la Figura 3 - 6 (en color morado) se muestra la posición en donde debe ubicarse el sensor.



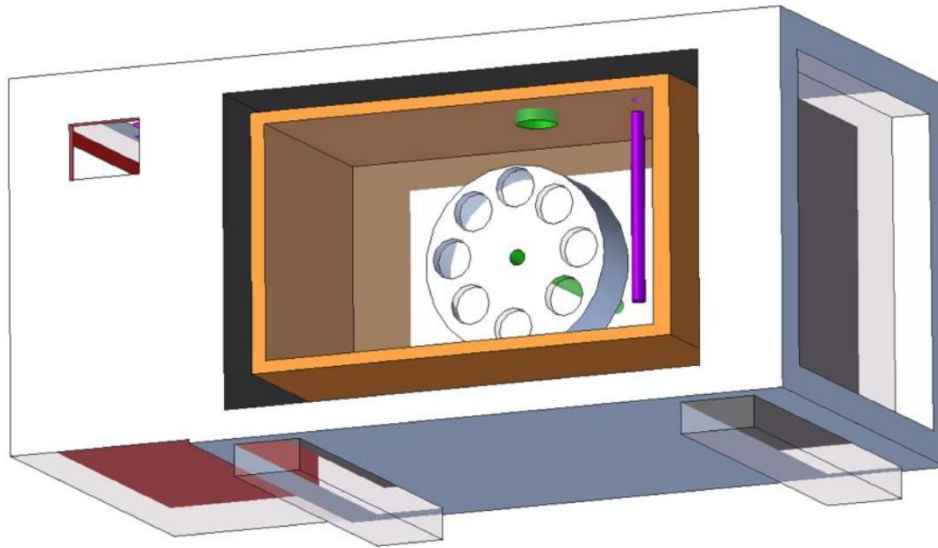


Figura 3 - 6 Posición recomendada para ubicación de sensor

En la actualidad el laboratorio no cuenta con este dispositivo, por tal razón se presentan las características para poder adquirirlo. Para ello se utiliza la norma ASTM E-1 para termómetros E-1, la cual establece los requisitos específicos, estos se presentan en la Figura 3 - 7 y se exponen los detalles de características y sus respectivas medidas en la Tabla 3 - 9 [21].

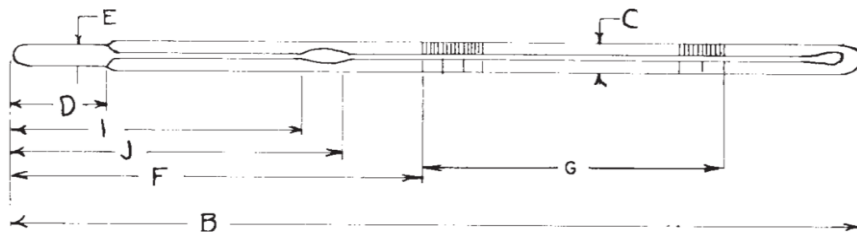


Figura 3 - 7 Requisitos específicos para termómetros E-1

Tabla 3 - 9 Requisitos específicos para termómetros E-1

**TABLE 1** *Continued*

ASTM No.	11C-86	11F-86 <sup>FF</sup>	12C-86	12F-86 <sup>FF</sup>	13C-86
IP No.	28C		64C	64F	47C
Name		Cleveland Open Flash		Density-Wide Range	Loss on Heat
Reference Fig. No.		3		4	9
Range	-6 to + 400°C <sup>C</sup>	20 to 760°F <sup>C</sup>	-20 to + 102°C	-5 to + 215°F	155 to 170°C
For test at					
A Immersion, mm		25		total	total
Graduations:					
Subdivisions	2°C	5°F	0.2°C	0.5°F	0.5°C
Long lines at each	10°C	10°F	1°C	1°F	1°C <sup>D</sup>
Numbers at each	20°C	20°F	2°C	5°F	155°C, 160°C, 165°C <sup>D</sup>
Scale error, max	2°C to 260°C	5°F to 500°F	0.15°C	0.25°F	170°C
Special inscription	4°C above 260°C	7°F above 500°F			0.5°C
Expansion chamber:		ASTM		ASTM	ASTM
Permit heating to		11C-86 or 11F-86		12C-86 or 12F-86	13C-86
A		25 MM IMM			
B Total length, mm		305 to 315 <sup>MM</sup>	150°C	300°F	200°C
C Stem OD, mm		6.0 to 8.0		415 to 425	150 to 160
D Bulb length, mm		7 to 10		6.0 to 8.0	5.5 to 7.0
E Bulb OD, mm		7 to 10		15 to 20	10 to 15
Scale location:		<-4.5 and ->stem		bulb size ->stem size	<-5.0 and ->stem
Bottom of bulb to line at	0°C	32°F	-20°C	-4°F	155°C
F Distance, mm		45 to 55		35 to 50	50 to 60
G Length of graduated portion, mm		210 to 240 <sup>O</sup>		305 to 350 <sup>O</sup>	40 to 60 <sup>O</sup>
Ice-point scale:					
Range					
H Bottom of bulb to ice-point, mm					30 <sup>F</sup>
Contraction chamber:					
I Distance to bottom, min, mm					
J Distance to top, max, mm					
Stem enlargement:					
K OD, mm					
L Length, mm					
M Distance to bottom, mm					

<sup>A</sup> An expansion chamber is provided for relief of gas pressure to avoid distortion of the bulb at higher temperatures. It is not for the purpose of joining mercury separations, and under no circumstances should the thermometer be heated above the highest temperature reading.

<sup>C</sup> Under certain test conditions, the bulb of the thermometer may be 28°C (50°F) above the temperature indicated by the thermometer, and at an indicated temperature of 371°C (700°F) the temperature of the bulb is approaching a critical range in the glass. It is therefore not desirable to use this thermometer under such conditions at indicated temperatures above 371°C (700°F) without checking the ice point.

<sup>D</sup> Longest graduation lines at 155°C, 160°C, 162°C, 164°C, 165°C, and 170°C, with arrows at 162°C and 164°C.

<sup>F</sup> Long, narrow shape.

<sup>O</sup> Capillary clearances shall conform to Section 8.

<sup>FF</sup> For Fahrenheit thermometers, dimension G (length of graduated portion) shall be measured as the length of graduated portion corresponding to the nominal Celsius range.

<sup>MM</sup> This thermometer may be furnished with an optional ring top. See 6.2.3. Addition of a ring top will increase the total length by an amount equal to the outside diameter of the ring.

## **4. PLANTEAMIENTO Y EJECUCIÓN DE MEJORAS EN EL SISTEMA**

El objetivo de este capítulo es presentar una descripción clara y puntual de las mejoras que se realizaron al sistema en pro de lograr el adecuado funcionamiento del horno y por ende la correcta ejecución del ensayo. Por lo anterior se presentan en primer lugar las mejoras mecánicas que buscan de cierta manera reforzar la estructura del horno y lograr su correcto funcionamiento; posteriormente las mejoras térmicas buscan concentrar el calor dentro del horno con el fin de que esté en la capacidad de alcanzar la temperatura esperada y mantenerla y por último se exponen las mejoras eléctricas las cuales permiten verificar que todo el sistema opera de forma adecuada.

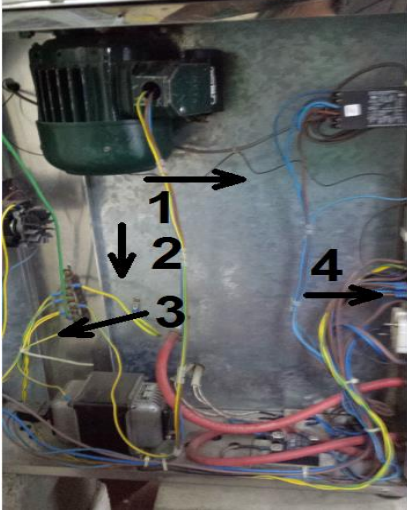
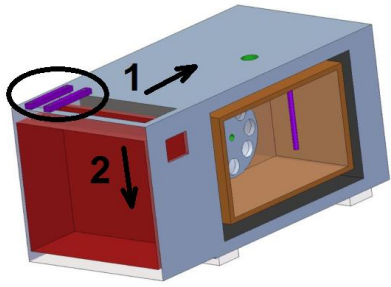
### **4.1 MEJORAS MECÁNICAS**

Cuando nos referimos a mejoras mecánicas del horno, son adecuaciones estructurales que permitan mejorar el rendimiento mecánico del horno y de esta manera llegar a la realización del ensayo INVE720-07. A continuación se enumeran y explican las adecuaciones elaboradas.

#### **4.1.1 Reemplazo del motor 1 asociado al rotor jaula de ardilla**

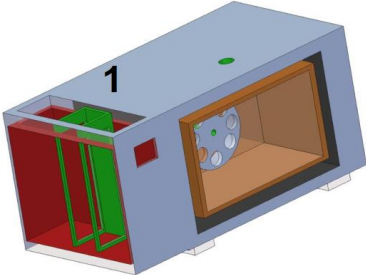
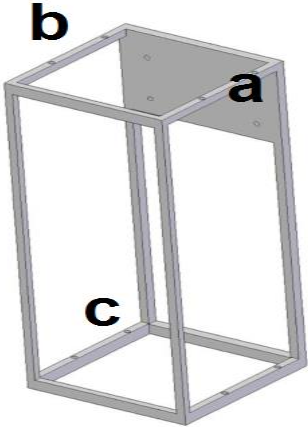
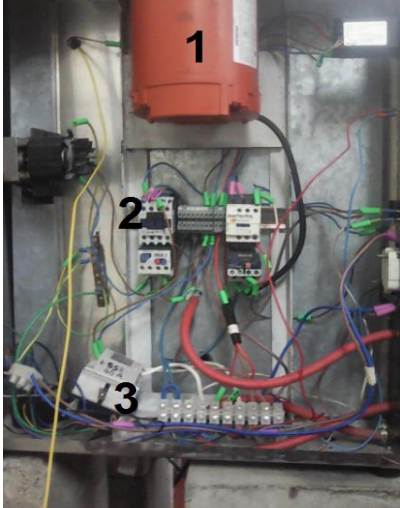
El diagnóstico realizado en la sección 2.3 arrojó las posibles soluciones planteadas como requerimientos técnicos en la sección 2.4. En este proceso se plantea el reemplazo del motor asociado al ventilador jaula de ardilla, gracias a gestiones realizadas por el equipo de trabajo y el coordinador del laboratorio de suelos y asfaltos de la FIC fue posible la adquisición del mismo. Sin embargo, la solución planteada no consistía simplemente en ubicar un nuevo motor en el lugar del anterior, sino que además implicaba realizar algunas adecuaciones mecánicas. Esto teniendo en cuenta que la disposición del motor generaba vibraciones no deseadas en la estructura del horno que ocasionaban problemas como: el desprendimiento de cables internos, movimientos erróneos en el eje del rotor jaula de ardilla y la salida de la correa de transmisión del conjunto eje del motor–eje rotor jaula de ardilla, en la Tabla 4 - 1 se exponen las mejoras implementadas.

Tabla 4 - 1 Mejoras mecánicas requeridas para el soporte del motor

Figuras	Características
 <p>A photograph showing the interior of a furnace with a motor mounted on top. Four black arrows with numbers 1, 2, 3, and 4 indicate the directions of mechanical vibrations. Arrow 1 points right, 2 points down, 3 points left, and 4 points right.</p>	<p>En la figura, la flecha amarilla superior indica como se encontraba ubicado el motor en el horno, esta configuración generaba vibraciones mecánicas, distribuidas así:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La flecha numero 1 permite resaltar que algunas de las vibraciones se distribuían hacia la parte superior de la estructura del horno, razón por la cual se encontraron algunos tornillos sueltos</li> <li>- La flecha numero 2 indica las vibraciones que se distribuían hacia el interior de la cámara de calefacción ocasionando movimientos no requeridos en las muestras de asfalto</li> <li>- La flecha numero 3 representa el sentido del movimiento que ocasionaba desajuste de la tapa lateral, además de molestos ruidos</li> <li>- La flecha numero 4 señala que se ocasionaba desprendimiento en los contactos de cables</li> </ul>
 <p>A 3D schematic diagram of a furnace. A purple circle highlights a motor support structure on the top surface. Two black arrows with numbers 1 and 2 indicate vibration directions: arrow 1 points right and arrow 2 points down.</p>	<p>En la figura, el círculo enfatiza el soporte destinado para el motor, este usaba 4 tornillos, sobre dos laminas ubicadas en parte superior del horno, esta configuración es errónea mecánicamente ya que la estructura total del horno sufría vibraciones, movimientos y sonidos distribuidos como señala la flecha número 1; la flecha número 2, muestra los que afectaban la parte baja del horno. Ante esta situación, es claro que se requiere encontrar una solución definitiva al problema pues sólo el hecho de reemplazar el motor sugerido, no remediará los daños causados por las vibraciones mecánicas excesivas.</p>

Para dar solución se plantea realizar un soporte metálico, que amortigüe las vibraciones mecánicas y movimientos rotacionales generados por el motor cuando se encuentra encendido, este soporte debe encajar en el interior del horno sin afectar los demás dispositivos, debe ir desde la base hasta la parte superior para lograr mayor estabilidad, en la Tabla 4 - 2 se presentan las mejoras propuestas.

Tabla 4 - 2 Mejoras mecánicas propuestas para el soporte del motor

Figuras	Características
	<p>En la figura presentada, la pieza de color verde marcada con el número 1, representa la plataforma que dará el soporte mecánico adecuado al motor, el diseño se propone de acuerdo a las necesidades establecidas y buscando lograr la mayor estabilidad posible.</p>
	<p>La pieza de soporte para el motor, se presenta en la figura de la izquierda, sus dimensiones son: 70cm de alto por 19cm de ancho y por 19cm de fondo, esta será fabricada en ángulo de hierro de 4cm. Posee agujeros que permitirán fijar la estructura de soporte al horno, mediante tornillos y tuercas de acero galvanizado anti vibración, los cuales estarán distribuidos de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 4 agujeros de 1,5cm para sujetar la estructura a la parte posterior del horno</li> <li>b) 4 agujeros de 1cm de diámetro para sujetar la estructura a la parte de superior</li> <li>c) 4 agujeros de 1cm de diámetro para sujetar la estructura a la parte inferior</li> </ul> <p>El tipo de tornillos propuestos no eran considerados en el diseño original del horno, pero serán utilizados en las mejoras propuestas debido a las ventajas que representan, además de que ayudan a solucionar los problemas identificados.</p>
	<p>La figura de la izquierda muestra el montaje real implementado en el horno, donde se observa que la estructura además fue útil para dar orden a la instrumentación del horno; las partes se enumeran a continuación de acuerdo a como se presentan en la gráfica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Representa el motor instalado en la plataforma</li> <li>2) Indica la instrumentación industrial que fue instalada para protección del sistema eléctrico/electrónico</li> <li>3) Resalta la ubicación de borneras para conexión de cables. Esto último se considera un punto adicional de la estructura propuesta pues no sólo sirve para dar soporte al motor, sino que también ayuda a ordenar tanto la instrumentación industrial nueva como las borneras y los cables presentes.</li> </ul>

#### 4.1.2 Adecuación eje rotor jaula de ardilla

Debido a las vibraciones mecánicas causadas por la configuración mecánica errónea de los soportes del motor, los ejes que soportan el rotor jaula de ardilla sufrieron desgaste físico, para solucionarlo fue necesario llevarlos a un taller local de soldadura en bronce para un proceso de resane. En la Tabla 4 - 3 se muestran de forma más detallada las mejoras propuestas.

Tabla 4 - 3 Mejoras requeridas y propuestas para el eje rotor jaula de ardilla

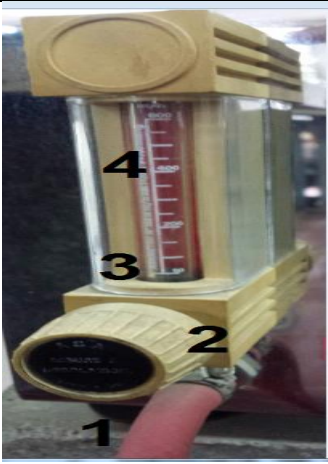
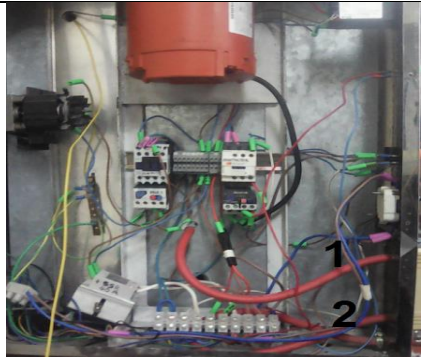
Figuras	Características
	<p>En la figura de la izquierda se presenta el rotor jaula de ardilla, encargado de distribuir la temperatura uniformemente en la recámara de calentamiento mediante circulación de aire, debido a los movimientos mecánicos erróneos, se generó desgaste en el eje de transmisión del movimiento, esto producía movimientos rotacionales peligrosos que podrían ocasionar lesiones para los usuarios del horno, para evitarlo se decide sacar el eje, revisar su estado y tomar los correctivos necesarios.</p>
	<p>Una vez se analiza el eje del rotor fabricado en bronce, es posible apreciar que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se presenta desgaste de la rosca del tornillo que sujeta el eje al horno, el cual se resalta con el círculo amarillo superior.</li> <li>- En el círculo amarillo de la parte inferior se ve el desgaste del pivote del eje, este se sostiene en un rodamiento o balinera lo cual permite el movimiento circular.</li> </ul> <p>Estos desgastes se solucionaron llevando el eje a un taller local, donde se le realizó soldadura de bronce para rellenar los desgastes, después en un torno industrial se elaboró la rosca nuevamente y como punto final es necesario el pulimiento que permita garantizar las condiciones de medidas originales.</p>
	<p>Después de realizar la mejora del eje se ubica nuevamente en el horno, se cambió el rodamiento del eje por uno nuevo y se lubricó con vaselina industrial. Paralelamente se cambian las poleas del conjunto motor/eje jaula de ardilla. En la figura se presentan</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La polea del motor se cambió por una de 10cm de diámetro en material aluminio</li> <li>2. La nueva polea del eje, se cambió por una con las mismas dimensiones que la original (10cm de diámetro en material aluminio</li> </ol>

	<p>3. Se procedió a reemplazar la banda de movimiento por una de 56cm de largo, debido a que la ubicación del motor con la nueva plataforma cambió las dimensiones del conjunto motor/eje.</p> <p>Con estas adecuaciones se garantiza la seguridad para la manipulación del horno, por parte de los usuarios, además de eliminación de movimientos mecánicos erróneos.</p>
--	--

### 4.1.3 Mantenimiento sistema medidor de flujo de aire horno

Es importante proveer flujo de aire para realizar el ensayo INVE 720-07, ya que este genera el proceso físico de envejecimiento en el asfalto. Teniendo en cuenta la importancia de este ítem es necesario garantizar que se cumple con este requisito, en la Tabla 4 - 4 se expone el procedimiento seguido la metodología a seguir.

Tabla 4 - 4 Mantenimiento sistema medidor de flujo de aire horno

Figuras	Características
	<p>Se retiro el medidor de flujo para limpieza, el cual está compuesto por:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manguera de entrada de aire compresor externo</li> <li>2. La válvula de control de flujo</li> <li>3. Bola flotadora</li> <li>4. El indicador de cantidad de flujo de aire entrante</li> </ol> <p>Se le realizó limpieza al indicador porque tenía presencia de suciedad en su interior, generando rozamiento en la bola flotadora y ocasionando error en la medida.</p>
	<p>Se realizo cambio de mangueras con el fin de evitar obstrucciones en el flujo de aire que ingresa en el serpentín. Los cambios se representan así:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mangueras de entrada</li> <li>2. Manguera de salida del indicador de flujo</li> </ol>

	<p>Se extrajo el serpentín para realizarle limpieza, para lo cual se introdujo Varsol por el orificio de entrada número 1 con el fin de eliminar posibles restos de asfalto solidificado en el interior y exterior del serpentín que pudieran causar algún bloqueo de aire</p>
	<p>Se realizó limpieza en la válvula de salida del serpentín, debido a que presentaba asfalto solidificado, esto obstruía la inyección de flujo de aire caliente a las muestras asfálticas que van a ser utilizadas para el ensayo INVE 720-07, la limpieza consistió en desenroscar la válvula y extraer el asfalto solidificado utilizando una aguja y diluyente químico Varsol.</p>
	<p>Se realizó la verificación del funcionamiento y la limpieza del compresor encargado de suministrar el flujo de aire para el ensayo, además se cambió la manguera de suministro de aire del compresor/horno.</p>
	<p>Se incluyó el filtro de aire al compresor para filtrar líquidos y partículas extrañas en el sistema de flujo de aire. Ya que el sistema original no lo poseía. Fuente: [22]</p>

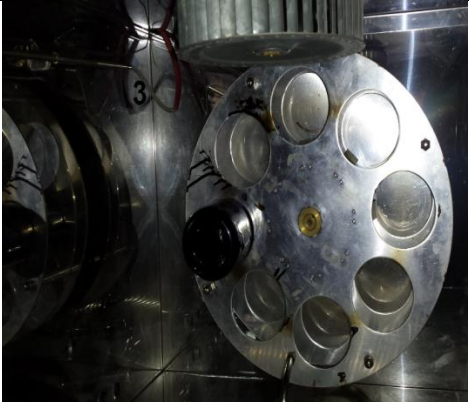
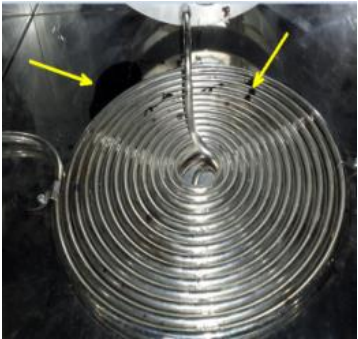

#### 4.1.4 Propuesta de limpieza para protección contra residuos asfalto



Es inherente que al realizar el ensayo de acuerdo a la norma INVE 720-07 se desprendan residuos de asfalto debido a que la muestra sufre movimientos rotacionales y se expone a altas temperaturas, estos residuos se alojan en el interior del horno y podrían llegar a alterar el correcto desarrollo del ensayo, por lo cual se propone un procedimiento de limpieza, que por simple que parezca ahorra recursos



de tiempo y dinero al laboratorio de suelos de la FIC. La propuesta se expone en detalle en la Tabla 4 - 5.

Tabla 4 - 5 Propuesta de limpieza para protección contra residuos asfalto

Figuras	Características
	<p>En la figura, se muestran los desperdicios de asfalto que se generan en la bandeja vertical donde se ubican las muestras para al realizar los ensayos.</p>
	<p>Las flechas amarillas en la figura resaltan los restos de asfalto que se presentan en la base de la cámara de calefacción, estos demandan una limpieza constante del serpentín, tarea que en ocasiones se torna dispendiosa para los encargados del laboratorio ya que el asfalto se adhiere fuertemente al serpentín en la base del horno. Para la limpieza es necesario: encender el horno 1 hora extra clase, usar 2 litros de químico diluyente Varsol, trapos, espátulas y toma aproximadamente 6 horas limpiar estos desperdicios.</p>
	<p>En la figura, el círculo de color amarillo señala el serpentín cubierto con papel aluminio, esta propuesta no ocasiona cambios sustanciales en los procesos térmicos del horno, por el contrario, ayuda a conservar el calor y facilita la limpieza de residuos.</p>

	<p>En la figura, se expone la propuesta de cubrir con papel aluminio la bandeja de la base de la cámara de calefacción del horno, a fin de facilitar el proceso de limpieza.</p>
	<p>La figura presenta el conjunto: serpentín/bandeja cubiertos con papel aluminio, se observa que no afecta la estética del horno y facilita la limpieza del mismo, ahorrando dinero y tiempo; ya que el tiempo requerido para cubrir con el papel aluminio las partes del horno mencionadas es de máximo 1 hora, tiempo que es sustancialmente menor que las 6 horas requeridas anteriormente por el personal para la misma tarea.</p>

Las mejoras propuestas e implementadas en la parte mecánica apoyan el proceso de realización del ensayo, pero se requiere que todas las partes funcionen en armonía por lo cual se proponen además unas mejoras térmicas que se exponen a continuación.

## 4.2 MEJORAS TÉRMICAS

Las mejoras térmicas presentadas en esta sección, buscan reforzar algunas falencias detectadas en el horno en cuanto a la temperatura. A continuación, se exponen cada una de ellas.

### 4.2.1 Pérdidas térmicas - Diagrama de Sankey

El diagrama de Sankey es un gráfico teórico presentado en la Figura 4 - 1, donde se muestra las pérdidas de temperatura existentes en hornos industriales de resistencia eléctrica, este especifica que hay pérdidas por radiación hacia el medio ambiente circundante al horno, pérdidas por absorción de los materiales en que está fabricado el horno o energía a contenedores, pérdidas por fuga de paredes - aberturas de puertas y pérdidas adicionales clasificadas dependiendo de las características propias del horno, este grafico demuestra que aproximadamente el 50% de la energía producida por las resistencias se aplica a la carga presente en las recamaras de los hornos y el otro 50% se distribuye entre las diferentes pérdidas.

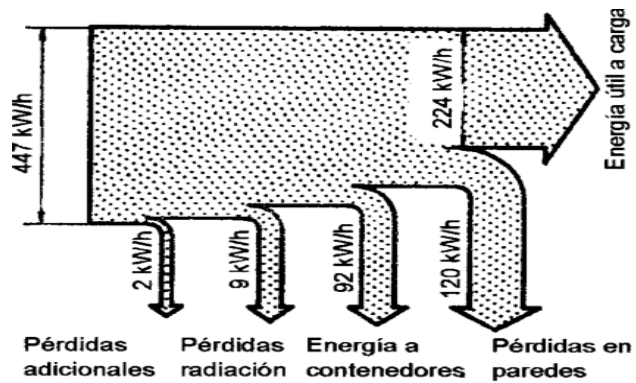




Figura 4 - 1 Distribución de la energía térmica  
Fuente: [23]

A partir de la teoría expuesta se hace un diagnóstico para determinar cuál de estas pérdidas son más representativas en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, esta inspección se realiza con el fin de tratar de disminuirlas ya que es imposible eliminarlas del todo según la teoría. A continuación, en la Tabla 4 - 6 se exponen las pérdidas más representativas del horno.

Tabla 4 - 6 Pérdidas térmicas más representativas del horno

Figuras	Características
	<p><b>Pérdidas por falta de aislamiento térmico entre las resistencias eléctricas, la base del horno y la cámara de calentamiento.</b></p> <p>La falta de aislamiento generaba calor que se irradia hacia la base del horno y era muy poca la radiación hacia la cámara de calentamiento, ocasionando un tiempo mayor al esperado para alcanzar la temperatura de 163°C según establece la norma INVE720-07, la dimensiones para poner aislamiento térmico es de 20cm de alto por 50cm de largo.</p>
	<p><b>Pérdidas por la puerta de recámara de calentamiento.</b></p> <p>Aquí se encontró que el seguro de la chapa que cierra la puerta estaba dañado, por lo cual se presentaba una fuga de vapor del interior hacia el exterior del horno, causando pérdida de temperatura.</p>



**Perdidas por los ejes del ventilador de la cámara de calefacción.**

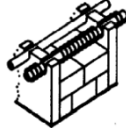
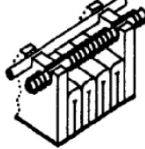
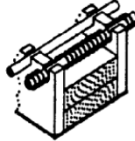
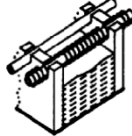
El eje del ventilador estaba soportado sobre rodamientos o balineras que van desde la cámara de calentamiento hacia la parte superior del horno, por estas aberturas se observaba salida de vapor hacia el exterior.

Para dar solución a la problemática presentada se abordará uno a uno de los ítems nombrados en la Tabla 4 - 6.

**4.2.2 Perdidas por falta de aislamiento térmico entre las resistencias eléctricas, la base del horno y la cámara de calentamiento.**

Primero que todo es importante saber que según donde se ubiquen las resistencias, los hornos pueden ser de calefacción por la parte inferior, superior, lateral o por un extremo. Nuestro proyecto consiste en horno de configuración solera, para entender los métodos de aislamiento térmico utilizado según la configuración del horno se tiene en cuenta la información consignada en la Tabla 4 - 7.

Tabla 4 - 7 Disposición resistencias eléctricas y principales tipos de aislamiento térmico

Tecnología de aislamiento	Configuración solera
Ladrillos térmicos	
Manta térmica en acordeón	
Módulos térmicos al vacío	
Mantas de fibras cristalinas térmicas	

Considerando la explicación presentada en la Tabla 4 - 7, para dar solución a la pérdida por falta de aislamiento térmico en la base de las resistencias, se recurre a

la configuración térmica de ladrillos debido a que los otros aislamientos térmicos, presentan mayores inconvenientes debido a que son de difícil consecución local y nacional además de sus precios elevados.

La técnica de ladrillos refractarios posee buenas propiedades aislantes como: dar soporte a las resistencias, toleran temperaturas de 1000°C, reducen las pérdidas de calor a través de la base del horno y protegen los cables de alimentación eléctrica de las resistencias.

El procedimiento para poner los ladrillos fue el siguiente: se seleccionaron 8 ladrillos de dimensiones de 20cm de largo por 12 cm de alto (las dimensiones de algunos de estos fueron modificadas para lograr que encajaran dentro del área de ubicación de las resistencias eléctricas), no fue necesario pegarlos unos con otros ya que a futuro deben ser extraídos para el respectivo mantenimiento, en la Figura 4 - 2 se observa la configuración de los ladrillos en el horno, su acabado final no afecta las propiedades mecánicas cuando se pone la tapa base de la cámara de calefacción.



Figura 4 - 2 Configuración de los ladrillos en el horno

### 4.2.3 Pérdidas de la puerta recámara de calentamiento

Para dar solución a las pérdidas térmicas presentes en la puerta de la recámara de calentamiento que se presentan cuando el horno comienza su funcionamiento, se procede a arreglar el seguro de la chapa de la puerta principal, consiste en reemplazarlo por uno que presente las mismas características mecánicas como se aprecia Figura 4 - 3 (Círculo amarillo), con este pequeño cambio se logró reducir pérdidas térmicas por fuga de temperatura hacia el exterior y pérdidas por infiltración de aire al interior de la recámara de calentamiento.



Figura 4 - 3 Seguro de la chapa de la puerta principal

#### **4.2.4 Perdidas por los ejes del ventilador**


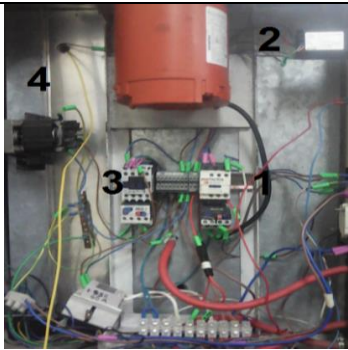

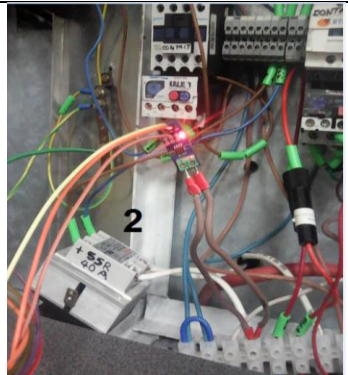
Perdidas por los ejes del ventilador de la cámara de calefacción, no se pueden evitar o solucionar debido a que las dimensiones de los rodamientos que posee el eje no son modificables, pues esto implicaría desarmar completamente el horno, cambiar dimensiones del ventilador, sus ejes, rodamientos un gasto injustificable y poco práctico.

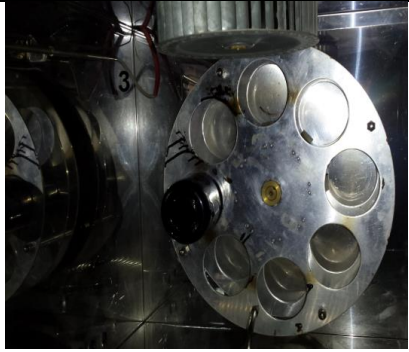
Después de realizar las adecuaciones mecánicas y térmicas para el mejoramiento del horno, se procede a implementar las mejoras eléctricas y electrónicas. Se decide trabajarlo como último punto de las mejoras dado que es una manera de confirmar que lo anterior está en funcionamiento.

### **4.3 MEJORAS ELÉCTRICAS**

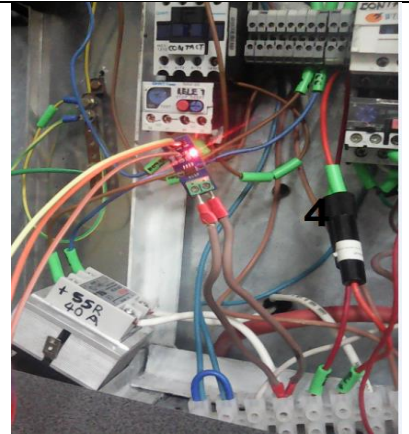
Estas mejoras están compuestas por la incorporación del nuevo lazo de control de temperatura, instrumentación industrial para la protección de los dos motores eléctricos, cambio total del cableado, instalación de borneras adecuadas para la conexión de los cables internos del horno e inclusión de fusibles térmicos en la entrada de alimentación del horno. En la Tabla 4 - 8 se resume el procedimiento que se llevó acabo.

Tabla 4 - 8 Descripción mejoras eléctricas

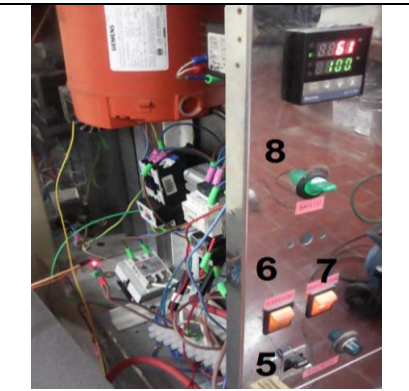
Figuras	Características
	<p>Primero se instala el nuevo motor de 110 V Ac y de 3725 rpm, (ver número 1 en la gráfica), encargado de darle movimiento al ventilador jaula de ardilla.</p> <p>Segundo se ubica el motor 2 de 110 V Ac y de 15 rpm encargado de mover la plataforma en la que se alojan las ocho muestras asfálticas (ver número 2 en la gráfica).</p>
	<p>Se coloca un contactor eléctrico de 20 A – 110 V AC, un relé térmico de 20 A – 110 V AC para protección del motor 1 (ver número 1 y 2 en la gráfica).</p> <p>Luego se ubica la protección eléctrica del motor 2 compuesta por un contactor eléctrico de 10 A – 110 V AC a 60 Hz, un relé térmico de 10 A – 110 V AC a 60 Hz (ver número 3 y 4 en la gráfica).</p> <p>Se realizan las conexiones eléctricas de alimentación de motores y protección eléctrica.</p>
	<p>Se procede a ubicar la instrumentación del nuevo lazo de control de temperatura, comenzando por el controlador industrial marca REX C100 (ver número 1 en la figura)</p>
	<p>Luego se instala el SSR (número 2 en la figura) de características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- De 40 A</li> <li>- Control de voltajes de salida de 0 a 400 V AC</li> <li>- Control del SSR por señales PWM de 0-12 V DC</li> </ul>



Se ubica la termocupla tipo K, de un metro de largo con pozuelo industrial en la cámara de calentamiento del horno (número 3 en la figura).



Se realizan las conexiones eléctricas de la instrumentación del lazo de control de temperatura y se incorporan fusibles de protección de sobrecarga de 0,5 Amperios (número 4 en la figura).



Puesta de interruptores. Primero se coloca el interruptor de 40 A para el encendido del horno (número 5 en la figura), segundo se ubica un interruptor de 20 A para activar el motor 1 (número 6 en la figura), tercero se ubica el interruptor de 10 A para activar motor 2 (número 7 en la figura) y finalmente se agrega un interruptor de 5 A para activar el lazo de control de temperatura (número 8 en la figura).

Una vez las conexiones eléctricas se encuentran en correcto funcionamiento se procede a activar y desactivar el horno, se ensaya el encendido y apagado de los motores 1 y 2, lo cual evidencia el correcto funcionamiento de los motores, se efectúa el encendido del lazo de control de temperatura, el resultado es que el sistema enciende correctamente, pero se resalta que falta realizar la sintonización del controlador industrial.



### 4.3.1 Control de temperatura del Horno

El control automático busca mantener la temperatura, en el valor de 163 °C, con el objetivo de lograr seguridad y calidad en la realización del ensayo INVE 720-07.

En la Figura 4 - 4 se muestra el lazo cerrado de control de temperatura que gobierna el horno, este se encuentra conformado por los siguientes componentes:

1. Valor de temperatura que debe mantener el horno (según la norma INVE 720-07)
2. Controlador cuya función es tomar decisiones
3. SSR
4. Resistencias eléctricas del horno  
Los ítems 3 y 4 hacen referencia a elementos finales de control u actuadores cuya función es la de ejecutar las órdenes del controlador [24]
5. Posibles disturbios que afecten el sistema, para nuestro caso la apertura de la puerta de la cámara de calefacción para ingresar las muestras asfálticas
6. Sensor cuya función es la medición

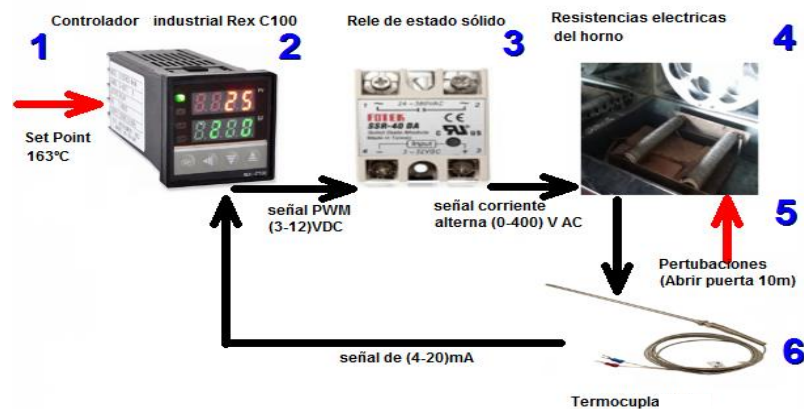


Figura 4 - 4 Lazo cerrado de control de temperatura

### 4.3.2 Sintonización del controlador industrial REX C100

La sintonización de controladores consiste en la estimación de los parámetros del algoritmo de control: Proporcional, Integral y Derivativo (PID) que permiten obtener una respuesta adecuada en lazo cerrado en términos de tiempo de estabilización y el logro del valor deseado o Set Point.

En la actualidad hay muchas técnicas de sintonización de un controlador, las cuales, en su mayoría, están basados en los siguientes métodos:

- Métodos empíricos, como el método de Zigler y Nichols.
- Métodos analíticos, como la técnica basada en el Lugar geométrico de las Raíces.
- Métodos basados en optimización, como el método de Ciancone o López.

- Métodos de síntesis directa.

Cada método de sintonización tiene diferentes ventajas y desventajas, las cuales poseen mayor o menor peso según el tipo de proceso que se desea controlar [25].

De acuerdo a lo anterior, se decide proceder a la sintonización del controlador mediante el modelo matemático en busca de las constantes requeridas.

- **Modelo matemático de la dinámica del horno**

Para realizar la sintonización del controlador, inicialmente se procedió a realizar la caracterización matemática del horno, el resultado se aprecia en la ecuación (1), con la cual se esperaba realizar el análisis del comportamiento de la dinámica térmica del horno mediante simulaciones virtuales y de esta manera poder llevar a cabo el diseño del control, sin embargo no se logró calcular las constantes mencionadas en Tabla 4 - 9, para mayor información de la metodología de obtención de la ecuación (1) referirse al Anexo L: Función de transferencia del horno.

$$T * \frac{d^2 T1}{dt^2} + \frac{(C1 + C2 + C3)}{(C2 + C3)} * \frac{dT1}{dt} = \frac{U^2}{R} * \frac{1}{(C2 + C3)} \quad (1)$$

Tabla 4 - 9 Constantes requeridas para la calibración

Constante	Equivalencia
$C3$	Capacidad térmica de las paredes del Horno.
$Q3$	Perdidas de calor a través de las paredes del horno
$R_{t1}$	Resistencia térmica entre paredes y la carga.

Ya que mediante el modelo matemático no fue posible lograr la sintonización a continuación, se procede a probar con la caracterización del proceso.

- **Caracterización del proceso**

La otra alternativa que se tomó para la sintonización del controlador, fue caracterizar el proceso térmico del horno por medio del método de Zigler y Nichols en lazo de control abierto. Con este método se ajusta la respuesta dinámica del sistema, a un modelo de primer orden con tiempo muerto (POMTM, por sus siglas en inglés), además es necesario suponer que el sistema es lineal en todo su rango de operación. El ajuste se realiza a partir de datos experimentales en los que la entrada del sistema se somete a un cambio de tipo escalón [24].

Para la caracterización del proceso térmico, fue necesario diseñar e implementar una tarjeta electrónica de adquisición de los datos, la Figura 4 - 5 muestra el modelo implementado (ver Anexo L: Función de transferencia del horno).

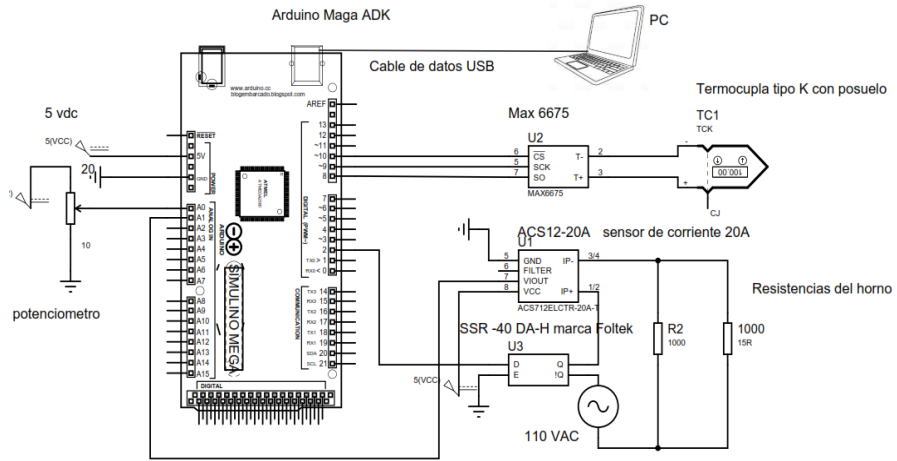


Figura 4 - 5 Modelo de tarjeta electrónica implementado

Para el registro de los datos adquiridos se estableció la metodología mostrada en la Figura 4 - 6.

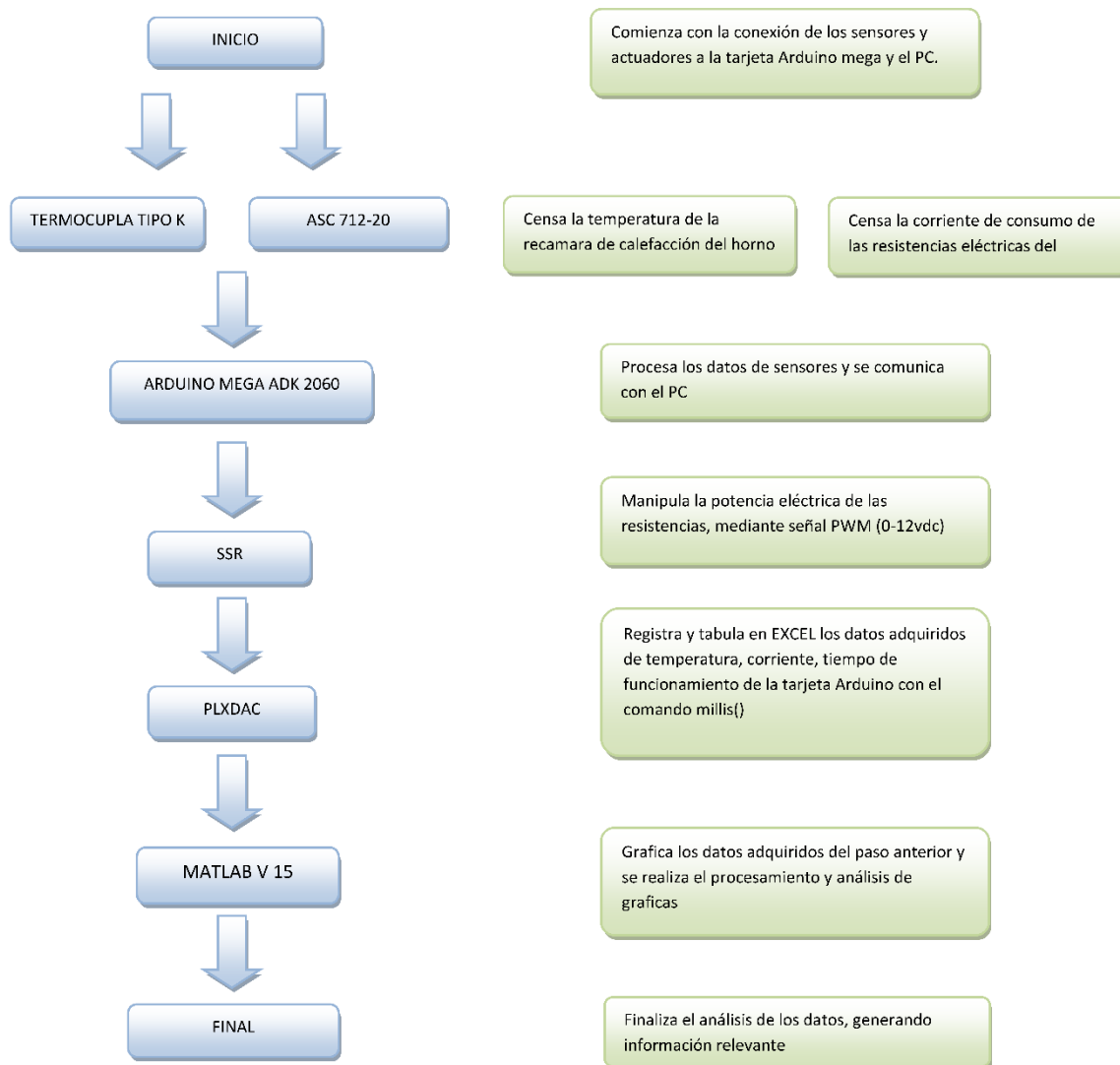


Figura 4 - 6 Metodología de desarrollo

a) Desarrollo e implementación de la metodología

Se inicia abriendo el lazo de control de temperatura previamente implementado, con el fin de que la manipulación de la temperatura se realice con la tarjeta de adquisición de datos propuesta, posteriormente se conecta la termocupla tipo K, el sensor de corriente AS 12-20 y el SSR a la tarjeta Arduino mega ADK 2060, finalmente se hace la conexión USB al computador como se aprecia en la Figura 4 - 7.



Figura 4 - 7 conexión USB al computador

Una vez establecida la conexión nombrada anteriormente, se procede a la adquisición de datos con el programa PLXDAC, este programa permite la tabulación de los datos en Excel en formato de columnas con el fin de facilitar la organización de los datos como se observa en la Figura 4 - 8.

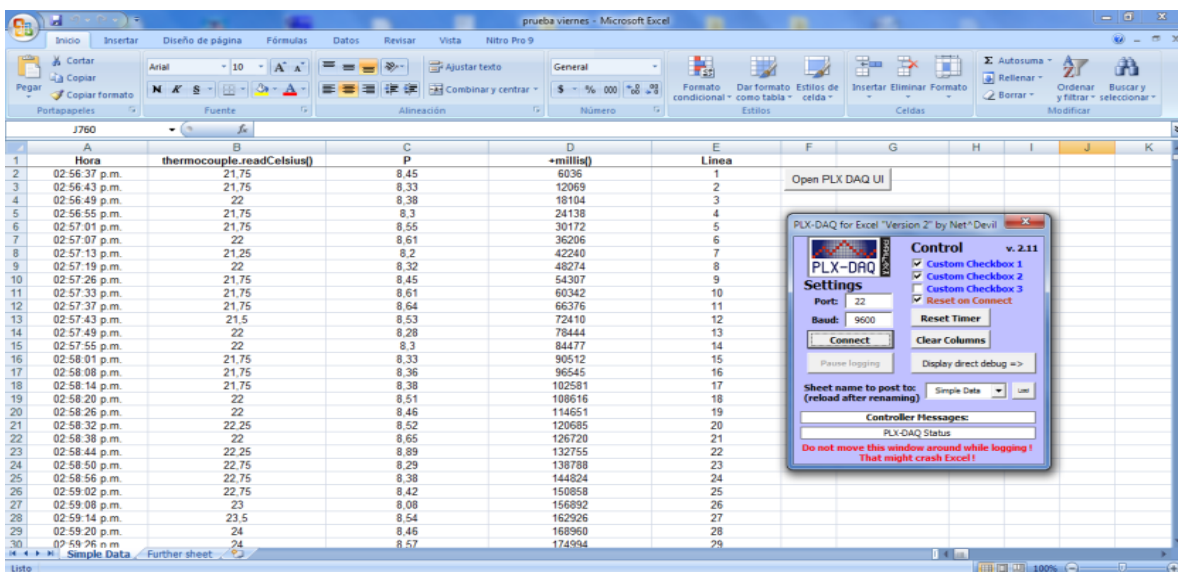


Figura 4 - 8 Programa PLXDAC

Con los datos ya almacenados se procede a trasladarlos al programa MATLAB V15, con el fin de hacer una manipulación formal de los datos adquiridos, como resultado de esta manipulación se obtiene la gráfica del comportamiento de la temperatura en el tiempo, donde se pudo observar el comportamiento térmico del horno al variar la potencia aplicada a las resistencias eléctricas del mismo.

Posteriormente, se aplica el método de Zigler y Nichols en lazo abierto para obtener las constantes del controlador adecuadas para la dinámica térmica del sistema. En la Figura 4 - 9 se muestra la curva de reacción partiendo del 28% y 63% de la

variación de la temperatura, con estos valores se procede a hallar las constantes del controlador, teniendo en cuenta que la dinámica del comportamiento térmico es lenta, se propone basado en teoría y en experiencia un control PI, puesto que la acción derivativa genera oscilaciones innecesarias que ocasionan desgastes prematuros en los actuadores del sistema de control.

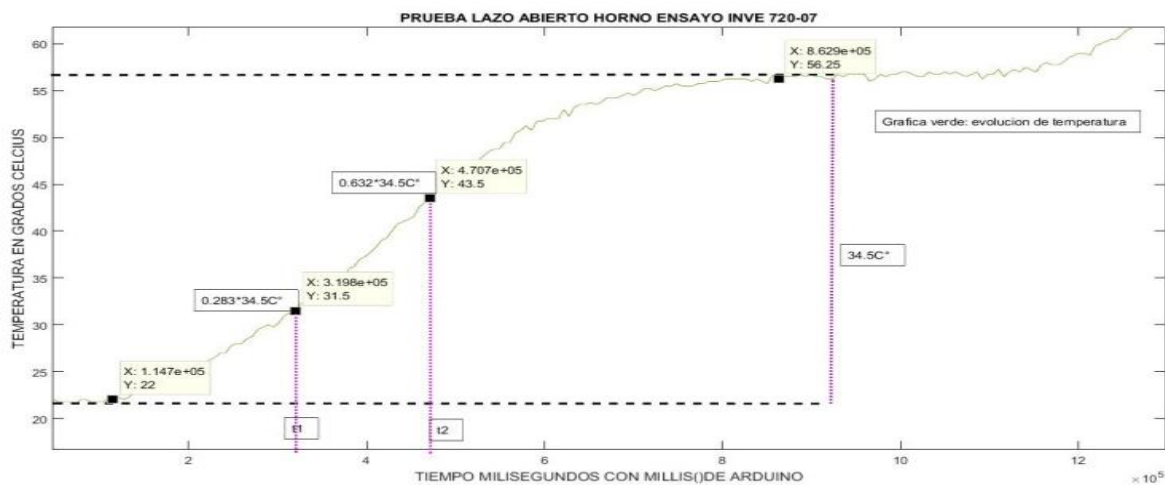


Figura 4 - 9 Curva de reacción del comportamiento térmico

Como resultado se obtiene las constantes del controlador que se muestra en la Tabla 4 - 10.

Tabla 4 - 10 Constantes obtenidas para el controlador

Tipo de controlador	$k_p$	$T_i$	$T_d$
PI	2.6086	12.79	-

Finalmente, con los valores obtenidos de las constantes se procede a ingresarlos al controlador industrial RSX C100, se conecta nuevamente el lazo del control del horno y se realiza la prueba de validación de las constantes donde se logra alcanzar y mantener por primera vez la temperatura de operación de 163°C (establecidos por la norma INV 720 – 07), tal como se puede apreciar en la Figura 4 - 10 y la Figura 4 - 11.

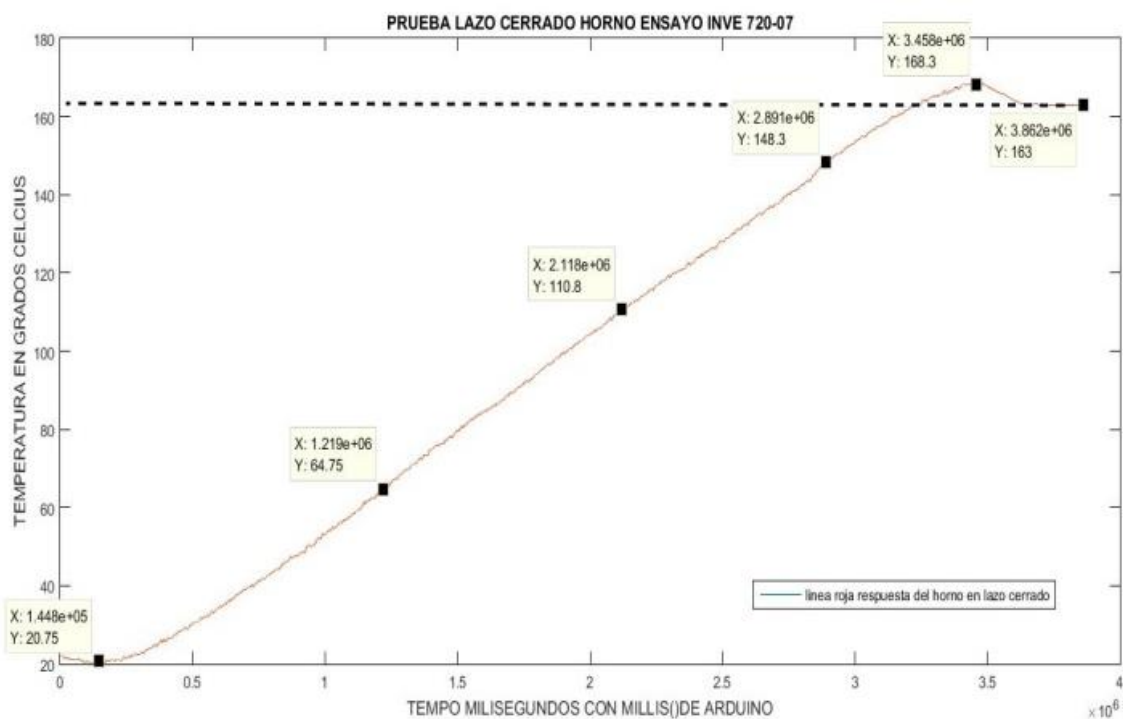


Figura 4 - 10 Constantes obtenidas para el controlador

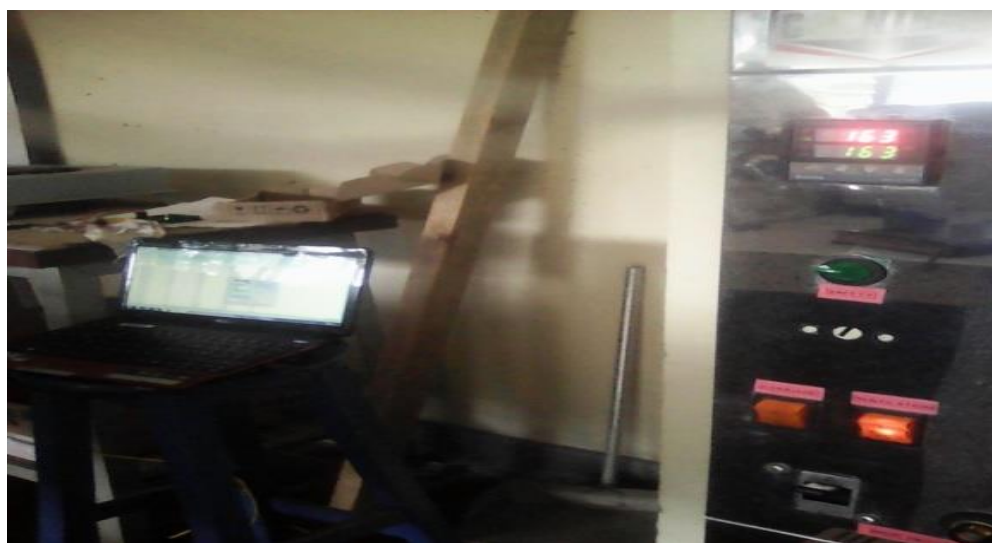


Figura 4 - 11 Horno de prueba a temperatura de operación de 163°C

### 4.3.3 Pruebas de comportamiento del lazo de control sintonizado frente a los disturbios

La forma de comprobar el correcto funcionamiento del lazo cerrado de control sintonizado frente a los disturbios consiste en abrir la puerta de la cámara de

calefacción del horno en diferentes lapsos de tiempo; además sirve para estimar cual es tiempo requerido por los usuarios para ingresar las muestras asfálticas en la cámara de calefacción, sin que sufran peligro de quemadura, derrame de las muestras asfálticas y se consiga que el horno retorne a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos (requisito establecido por la norma INVE 720-07).

- **Primera prueba**

La prueba comienza, calentando el horno a 163 °C por un periodo de 16 horas antes de ingresar las 8 muestras asfálticas (requisito establecido por la norma INVE 720-07); se cronometraron el tiempo que se mantuvo abierta la puerta de la recamara de calefacción y el tiempo que el horno tardaba en alcanzar la temperatura de 163°C en la Tabla 4 - 11 se resumen los resultados.

Tabla 4 - 11 Tiempo que el horno tardaba en alcanzar la temperatura de 163°C

Tiempo puerta recamara abierta (min)	Tiempo en alcanzar 163°C (min)	Acciones
5	8	Se ingresaron las 8 muestras sin derrame de asfalto y sin peligro para el usuario; se observa que se puede realizar esta acción en un tiempo mínimo; se cumple con retornar a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos
4	8	Se ingresaron las 8 muestras sin derrame de asfalto y sin peligro para el usuario; se observa que se puede realizar esta acción en un tiempo mínimo; se cumple con retornar a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos
3	6	Se ingresaron las 8 muestras sin derrame de asfalto y sin peligro para el usuario; se observa que se puede realizar esta acción en un tiempo mínimo; se cumple con retornar a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos
2	3.30	Se ingresaron las 8 muestras sin derrame de asfalto y sin peligro para el usuario; se observa que se puede realizar esta acción en un tiempo mínimo; se cumple con retornar a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos
1	2.	Se ingresaron las 8 muestras sin derrame de asfalto y sin peligro para el usuario; se observa que este es el tiempo ideal; se cumple con retornar a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos; además se reduce el consumo de potencia eléctrica innecesaria.

- **Segunda prueba**

Para esta prueba se conecta la tarjeta electrónica de adquisición de datos al horno, su configuración es solo para obtener información de temperatura y tiempo transcurrido. Para esta prueba se toma la decisión de realizarla por un lapso de 2 horas, tiempo que demora el horno en alcanzar la temperatura de 163°C y



mantenerse estable. En la Figura 4 - 12 se observa el resultado de su graficación en el software Matlab v15. En el eje *x* el tiempo transcurrido en milisegundos desde que se activó la tarjeta Arduino Mega ADK 2650, en el eje *y* la temperatura en grados centígrados alcanzada por el horno. En la Tabla 4 - 12 se realizan los cálculos en minutos de duración de los disturbios.

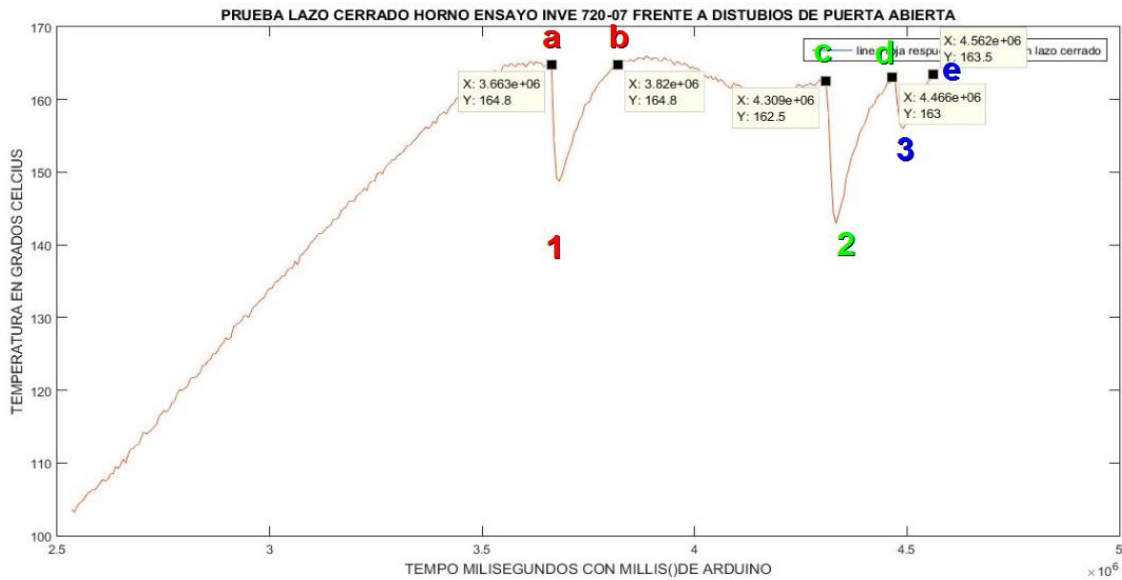


Figura 4 - 12 Graficación en el software Matlab v15

Tabla 4 - 12 Cálculos de duración de los disturbios en minutos

Cálculo del tiempo en minutos	Característica
<p>a. <math>3,663 \times 10^6 = 3663000 \text{ ms} = 3663 \text{ s}</math></p> <p>b. <math>3,82 \times 10^6 = 3820000 \text{ ms} = 3820 \text{ s}</math></p> <p>a – b = 382000 ms = 3663 s</p>	<p>El primer disturbio se identifica con color rojo en la gráfica (nombrado con 1 en la Figura 4 - 12), va desde un tiempo de inicio de <math>3.663 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra a en la Figura 4 - 12) hasta un tiempo final, en el cual se restablece la temperatura <math>3.82 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra b en la Figura 4 - 12). La puerta permaneció abierta 2 minutos.</p>
<p>c. <math>4,309 \times 10^6 = 4309000 \text{ ms} = 4309 \text{ s}</math></p> <p>d. <math>4,466 \times 10^6 = 4466000 \text{ ms} = 4466 \text{ s}</math></p> <p>c – d = 157 s =&gt; 2,61 m (para regresar a la temperatura de operación)</p>	<p>El segundo disturbio se identifica con color verde en la gráfica (nombrado con 2 en la Figura 4 - 12), que va desde un tiempo de inicio de <math>4.309 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra c en la Figura 4 - 12), el tiempo en restablecer la temperatura es de <math>4.466 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra d en la Figura 4 - 12) La puerta permaneció abierta 3 minutos.</p>

<p>e. <math>4,562 * 10^6 = 4562000 \text{ ms} = 4562 \text{ s}</math></p> <p><math>d - e = 96 \text{ s} \Rightarrow 1,24 \text{ m}</math> (para regresar a la temperatura de operación)</p>	<p>El tercer disturbio se identifica con color azul en la gráfica (nombrado con 3 en la Figura 4 - 12), que va desde un tiempo de inicio de <math>4.466 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra <i>d</i> en la Figura 4 - 12), hasta el tiempo de restablecimiento de la temperatura <math>4.562 \times 10^6</math> milisegundos (nombrado con la letra <i>e</i> en la Figura 4 - 12). La puerta permaneció abierta 1 minuto.</p>
---	--

#### 4.3.4 Análisis pruebas

De la primera prueba Tabla 4 - 11 se toma como tiempo establecido para ingresar las muestras asfálticas a la cámara de calefacción del horno un minuto sin que sufran peligro de quemadura, derrame de las muestras asfálticas y se consiga que el horno retorne a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos requisito establecido por la norma INVE 720-07.

De la segunda prueba Tabla 4 - 12 se corrobora mediante adquisición de datos que el tiempo estipulado para ingresar las muestras asfálticas a la cámara de calefacción del horno es un minuto sin que sufran peligro de quemadura, derrame de las muestras asfálticas y se consiga que el horno retorne a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos requisito establecido por la norma INVE 720-07.

Por tanto, los usuarios del horno poseen mínimo un minuto y máximo 4 minutos para el ingreso de las muestras asfálticas a la cámara de calefacción del horno y de esta manera se garantiza que no sufran peligro de quemadura, derrame de las muestras asfálticas y se consiga que el horno retorne a la temperatura de 163°C en menos de 10 minutos. Así mismo se concluye que el lazo de control y las constantes del controlador PI implementado, responden adecuadamente a los disturbios planteados.

## 5. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

En este capítulo se siguen los pasos establecidos para el desarrollo del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, los cuales se presentan en el Anexo E: Guía para el desarrollo del proceso del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, se especifican los elementos requeridos, las consideraciones previas y el procedimiento que se debe llevar a cabo.

Como primera medida, se establecen los materiales a utilizar en el desarrollo del ensayo, es necesario considerar la cantidad y los valores de los parámetros involucrados en el mismo, estos se presentan en la Tabla 5 - 1.

Tabla 5 - 1 Insumos utilizados para el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento

<b>Insumos utilizados para el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento</b>			
	<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>Entrada de proceso</b>	Asfalto en estado solido	2000	G
	Alimentación eléctrica	110	VAC
	Flujo de aire	4000	MI/min
<b>Producto en proceso</b>	Asfalto tipo 60-70 en estado sólido		
<b>Parámetros de proceso por operación</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
	Temperatura de acondicionamiento de la muestra	≤163	°C
	Tiempo de acondicionamiento de la muestra	30	Min
	Temperatura de operación para el precalentamiento del horno de envejecimiento	163	°C
	Tiempo de precalentamiento del horno de envejecimiento	16	H
	Temperatura de operación durante el proceso de envejecimiento del asfalto	163	°C
	Tamaño de la muestra de asfalto por cada beaker.	35	Gr
	Tiempo estimado para ingresar las muestras al horno	4	Min
	Tiempo estimado para que el horno alcance 163°C después de ingresar las muestras	5	Min

	Tiempo de desarrollo del ensayo de envejecimiento del asfalto	85	Min
--	---	----	-----

Una vez establecidos los insumos y materiales, se procede a verificar que efectivamente se cuenta con los elementos requeridos para la realización del ensayo. De acuerdo a lo que establece la guía planteada en el Anexo E: Guía para el desarrollo del proceso del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, antes de realizar el ensayo como tal, es necesario llevar a cabo algunos pasos que permitan verificar el estado de la materia prima y los elementos.

### 5.1 consideraciones previas

Las consideraciones previas que se llevaron a cabo fueron:

- Acondicionar la materia prima
  - Disponer de la materia prima.
  - Determinar cantidad de muestra asfáltica.
  - Verificar que la muestra se encuentre libre de agua.
  - Verter la muestra asfáltica en recipiente metálico.
  - Calentar la muestra a una temperatura no mayor a 163°C.
  - Verificar que la muestra asfáltica este en estado fluido.
  - Agitar manualmente la muestra.
  - Verificar que no se incorpore burbujas de aire a la muestra.

Todos los pasos sugeridos por la guía se llevaron a cabo exitosamente.

- Realizar las primeras pruebas de caracterización
  - Medir índice de pérdida de masa.
  - Medir índice de ductilidad.
  - Medir índice de penetración.
  - Medir índice de punto de ablandamiento.
  - Medir índice de viscosidad.

En cuanto la realización de las pruebas de caracterización, no se ejecutaron la totalidad de las sugeridas ya que cada una demandaba tiempo y recursos particulares que implicarían un desgaste innecesario para el personal tanto del laboratorio como del desarrollo del presente trabajo, por lo cual se decide elegir una de ellas (la prueba elegida es la de índice de pérdida de masa), que sirva como referencia para determinar el estado de envejecimiento de la muestra.

En este punto es necesario tomar los datos de peso del recipiente vacío y con muestra a fin de establecer el peso inicial de la muestra. En este caso son:

Valores de las primeras pruebas de caracterización:

$$W_{recipiente1} = 164,148 \text{ g}$$

$$.W_{reci\_muestra1} = 199,073 \text{ g}$$

$$W_{i1} = 34,925 \text{ g}$$

- Precaentar el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento
  - ☑ Establecer los parámetros de operación del horno.
  - ☑ Encender el horno de lámina asfáltica delgada por un periodo de 16 horas.
  - ☑ Verificar la temperatura de operación del horno

Todos los pasos sugeridos por la guía se llevaron a cabo exitosamente.

## 5.2 Procedimiento

En este punto se procede a desarrollar el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, para lo cual se debe

- ☑ Verter 35 +/- 0.5 gramos en cada recipiente. Esto se comprueba según lo demostrado en la Figura 5 - 1 donde se aprecia que se agrega la cantidad de asfalto indicada en el recipiente a utilizar para el ensayo de envejecimiento.

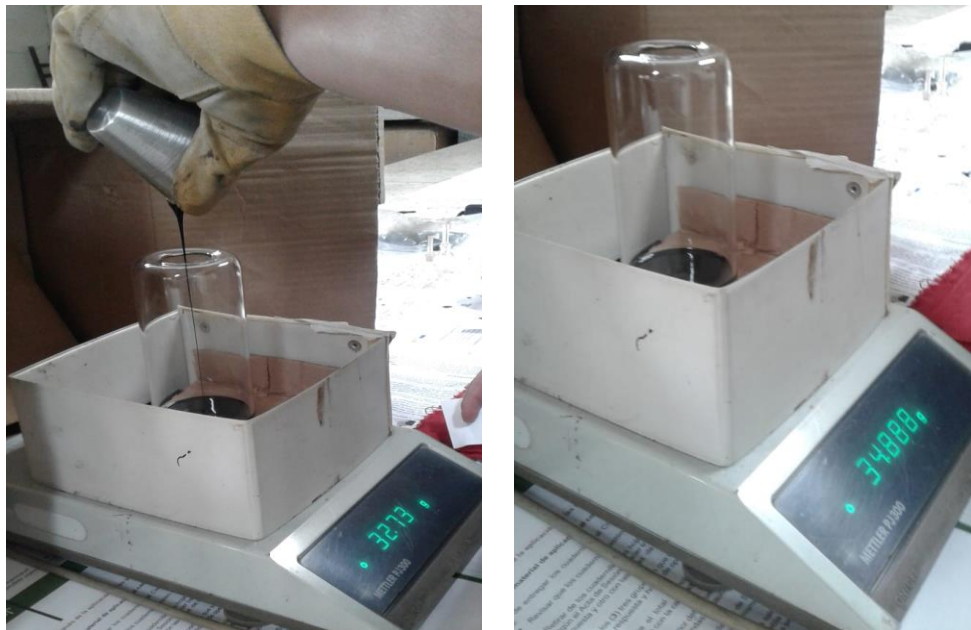


Figura 5 - 1 Verificación de peso de la muestra

- ☑ Disponer los recipientes en la plataforma en un tiempo mínimo de 2 minutos
- ☑ Verificar que la plataforma esté balanceada.
- ☑ Cerrar puerta del horno.



Figura 5 - 2 Horno de envejecimiento con la puerta cerrada y temperatura a 163 °C

- ☑ Verificar que la temperatura de control retorne en los primeros 10 minutos de recalentamiento.
- ☑ Hacer girar la plataforma a 15 rpm.
- ☑ Encender ventilador tipo jaula de ardilla.
- ☑ Iniciar flujo de aire a una tasa de asentamiento de 4000 ml/min
- ☑ Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido por un tiempo de 85 minutos. Esta parte del procedimiento puede verificarse con el anexo digital 1 que consiste en un video de la realización del ensayo.
- ☑ Controlar la temperatura dentro del horno a 163°C. Esto se verifica con la Figura 5 - 2, donde se aprecia que efectivamente el horno estaba funcionando a la temperatura especificada.
- ☑ Retirar los recipientes del horno.



Figura 5 - 3 Recipiente con muestra fuera del horno

- Dejar enfriar los recipientes para determinar pérdida de masa.
- Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo en un recipiente suficientemente grande.

Posteriormente se realizan las segundas pruebas de caracterización, y se toman los datos respectivos:

$$W_{recipiente2} = 164,148 \text{ g}$$

$$W_{reci\_muestra2} = 198,91 \text{ g}$$

$$W_{f2} = 34,762 \text{ g}$$

Ahora se calcula el peso final de la muestra ( $W_{final}$ ), considerando los valores inicial y final.

$$W_{final} = -0,163$$

Ya que el valor resultante es negativo, se concluye que la muestra perdió masa y se procede a calcular el porcentaje de pérdida (para ello se trabaja con el valor absoluto de  $W_{final}$ ).

$$\%W_{perdido} = 0,467 \%$$

Este valor se compara con lo establecido en el artículo 410 del instituto nacional de vías (especificaciones generales de construcción de carreteras), puntualmente la Tabla 410-1 Especificaciones del cemento asfáltico, donde se señala que el valor máximo para porcentaje de pérdida de masa por calentamiento es de 0.8, dado que se cumple esto es posible afirmar que la muestra experimentó cierto grado de envejecimiento.

Una vez establecido esto, se demuestra que fue posible realizar el ensayo y determinar si la muestra ha sufrido envejecimiento, para asegurar el correcto funcionamiento del sistema y de las mejoras propuestas y realizadas se repite el ensayo 10 veces, a fin de analizar el comportamiento del horno.

Los resultados obtenidos en la realización de los ensayos se presentan en la Tabla 5 - 2

Tabla 5 - 2 Resultados realización de ELADMO

Núm. ensayo	$W_{f1}$	$W_{f2}$	$W_{final}$	$\%W_{perdido}$
1	34,925	34,762	-0,163	0,467
2	35,063	34,958	-0,105	0,299
3	35,028	34,871	-0,157	0,448
4	35,023	34,932	-0,091	0,259

5	35,127	35,403	0,276	0,785
6	35,165	35,001	-0,164	0,466
7	35,345	35,267	-0,078	0,220
8	34,876	34,751	-0,125	0,358
9	34,786	34,612	-0,174	0,500
10	35,067	34,893	-0,174	0,496

Con los datos recolectados se procede a analizar el comportamiento de las muestras de asfalto elegidas, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, si el porcentaje de pérdida de masa por calentamiento es menor que 0.8 % se puede afirmar que el asfalto experimenta pérdida de masa y por ende cierto grado de envejecimiento. Como se observa en la Figura 5 - 4 para todos los experimentos realizados las muestras envejecieron en cierto grado.

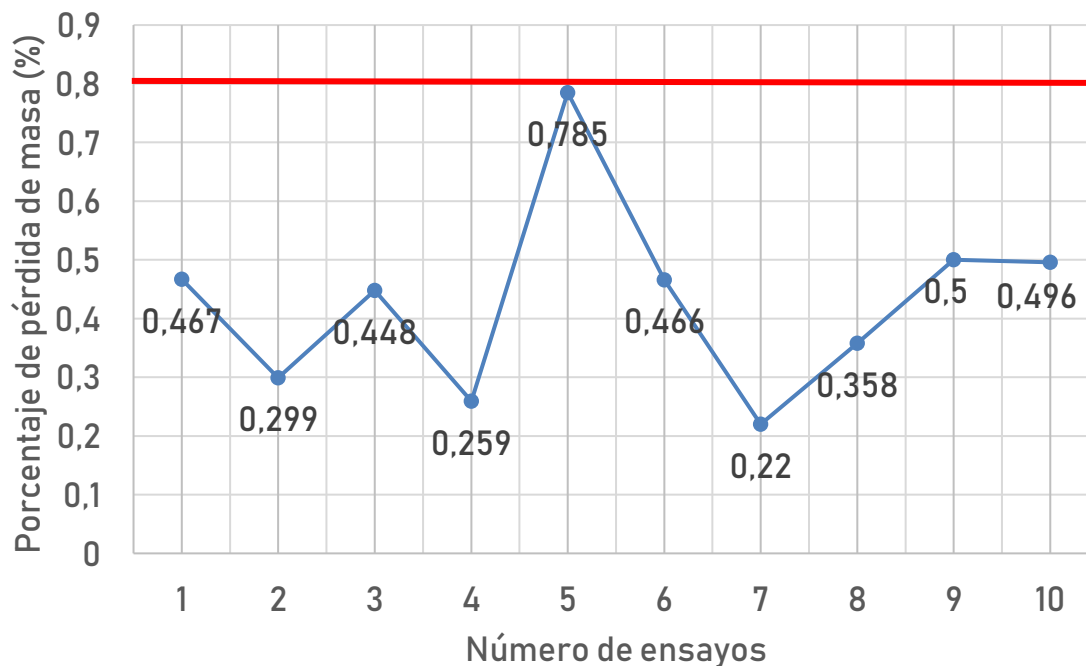


Figura 5 - 4 Resultados realización de ELADMO

Con lo anterior se demuestra que efectivamente las mejoras planteadas para todo el sistema funcionan correctamente y se logra el objetivo de Proponer un método basado en las normas I.N.V.E -720- 07 e ISA S88 para la realización del ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento, en el laboratorio de suelos de la FIC de la Universidad del Cauca



## **6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **6.1 Conclusiones**

- I. El desarrollo del presente trabajo de grado demostró integración y utilización de Normas Internacionales de Automatización (ISA S88.01 - ISA 95), Normas Colombianas INVE de INVIAS y la Norma ISO 9001:2015, como herramienta de diagnóstico aplicado al ensayo INVE 720-07 realizado en el laboratorio de suelos de la FIC de la Universidad del Cauca.
- II. El diagnóstico expuso que el ensayo INVE 720-07 se realizaba de forma teórica y no practica poniendo en desventaja educativa a los estudiantes de tres programas de pregrado y postgrado de la Universidad del Cauca: Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Geotecnología, debido a falencias generadas por la falta de documentación en el proceso, procedimiento y mantenimiento, además de fallas eléctricas y de control en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.
- III. Los requerimientos de automatización al aplicar los modelos ISA S88 al ensayo INVE 720-07 dieron como resultado la correcta selección de equipos de instrumentación y el rediseño del plano eléctrico del horno, necesarios para su correcto funcionamiento.
- IV. Se realizó por primera vez el ensayo INVE 720-07 guiado por personal del laboratorio de suelos de la FIC.
- V. Se hizo la entrega del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento en correcto funcionamiento, la documentación detallada del equipo, la guía documentada para su proceso, procedimiento, mantenimiento preventivo – correctivo al coordinador del laboratorio de suelos de la FIC, quedando firmado en un acta de entrega.
- VI. Se instruyó al personal encargado del ensayo INVE 720 -07, en cómo manejar el horno de lámina asfáltica en movimiento, su mantenimiento preventivo y qué hacer en caso de mantenimiento correctivo.

### **6.2 Trabajos futuros**

- I. Modernizar la toma recolección de datos para que se lleve a cabo de forma autónoma
- II. Propuesta de diseño para actualización de hornos del laboratorio de suelos de la FIC.
- III. Proponer y diseñar la realización del

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Departamento del Transporte de los Estados Unidos. Administración Federal de Carreteras e IPC, "CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES," 1994.
- [2] S. A. COMANORTE, "Historia del Asfalto." [Online]. Available: [http://www.comanorte.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=55:historia-del-asfalto&catid=25:asfaltos&Itemid=58](http://www.comanorte.com/index.php?option=com_content&view=article&id=55:historia-del-asfalto&catid=25:asfaltos&Itemid=58). [Accessed: 02-May-2018].
- [3] "El Asfalto." [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/351726765/El-Asfalto>. [Accessed: 02-May-2018].
- [4] Lami, *Industrial enciclopedia E.-O.* 1875.
- [5] "El Asfalto en Refinerías." [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/343564337/El-Asfalto-en-Refinerias>.
- [6] Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, "CEMENTO ASFALTICO," Bogotá, D.C., 11AD.
- [7] VÍCTOR ANDREE VALLETTE CERDA, "Optimización de una mezcla asfáltica drenante mediante adición de materiales de desecho como caucho y poliestireno expandido," Universidad Austral de Chile, 2009.
- [8] INVIAS, "Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos," in *normas y especificaciones invias*, 2012.
- [9] X. Vargas and F. Reyes, "El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos," *Ing. e Investig.*, vol. 30, no. 3, pp. 27–44, 2010.
- [10] AMERICAN NATIONAL STANDARD, "ANSI/ISA–88.01–1995." 1995.
- [11] A. Creus Solé, *Instrumentos Industriales, suajuste y calibracion*, 3rd ed. ALFAOMEGA, 2009.
- [12] J. J. Plazas Montaña, "Diseño y desarrollo de protocolos, según la NTC ISO IEC 17025 de 2005 para el uso de los equipos de campo y laboratorio de la facultad de ingeniería ambiental Santo Tomas sede Bogota," Santo Tomas de Aquino, 2015.
- [13] C. A. Sánchez, "Guía para la calibración de termopares." Instituto Nacional de Metrología.
- [14] R. Ordóñez Muñoz and B. D. Lara Guevara, "Propuesta de escalamiento industrial del proceso de extrusión de espumados biodegradables bajo el marco del proyecto 'Investigación y desarrollo de empaques biodegradables,'" Universidad del Cauca, 2017.
- [15] I. C. Ventura Nava, "Sistemas de control de motores eléctricos industriales." pp. 1–176, 2008.
- [16] Honeywell, "UDC 1000 and UDC 1500 MICRO-PRO SERIES." pp. 1–8, 1999.
- [17] R. K. C. ¡INSTRUMENT, "Instrumentacion manual REX-

- C100/C410/C700/C900.” pp. 1–8, 2004.
- [18] Omron Electronics SA, “GUIA RAPIDA DE RELÉS DE ESTADO SÓLIDO SSRs,” vol. 1, pp. 1–26, 2001.
  - [19] Fotek SSR, “Solid State Relay SSR-25DA.” p. 6, 2012.
  - [20] ICONTEC, “Norma Tecnica Colombiana NTC 2050.” p. 847, 1998.
  - [21] ASTM, “Standard Specification for ASTM Thermometers,” 2011.
  - [22] “Separador de agua con aire comprimido Reductor de presión para compresor, filtro de 1/4.” .
  - [23] J. Astigarraga Urquiza, *Hornos industriales de resistencias*. Mc Graw Hill Education, 1999.
  - [24] C. A. Smith and A. B. Corripio, *Control Automático de procesos*. México: Noriega Limusa, 1991.
  - [25] C. P. Lamb Bernal and J. D. Ortega Álvarez, *Simulación dinámica y control de procesos - Guía práctica*. Fondo editorial Universidad EAFIT, 2014.
  - [26] J. R. Vilorio, *Neumática hidráulica y electricidad aplicada*. 1993.
  - [27] H. I. Reyes Sierra and M. F. Montaña Ortega, “Modelamiento y control digital de temperatura para horno eléctrico,” Pontifica Universidad Haveriana, 2010.
  - [28] H. Aguirre Corrales and C. A. Orozco Hincapie, “Estudio dinámico de un horno de resistencias eléctricas convertido a gas,” *Sci. Tech.*, vol. 42, pp. 339–344, 2009.
  - [29] J. More Marchal, A. Lechuga Carreto, and L. D. Figuero Morales, “Medidor de temperatura - Aplicación con Arduino y MatLab.” Universidad de Cadiz.
  - [30] A. Behroozsarand and S. Shafiei, “Optimal control of distillation column using Non-Dominated Storing Genetic Algorithm-II,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, pp. 25–33, 2011.

## 8. ANEXOS

### 1. Anexo A: Norma I.N.V.E 720 – 07 .Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

#### 1. OBJETO

- 1.1 Este método se emplea para medir el efecto del calor y del aire, sobre una lámina delgada en movimiento, de materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este procedimiento se determinan a partir de la medición de ciertas propiedades del asfalto, antes y después del ensayo.
- 1.2 Los valores establecidos en unidades SI deben ser considerados como la norma.
- 1.3 Esta norma no involucra las debidas precauciones de seguridad que se deben tomar para la manipulación de materiales y equipos aquí descritos, ni establece pautas al respecto para el desarrollo de cada proceso en términos de riesgo y seguridad industrial. Es responsabilidad del usuario, establecer las normas apropiadas con el fin de minimizar los riesgos en la salud e integridad física, que se puedan generar debidos a la ejecución de la presente norma y determinar las limitaciones que regulen su uso.

#### 2. RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1 Se calienta la película de material asfáltico en movimiento en un horno a 163 °C (325 °F), durante 85 minutos. Los efectos del calor y del aire se determinan a partir de los cambios, en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno. Se proporciona un procedimiento opcional para determinar el cambio con base en el peso de la muestra.
- 2.2 La precisión de los valores obtenidos ha sido desarrollada para viscosidades a 60 °C (140 °F) y ductilidades a 15.6 °C (60 °F).

#### 3. USO Y SIGNIFICADO

Este método indica el cambio producido en las propiedades del asfalto durante el proceso convencional de mezclado en caliente, aproximadamente a una temperatura de 150 °C (302 °F), mediante medición de la viscosidad. Si se desea, se pueden efectuar también medidas de la penetración o de la ductilidad. Lo anterior produce un residuo que se aproxima a la condición del asfalto, cuando se incorpora en el pavimento. Si la temperatura de mezclado difiere apreciablemente de 150 °C (300 °F), se presentará sobre las propiedades un efecto mayor o menor.

#### 4. EQUIPO

- 4.1 **HORNO:** Deberá ser un horno de pared doble del tipo de convección. Sus dimensiones interiores deberán ser de 381 mm (15") de altura, 483 mm (19") de

ancho, y  $445 \pm 13$  mm ( $17 \frac{1}{2}'' \pm \frac{1}{2}''$ ) de profundidad (con la puerta cerrada). La puerta deberá tener una ventana simétricamente localizada con dimensiones de 305 a 330 mm (12" a 13") de ancho por una altura de 203 a 229 mm (8" a 9"). La ventana deberá tener dos hojas de vidrio resistentes al calor, separadas mediante un espacio con aire; deberá permitir una vista sin obstrucciones del interior del horno. El tope del elemento superior de calefacción debe hallarse a  $25 \pm 3$  mm ( $1 \pm \frac{1}{8}''$ ) por debajo del piso del horno.

El horno deberá estar ventilado en el fondo y en la pared superior. Los respiraderos del fondo deberán estar localizados simétricamente para suministrar aire que ingrese alrededor de los elementos de calentamiento y deberán disponer de un área abierta de  $15.0 \pm 0.7$  cm<sup>2</sup> ( $2.31 + 0.11$  pulg<sup>2</sup>). Los respiraderos deberán estar dispuestos simétricamente en la parte superior del horno y deberán tener un área de respiración de  $9.3 \pm 0.45$  cm<sup>2</sup> ( $1.45 \pm 0.07$  pulg<sup>2</sup>).

El horno deberá tener una cubierta completa de aire que incluya los muros laterales y el techo interior. El espacio de aire deberá ser de 38.1 mm ( $1 \frac{1}{2}''$ ) de profundidad a partir del techo y de los muros. En un punto intermedio a lo ancho del horno y a 152.4 mm (6") de profundidad, desde la cara de la plataforma circular metálica hasta su eje, un ventilador del tipo jaula de ardilla, de 133 mm ( $5 \frac{1}{4}''$ ) de diámetro externo por 73 mm ( $2 \frac{7}{8}''$ ) de ancho, deberá rotarse a 172.5 rpm, mediante un motor montado exteriormente. El ventilador jaula de ardilla, se deberá instalar de tal manera que las vueltas del mismo se produzcan en dirección opuesta a sus paletas. Las características del flujo de aire del sistema de ventilación, deben ser de succión desde el piso del horno a través de los muros completos y de la salida del aire. Las Figura A - 1 y Figura A - 2 muestran detalles de este sistema de aire pleno.

El horno deberá estar equipado con un control termostático adecuado, que pueda mantener la temperatura a 163° C (325° F) dentro de  $\pm 1.0^\circ$  C (1.8° F). El elemento sensor del termostato se deberá colocar a 25.4 mm (1") de la pared izquierda, y aproximadamente a 38.1 mm ( $1 \frac{1}{2}''$ ) del techo interior, de tal manera que el extremo del elemento sensor, esté aproximadamente a 203.2 mm (8") de la parte interna posterior del horno. El termómetro se deberá colgar o fijar a un montante en el techo, el cual está a 50.8 mm (2") desde el lado derecho del horno, en un punto medio de la profundidad de éste. El termómetro se deberá colgar en el horno, de tal manera que el bulbo del mismo, quede dentro de 25.4 mm (1") de una línea imaginaria a nivel con el eje de la plataforma metálica circular. Los controles para el calentamiento, deberán tener capacidad suficiente para llevar el horno completamente cargado, a la temperatura de ensayo dentro de un período máximo de 10 minutos, después de la inserción de las muestras en el horno previamente calentado.

El horno deberá estar provisto en su interior de una plataforma circular vertical, de 304.8 mm (12") de diámetro (Figura A - 2). Esta plataforma deberá tener

aberturas y ganchos adecuados, para sostener firmemente ocho recipientes de vidrio en posición horizontal (ver Figura A - 3

La plataforma vertical deberá ser mecánicamente guiada a través de un eje de 19 mm (3/4") de diámetro, a una velocidad de  $15 \pm 0.2$  rpm.

Un gel de solución activada de sílice, tratado con un indicador de aire, es un desecador satisfactorio para mantener el aire seco.

El horno deberá estar provisto con un dispositivo de chorro, localizado para soplar aire caliente dentro de cada botella, en su punto de recorrido más bajo. El dispositivo deberá tener un orificio de salida de 1.016 mm (0.04") de diámetro, conectado a un tubo de refrigeración de cobre, de 7.6 m (25") de largo y de 8 mm (5/16") de diámetro exterior.

Este tubo deberá estar roscado, para que permanezca sobre el fondo plano del horno y conduzca aire fresco, seco y libre de polvo.

- 4.2 Medidor de flujo** – Deberá ser de un tipo adecuado, con capacidad para medir exactamente el flujo de aire a una rata de 4000 ml/min, en la entrada y salida del tubo de cobre. El flujo de aire debe ser periódicamente calibrado usando un ensayo de medición de humedad u otro método, y se comprobara la conducción de aire en el horno apagada a la temperatura del laboratorio.
- 4.3 Termómetro** – Deberá ser un termómetro para medir pérdida de calor, que esté conforme con la exigencia de la ASTM E -1 para termómetros 13 C.
- 4.4 Recipiente** – El recipiente dentro del cual se vaya a ensayar la muestra, deberá ser de vidrio resistente al calor, de acuerdo con las dimensiones mostradas en la Figura 3.
- 4.5 Estante Enfriador** – Construido de lámina metálica de estaño, aluminio o acero, tal que permita colocar los recipientes contenedores de las muestras en posición horizontal para que se enfríen.

## 5. PREPARACIÓN DEL HORNO

- 5.1** Se coloca el orificio exterior de salida de aire, de manera que quede a 6.35 mm (1/4") de la abertura del recipiente de vidrio. El orificio se debe hallar localizado en tal forma, que el chorro de aire sople horizontalmente dentro del arco central, de la abertura del recipiente circular de vidrio.
- 5.2** Se coloca el termómetro, especificado en la Sección 4.3, de tal manera que el extremo del bulbo quede 25.4 mm (1") dentro de una línea de nivel imaginaria con el centro de la columna, que sostiene la plataforma en movimiento.
- 5.3** Se nivela el horno en tal forma, que los ejes horizontales de los recipientes de vidrio se hallen a nivel cuando estén en posición en la plataforma.
- 5.4** Se calienta previamente el horno, durante un mínimo de 16 horas antes del ensayo, con los controles en la posición que se emplearán durante la operación del mismo. El termómetro de control se debe ajustar de tal modo que cuando el horno se encuentre completamente cargado y con el aire dentro, retorne a  $163^\circ \pm 0.5^\circ$  C ( $325^\circ \pm 1.0^\circ$  F), dentro de un período de 10 min de recalentamiento.

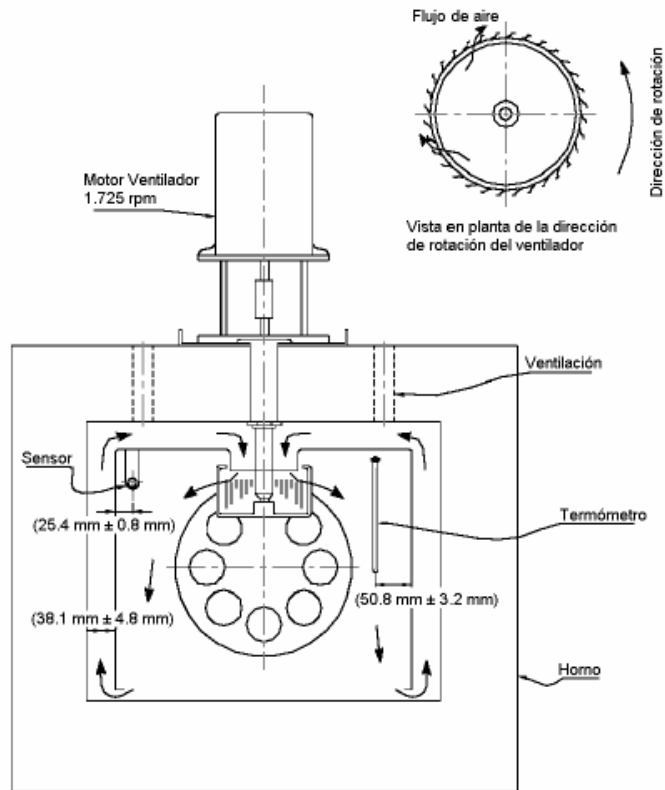


Figura A - 1 Esquema del flujo de aire. Vista frontal

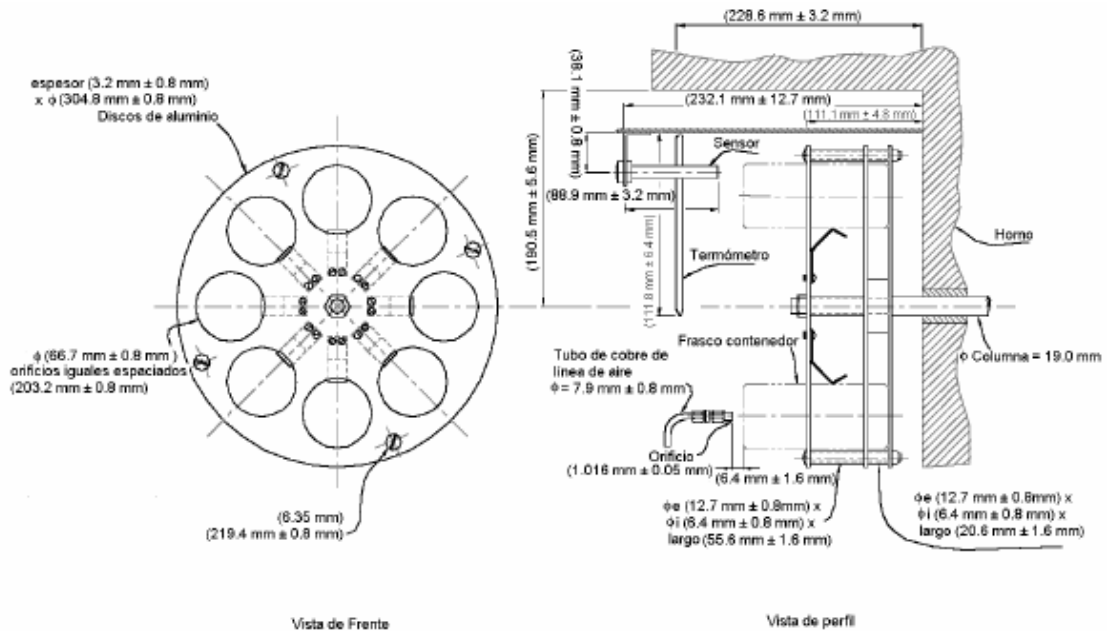


Figura A - 2 Plataforma metálica circular

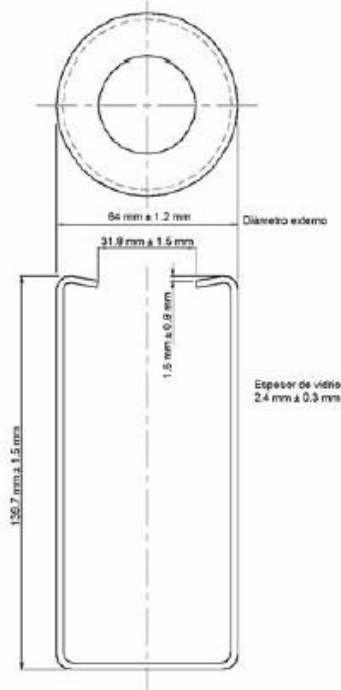


Figura A - 3 Botella para muestra

## 6. PROCEDIMIENTO

- 6.1** La muestra recibida se debe hallar libre de agua. Se calienta, dentro de su recipiente con la tapa apenas ajustada en un horno que no exceda de 163° C (325° F), durante el tiempo mínimo necesario para asegurar que la muestra esté completamente fluida. Se agita manualmente la muestra, pero se evita la incorporación de burbujas de aire.
- 6.2** Se vierten  $35 \pm 0.5$  g de la muestra dentro de cada uno de los recipientes de vidrio requeridos, proporcionando material suficiente para los ensayos de caracterización, que se deben efectuar sobre el residuo.
- Para ensayos de referencia, se requieren ocho recipientes de vidrio.
- 6.3** Cuando no se necesita la pérdida de peso, se deja enfriar el recipiente en el estante enfriador por un periodo de 60 a 180 minutos o, hasta aproximadamente la temperatura ambiente, antes de colocarlo en el horno de acuerdo con la Sección 6.4. Cuando se desee el valor en términos de pérdida, se emplean dos recipientes separados para la determinación. Se enfrían los recipientes y se pesan separadamente, cada uno con aproximación a 0.001 g.
- No se debe emplear el residuo de la determinación de pérdida de masa, para otros ensayos.
- 6.4** Con el horno a la temperatura de operación, se disponen los recipientes que contienen el asfalto en la plataforma, de manera que ésta quede balanceada.



Se llena cualquier espacio no ocupado en la plataforma, con recipientes vacíos. Se cierra la puerta y se hace girar el conjunto de la plataforma a una rata de  $15 \pm 0.2$  rpm. Se inicia el flujo de aire a una rata de asentamiento de  $4000 \pm 300$  ml/min. Se mantienen las muestras en el horno con el flujo de aire y la plataforma girando durante 85 minutos. La temperatura de ensayo de  $163^\circ \pm 0.5^\circ$  C ( $325^\circ \pm 1^\circ$  F), se debe alcanzar dentro de los primeros 10 minutos; si esto no se logra, se debe suspender la prueba. A la conclusión de la misma, se sacan los recipientes del horno. Si la pérdida de masa no está siendo determinada, se procede según la Sección 6.5

Se enfrían los recipientes en los cuales se está determinando la pérdida de masa, hasta la temperatura ambiente, en un desecador. Se determina su masa, luego, con aproximación a 0.001 g y se calcula la pérdida, con base en el asfalto en el recipiente, y se desecha el residuo.

- 6.5** Se vierte inmediatamente todo el residuo de cada recipiente sin rasparlo, dentro de un recipiente suficientemente grande, de manera que cuando se haya recogido todo el residuo, no se halle lleno en más del 75%. No se deben dejar enfriar los recipientes, ni se deberán volver a calentar las botellas para obtener más residuo. Se procede como se describe en la Sección 6.6.
- 6.6** Los ensayos sobre el residuo, se deben efectuar dentro de las 72 horas después de haber efectuado en el horno el ciclo rotativo de la lámina delgada.

## **7. INFORME**

- 7.1** Se informan los resultados de los ensayos, en términos de los cambios físicos en el asfalto. Estos valores se deben obtener efectuando los ensayos apropiados según las normas INV, antes y después de haber sometido la lámina al ciclo de movimiento dentro del horno.
- 7.2** Se reporta el cambio de masa como el promedio de dos recipientes, expresado como porcentaje respecto de la masa inicial, con aproximación a 0.001%. La pérdida de masa puede ser reportada como un número negativo. La ganancia de masa puede ser reportada como un número positivo.

## **8. PRECISIÓN Y TOLERANCIAS**

- 8.1** El criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados de viscosidad a una temperatura de  $60^\circ$  C ( $140^\circ$  F) y de ductilidad a  $15.6^\circ$  C ( $60^\circ$  F), en el residuo después del ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, están dados en la Tabla 1.
  - 8.1.1** Los valores dados en la segunda columna de la Tabla 1, corresponden a la desviación estándar (normal) que ha sido encontrada apropiadamente para los materiales y condiciones de ensayo descritos en la primera columna.

- 8.1.2 Los valores dados en la tercera columna, son los límites que no se deben exceder para la diferencia de resultados entre dos ensayos.
  - 8.1.3 Los valores dados en la cuarta columna, corresponden a los coeficientes de variación estándar (normal) que han sido encontrados apropiados para los materiales y condiciones de ensayo descritos en la primera columna.
  - 8.1.4 Los valores dados en la quinta columna, son los límites que no se deben exceder para la diferencia entre los resultados de dos propiedades de ensayo, expresados en porcentaje de la media.
- 8.2 La precisión para la determinación de los valores de pérdida de masa, aún no ha sido establecida.

Tabla A - 1 Métodos de ensayo

Métodos de ensayo	Desviación estándar (1S)	Rango Aceptable de 2 Resultados (D2S)	Coefficiente de Variación (1S%)	Rango Aceptable de 2 Resultados (D2S%)
<b>Precisión de un solo operador</b>				
Viscosidad a 60°C (140°F)	---	---	2.3	6.5
Ductilidad a 15.6°C (60°F)*	3 cm	9 cm	---	---
<b>Precisión multilaboratorios</b>				
Viscosidad a 60°C (140°F)	---	---	4.2	11.9
Ductilidad a 15.6°C (60°F)	6 cm	16 cm	---	---

\* Se basan en el análisis de información de resultados de ensayo de 16 laboratorios en 2 tipos de asfaltos en un rango de 13 a 30 cm.

## 9. NORMAS DE REFERENCIA

- ASTM D 2872 – 97
- AASHTO T 240 – 03

## 2. Anexo B: Evolución del estudio del fenómeno del envejecimiento de los asfaltos

En este apartado, se presenta la Tabla B - 1 en forma de resumen respecto a la evolución del estudio del fenómeno del envejecimiento de los asfaltos, indicando los diferentes métodos de envejecimiento y métodos de evaluación utilizados por cada investigador.

Tabla B - 1 Pruebas de envejecimiento de asfaltos y métodos de evaluación

Fecha	Investigador(es)	Método de envejecimiento	Método de evaluación
1903	Dow	Mezcla asfáltica envejecida durante 18 y 24 h a 163 °C, 30 min a 149 °C	Cambio en el peso y la penetración del residuo recuperado del asfalto.
1937	Nicholson	Asfalto soplado con aire durante 15 min a 229 °C	Cambio en la penetración y ductilidad
	Raschig y Duyle	Asfalto soplado con aire durante 15 min a 204°C	Cambio en la penetración
	Hubbard y Gollomb	Envejecimiento de mezcla asfáltica de Ottawa con variación de tiempo y temperatura	Cambio en la penetración del asfalto recuperado
1939	Lang y Thomas	Envejecimiento en horno de mezcla asfáltica Ottawa y exposición al aire libre.	Cambio en las propiedades de la mezcla y abrasión.
1940	Shattuck	Envejecimiento de mezcla durante 30 min a 163 ° C	Penetración, ductilidad y punto de ablandamiento del asfalto recuperado
	Lewis y Welborn	Envejecimiento acelerado en película fina, TFOT durante 5h a 163 ° C	Cambio en el peso, penetración y ductilidad
1946	Lewis y Halstead	Envejecimiento acelerado en película fina. TFOT durante 50 min a 163°C	Cambio en el peso, penetración y ductilidad
1952	Pauls y Welborn	Mezcla asfáltica de Ottawa envejecida en TFOT a 163°C	Fuerza de comprensión del asfalto recuperado y residuo TFOT
1955	Griffin, Miles y Penther	Prueba de envejecimiento de película de asfalto de 0,0002 in durante 2h a 107°C	Viscosidad antes y después del envejecimiento, índice de envejecimiento
1957	Vallerga, Monismith y Granthem	Ultravioleta e infrarrojo	Penetración, punto de ablandamiento, ductilidad

	Brown, Sparksy Smith	Enfriamiento rápido de muestra de asfalto	Prueba de tensión en muestras de asfalto.
1958	Heithaus y Johnson	Envejecimiento en carretera y pruebas en laboratorio. envejecimiento de micropelículas	Índice de envejecimiento de micropelículas de asfalto recuperado
1961	Traxler	Prueba TFOT y micropelículas de 0,0006 in durante 2h a 107°C	Comparación de viscosidad a 25°C
	Halstead y Zenewitz	Prueba TFOT y micropelículas de 0,0006 in durante 2h a 107°C	Comparación de viscosidad a 25°C a velocidad de corte constante de 0,05 s <sup>-1</sup>
1963	HveemZube y Skog	Prueba de micropelícula modificada de 0,0008 in durante 24 h a 99°C- prueba RTFOT y TOFT durante 50 min a 163°C	Viscosidad a 25°C antes y después del envejecimiento y comparación de viscosidades de RTFOT, TFOT de asfalto recuperado
1968	Lee	Prueba TFOT a 163°C en asfaltos y mezclas asfálticas	Viscosidad a 25°C, tiempo de endurecimiento 30 megapoises. Índice de corte. contenido de asfáltenos
1969	Schmith y Santucci	Prueba de micropelícula giratoria de 0,0008 in a 99°C	Viscosidad de residuo de asfalto
1973	Lee	Prueba TFOT a 65,56 °C y 20atm en asfaltos y mezclas asfálticas. Materiales envejecidos recuperados de campo	Viscosidad de residuo de asfalto
1976	Benson	Prueba TFOT, luz actínica, mezclas envejecidas en campo	Viscosidad a 77°F penetración a 77°F
	Plancher, Green y Petersen	Prueba RTFOT columna de oxidación. Mezcla envejecida durante 5h a 150°C. asfaltos y mezclas tratadas con y sin cal	Viscosidad a 77°F determinación de asfáltenos análisis químico modulo elástico
1977	Kemp y Predoehl	Permeación por aire a 60°C con una cabeza de 0,02 in de agua durante 10 días	Pruebas de fluencia a 70°F tolerancia de 3°C durante 5 min, la curva de fluencia es usada para indicar el progreso de oxidación, el intercepto a x días de la pendiente inicial

			se considera como índice de durabilidad
1981	Kemp y Predoehl	Luz atinica, prueba de micropelícula rotatoria. Envejecimiento de mezclas asfálticas. Mezclas recuperadas de campo	Penetración a 77°F ductilidad a 77°C modulo elástico 1981microviscosidad a 77°F viscosidad capilar a 140 °F
	Santucci, Goodrich y Sundberg	Prueba de durabilidad a 235°F durante 168h y 115°C durante 100h	Viscosidad a 6°C y 135°C penetración a 4°C y 25°C Ductilidad a 25°C
1983	Mc Hattie	Prueba de RTFOT durante 100h a 115°C	Penetración a 77°F viscosidad cinemática a 275°F Modulo elástico. EAL (eje equivalente de carga)
1985	Edler et al.	Envejecimiento de película de asfalto de 100 micras en weatheometer. Prueba RTFOT durante 8 h. presión de oxidación de 300psi durante 96h a 149°F. Prueba TFOT modificada-película de asfalto de 100 micras durante 24 h	Viscosidad a 113°F micro viscosímetro de plato, velocidades de corte de 0,05s <sup>-1</sup> Nivel de oxidación, espectro infrarrojo constituyentes de peso molecular alto
	Hugo y Kennedy	Horno de envejecimiento por endurecimiento de mezclas a 100°C. Exposición de mezclas con ultravioleta durante 54h y 14 días	Viscosidad a 77°F compresión de vigas de mezcla.
1986	Kim et al.	Presión de oxidación a 140°F y 100 psi, de 0 a 5 días. Recuperación de materiales envejecidos en campo	Viscosidad capilar a 140°F y 275°F. pruebas de penetración y fraas Modulo elástico y fatiga. Análisis de Corbett-Swerbrick
1988	Tia et al.	Envejecimiento en horno convectivo a 140°F durante (1,7,28 y 90 días) Envejecimiento forzado en horno a 140°F.durante (1,7,28 y 90 días.)	Modulo elástico resistencia a la tracción directa. Propiedades de asfaltos recuperados como: Viscosidad a 140°F. penetración a 77°F Reómetro Schweyer a 77°F y 59°F.



		Envejecimiento con ultravioleta a 140°F durante (1,7, 28 y 90 días) Envejecimiento bajo condiciones naturales durante 1, 2 y 3 años	Análisis infrarrojo Análisis de Corbett- Swarbrick
	Von Quintas et al.	Envejecimiento en horno durante corto tiempo a 135°C durante (8,16,24,36) horas. Oxidación bajo presión durante tiempos largos a 60°C y 100 psi. Envejecimiento en horno durante 2 días a 57, 22°C después de 5 días a 107°C	Módulo de elasticidad prueba de fluencia bajo tensión indirecta (indirectensilestraincreep)
1989	Petersen	Prueba de envejecimiento en película fina (TFOT)	Pérdida de peso debida a la volatilización. Contenido de cetonas. Viscosidad.
2003 – 2005	Airey et al. Navarro et al Ruan et al	Prueba de envejecimiento de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT).	Análisis de oxidación de asfaltos puros y modificados
2007 – 2008	X. A. Vargas X. A. Vargas et al.	Envejecimiento de asfaltos bajo agitación continua en un reorreactor.	Análisis del cambio de la viscosidad del asfalto a medida que se iba envejeciendo bajo condiciones controladas.



Fuente: [9]

### 3. Anexo C: Diagnostico visual del horno de lámina asfáltica delgada con base a la norma INVE 720 -07

En este apartado, se presenta en un cuadro comparativo los resultados obtenidos de la respectiva inspección visual del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento respecto con los parámetros establecido en la norma INVE 720 -07, acompañando cada resultado con una imagen como evidencia.



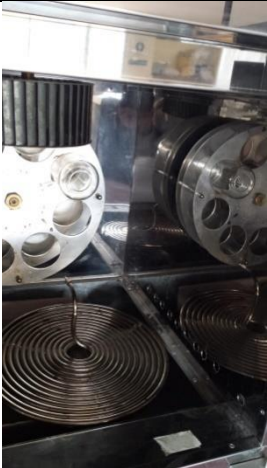

Tabla C - 1 Comparación física de la condición actual del horno con las condiciones establecidas por la norma INVE 720 -07


Información establecida por INVIAS	Información tomada del equipo	Imagen de evidencias
<p><b>Dimensiones interiores:</b>            Altura: 381mm            Ancho: 483mm            Profundidad: 445mm +/- 13mm (puerta cerrada)</p>	<p>Altura: 38mm            Ancho: 483mm            Profundidad: 450mm</p>	
<p><b>Puerta con ventana simétrica</b>            Dimensiones:            Ancho: 305mm a 330mm            Altura: 203mm a 229mm.            - Ventana con dos hojas de vidrio resistentes al calor, separadas por un espacio de aire.            - Ventana que permita la vista del interior del horno.</p>	<p>Ancho: 320mm.            Altura: 220mm.            - La ventada si presenta las dos hojas de vidrio.            - La ventana si permite la vista interna del horno</p>	

<p><b>Resistencias eléctricas</b>  Deben hallarse a 25 +/- 3mm por debajo del piso del horno.</p>	<p>Resistencias a 25mm por debajo del piso del horno</p>	
<p><b>Respiraderos del horno</b>  Horno debe estar ventilado en el fondo y en la pared superior.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los respiraderos del fondo deben estar localizados simétricamente, y debe disponer de un área abierta de 15 cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Los respiraderos de la parte superior deben estar dispuestos simétricamente y debe tener un área de respiración de 9.3 cm<sup>2</sup>.</li> </ul>	<p>El horno si esta ventilado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si cuentan con respiraderos simétricos en el fondo.</li> <li>- Si cuenta con respiradores simétricos en la parte superior.</li> </ul>	



<p><b>Ventilador tipo jaula</b> ubicado en el punto intermedio a lo ancho del horno y a 152.4 mm de profundidad, desde la cara de la plataforma circular metálica hasta su eje.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensiones:</li> <li>- Diámetro externo: 133mm.</li> <li>- Ancho: 73mm.</li> <li>- Velocidad: 172.5 RPM.</li> </ul>	<p>Ventilador tipo jaula ubicado a 240 mm a lo ancho del horno desde la pared lateral y a 155 mm de profundidad desde la cara de la plataforma circular metálica hasta su eje.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diámetro externo: 145mm.</li> <li>- Ancho: 63 mm</li> </ul>	
<p><b>Elemento sensor termostato</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ubicación: 25.4mm de la Pared izquierda.</li> <li>- 380.1mm del techo interior.</li> <li>- 203.2mm de la parte interna posterior del horno.</li> </ul>	<p>Si cumple con las especificaciones</p>	

<p><b>Termómetro</b></p> <p>Ubicación: Colgado sobre un soporte desde el techo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 50.8 mm de la pared derecha del horno.</li> <li>- Bulbo del termómetro a 25.4mm a nivel con el eje de la plataforma metálica circular.</li> </ul>	<p>No presenta termómetro.</p>	
<p><b>Plataforma circular vertical</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensiones:</li> <li>- Diámetro: 304.8 mm.</li> </ul> <p>Tiene 8 aberturas para sostener los recipientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Guiada mecánicamente por un eje de 19mm de diámetro, a una velocidad de 15 RPM.</li> </ul>	<p>Diámetro: 305 mm.</p> <p>Si presenta las 8 aberturas para sostener los recipientes.</p>	
<p><b>Serpentín</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Orificio de salida: 1.016mm de diámetro.</li> <li>- Tubo refrigerado de cobre de 7.6m de largo y de 8 mm de diámetro exterior.</li> <li>- Tubo debe estar roscado, para que permanezca sobre el fondo plano del horno.</li> </ul>	<p>Serpentín ubicado en el fondo plano del horno, se encuentra roscado, material cobre y de longitud de 7.5 m.</p>	
<p><b>Medidor de flujo</b></p> <p>Capacidad de medición: 4000 ml/min</p>	<p>Capacidad: 600 L / h</p>	

<p><b>Recipiente</b></p> <p>Material: vidrio resistente al calor.</p>	<p>Si se cuenta con la disponibilidad de los 8 recipientes de vidrio.</p>	
<p><b>Estante enfriador:</b> cuyo material puede ser de metálica de estaño, aluminio o acero, debe permitir colocar los recipientes contenedores de las muestras en posición horizontal para q se enfríen.</p>		
<p><b>Termómetro:</b> Para medir pérdida de calor, conforme a la exigencia de la ASTM E -1 para termómetros 13C.</p>		

#### 4. Anexo D: Cuestionario de encuesta del laboratorio de suelos

El siguiente es el cuestionario presentado a los participantes en el cual se busca evaluar acciones.

##### Entrevista

Entidad: Universidad del Cauca

Fecha: Marzo 2018

Ciudad: Popayán

Hora: \_\_\_\_\_

Número de entrevista: \_\_\_\_\_

Nombre encuestador: Ingrid Johana Hurtado – Juan Pablo Santiago

##### Datos del encuestado

Nombre del encuestado:	
Edad:	
Nivel de estudios:	a. Estudiante de universidad. b. Técnico – tecnólogo. c. Profesional. d. Postgrado.
Título:	
Ocupación:	

##### A. Preguntas de apertura

¿Ha realizado alguna vez el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento acorde a la norma INVE 720 – 07? SI ( ) NO ( )

¿Conoce usted como realizar el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento según la norma I.N.V.E 720 -07? SI ( ) NO ( )

¿Cree usted que la realización del ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento INVE 720 – 07 es importante para los intereses del laboratorio? SI ( ) NO ( )

¿Porque? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

---

¿Quiénes son los clientes de interés para realizar el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento INVE 720 – 07 en el laboratorio de suelos de la FIC?

---

---

---

---

---

---

¿Tiene conocimiento de los equipos necesarios que se deben usar para la realización del ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento INVE 720 – 07? SI ( ) NO ( )

---

¿De acuerdo al equipamiento con el que se cuenta en el laboratorio de suelos de la FIC, hace falta algún equipo para poder realizar de forma correcta el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento INVE 720 – 07? SI ( ) NO ( )

---

**¿Cuál o cuáles?**

---

¿Tiene conocimiento de las características de los equipos que tiene el laboratorio para realizar el ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento INVE 720 – 07? (tiempo máximo de trabajo, frecuencia de mantenimiento, velocidad, hoja de vida del equipo etc.) SI ( ) NO ( )

---

¿Considera usted que con la información descrita en la norma I.N.V.E 720 – 07 es suficiente para llevar a cabo la realización del ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento? SI ( ) NO ( )

---

**¿Por qué?**

---

---

---

---

¿Existe una documentación tipo guía estructurada en el laboratorio de suelos para la realización del ensayo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento según la norma INVE 720-07? SI ( ) NO ( )

¿Qué considera usted que debería contener el documento guía?

---

---

---

---

¿Tiene conocimiento si se realizan revisiones periódicas del estado de los equipos utilizados en el laboratorio de suelos de la FIC? SI ( ) NO ( )

¿Con que frecuencia se realizan?

---

---

---

¿Revisa los elementos mecánicos antes y después de utilizar los equipos del laboratorio de suelos de la FIC? SI ( ) NO ( )

¿Revisa las conexiones eléctricas antes y después de utilizar los equipos del laboratorio de suelos de la FIC? SI ( ) NO ( )

¿Ha recibido alguna capacitación para la correcta utilización de los equipos del laboratorio de suelos de la FIC? SI ( ) NO ( )

¿Tiene conocimiento sobre el mantenimiento que se debe hacer antes y después de utilizar los equipos del laboratorio? SI ( ) NO ( )

¿Tiene conocimiento de algún equipo en particular del laboratorio que no funcione correctamente o que no cumpla con sus especificaciones?

SI ( ) NO ( )

¿Cuál?

¿Qué tan frecuentes son los daños o reparaciones en los equipos del laboratorio de suelos de la FIC?

---

---

---

---

---

---

1. ¿De qué tipo son los daños más frecuentes que se presentan en los equipos del laboratorio?

• \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2. Desea agregar algún comentario sobre el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, sobre los equipos que se utilizan en la realización del ensayo o sobre el mantenimiento y precauciones que tiene o debería tener el laboratorio de suelos de la FIC para la realización óptima de todos los ensayos?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 5. Anexo E: Guía para el desarrollo del proceso del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento

Esta guía presenta los pasos a seguir para el desarrollo del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento se especifican elementos requeridos, las consideraciones previas y el procedimiento que se debe llevar a cabo.

Para el desarrollo del ensayo es necesario considerar la cantidad de materiales y los valores de los parámetros involucrados en el mismo, estos se presentan en la Tabla 1, han sido tomados de la norma INVE 720-07.

Tabla E - 1 Parámetros para ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento

<b>PROCESO DEL ENSAYO DE LAMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO</b>			
<b>Entrada de proceso</b>	<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
	Asfalto en estado solido	400	G
	Alimentación eléctrica	110	VAC
	Flujo de aire	4000	MI/min
<b>Producto en proceso</b>	Asfalto en estado fluido		
<b>Parámetros de proceso por operación</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
	Temperatura de acondicionamiento de la muestra	≤163	°C
	Tiempo de acondicionamiento de la muestra	Mínimo requerido	H
	Temperatura de operación para el precalentamiento del horno de envejecimiento	163	°C
	Tiempo de precalentamiento del horno de envejecimiento	16	Hr
	Temperatura de operación durante el proceso de envejecimiento del asfalto	163	°C
	Tamaño de la muestra de asfalto por cada beaker.	35	Gr
	Tiempo estimado para ingresar las muestras al horno	2	Min
	Tiempo estimado para que el horno alcance 163°C después de ingresar las muestras	10	Min
	Tiempo de desarrollo del ensayo de envejecimiento del asfalto	85	Min



## Elementos requeridos

- Horno de calentamiento
- Balanza de alta precisión
- Agitador
- Horno de lámina asfáltica delgada movimiento
- Compresor
- Equipos para determinar viscosidad
- Equipos para determinar ductilidad
- Equipos para determinar punto de ablandamiento
- Equipos para determinar penetración
- Equipo para determinar pérdida de masa

## Consideraciones previas

Antes de realizar el ensayo como tal, es necesario llevar a cabo algunos pasos que permitan verificar el estado de la materia prima y los elementos.

- Acondicionar la materia prima
  - Disponer de la materia prima.
  - Determinar cantidad de muestra asfáltica.
  - Verificar que la muestra se encuentre libre de agua.
  - Verter la muestra asfáltica en recipiente metálico.
  - Calentar la muestra a una temperatura no mayor a 163°C.
  - Verificar que la muestra asfáltica este en estado fluido.
  - Agitar manualmente la muestra.
  - Verificar que no se incorpore burbujas de aire a la muestra.
- Realizar las primeras pruebas de caracterización
  - Medir índice de pérdida de masa.
  - Medir índice de ductilidad.
  - Medir índice de penetración.
  - Medir índice de punto de ablandamiento.
  - Medir índice de viscosidad.
- Precalentar el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento
  - Establecer los parámetros de operación del horno.
  - Encender el horno de lámina asfáltica delgada por un periodo de 16 horas.
  - Verificar la temperatura de operación del horno

## Procedimiento

En este punto se procede a desarrollar el ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento, para lo cual se debe

- Verter 35 +/- 0.5 gramos en cada recipiente.
- Disponer los recipientes en la plataforma en un tiempo mínimo de 2 minutos
- Verificar que la plataforma esté balanceada.
- Cerrar puerta del horno.
- Verificar que la temperatura de control retorne en los primeros 10 minutos de recalentamiento.
- Hacer girar la plataforma a 15 rpm.
- Encender ventilador tipo jaula de ardilla.
- Iniciar flujo de aire a una rata de asentamiento de 4000 ml/min
- Flujo de aire, plataforma girando y ventilador encendido por un tiempo de 85 minutos.
- Controlar la temperatura dentro del horno a 163°C.
- Retirar los recipientes del horno.
- Dejar enfriar los recipientes para determinar pérdida de masa.
- Verter el residuo de cada recipiente sin rasparlo en un recipiente suficientemente grande.

Posteriormente se realizan las segundas pruebas de caracterización, para las cuales es necesario:

- Medir índice de pérdida de masa.
- Medir índice de ductilidad.
- Medir índice de penetración.
- Medir índice de punto de ablandamiento.
- Medir índice de viscosidad.

Una vez se llevan a cabo los procesos, se toman los valores de índice de pérdida de masa de las primeras pruebas de caracterización y se compara con los valores obtenidos en la segunda prueba de caracterización, utilizando el siguiente método.

1. Teniendo en cuenta las primeras pruebas de caracterización:

$W_{recipiente1}$  → Peso del recipiente solo en la primera prueba.  
 $W_{reci\_muestra1}$  → Peso del recipiente con la muestra en la primera prueba.  
 $W_{i1}$  → Peso inicial de la muestra en la primera prueba.

$$W_{i1} = W_{reci\_muestra1} - W_{recipiente1}$$

2. Teniendo en cuenta las segundas pruebas de caracterización:

$W_{recipiente2}$  → Peso del recipiente solo en la segunda prueba.  
 $W_{reci\_muestra2}$  → Peso del recipiente con la muestra en la segunda prueba.  
 $W_{f2}$  → Peso final de la muestra en la segunda prueba.

$$W_{f2} = W_{reci\_muestra2} - W_{recipiente2}$$

3. Ahora se calcula el peso final de la muestra ( $W_{final}$ ), considerando los valores inicial y final.

$$W_{final} = W_{f2} - W_{i1}$$

Si el valor resultante es negativo, se concluye que la muestra perdió masa y se procede a calcular el porcentaje de pérdida (para ello se trabaja con el valor absoluto de  $W_{final}$ ).

4. Para calcular el porcentaje de pérdida de masa:

$$\%W_{perdido} = \frac{|W_{final}| * 100}{W_{i1}}$$


Este valor se compara con lo establecido en el artículo 410 del instituto nacional de vías (especificaciones generales de construcción de carreteras), se presenta como Tabla E - 2 Especificaciones del cemento asfáltico (donde se señala que el valor máximo para porcentaje de pérdida de masa por calentamiento es de 0.8, si se cumple esto es posible afirmar que la muestra experimentó cierto grado de envejecimiento).

Tabla E - 2 Especificaciones del cemento asfáltico  
Tomado de [8]

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 5 cm/min), cm	E-702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3
<b>Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E-720</b>							
Pérdida de masa por calentamiento, %	E-720	-	0.8	-	0.8	-	1.0
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60° C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717	-	4	-	4	-	4

## 6. Anexo F: Acta de entrega de buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento

En este apartado, se muestra el acta de entrega que se realizó con el fin de dejar constancia del buen funcionamiento del equipo del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**  
**LABORATORIO DE SUELOS FIC**


ACTA DE FUNCIONAMIENTO

Popayán

Cordial saludo

A quien le interese

Por medio de la presente, los estudiantes INGRID JOHANA HURTADO Y JUAN PABLO SANTIAGO PAJAJÓY y el director de tesis INGENIERO JUAN FERNANDO FLOREZ MARULANDA vinculados al trabajo de grado “Aplicación de estándares al ensayo de caracterización de lámina asfáltica delgada en movimiento del laboratorio de suelos de la universidad del cauca” del programa de Ingeniería Automática Industrial de la FIET de la universidad del cauca junto con el personal encargado del laboratorio de suelos de FIC, hacen constar, la entrega en buen funcionamiento del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento que se encuentra ubicado en el laboratorio de suelos de FIC de la universidad del cauca, al cual se le realizaron mejoras descritas en el trabajo de grado en mención.

Para constancia se firma en el Municipio de \_\_\_\_\_, a los \_\_\_\_\_ días de \_\_\_\_\_ del 2018

Las mejoras hechas en el horno son enunciadas a continuación:


FECHA REVISIÓN:			
PARTICIPANTES			
CITADOS	CARGO	CÉDULA	FIRMA

MEJORA EN EL PROCESO Y OBSERVACION			
TEMAS	DECISIONES	Si	No
CONTROLADOR DE TEMPERATURA REX C100	SE REMPLAZO CONTRALDOR DE TEMPERATURA HONEYWELL POR UN CONTROLADR PID REX Y SE VERIFICO QUE REGULARA LA TEMPERATURA EN 163°C		
MOTOR MONOFASICO SIEMENS ARM 56	SE REMPLAZO EL MOTOR DAÑADO INSTALADO EN EL HORNO INICIALMENTE POR EL MOTOR MONOFASICO SIEMENS QUE GENERA 127, 5 RPM EN EL PROCESO.		
SSR 40D MARCA FOTEX	SE REMPLAZO CONTACTOR ELECTROMECHANICO POR SSR DEBIDO A QUE ESTE ES MAS ADECUADO PARA VARIAR LA CORRIENTE EN LAS RESISTENCIAS TERMICAS		
RESISTENCIAS TERMICAS	SE REALIZO MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEBIDO A SU CORROSION QUE NO PERMITIA UN ADECUADO FUNCIONAMIENTO		
CABLEADO ADECUADO	SE REALIZO UN CABLEADO PROFESIONAL EN TODA LA INSTALACION ELECTRICA DEL HORNO , TENIENDO EN CUENTA LA CORRIENTE EN CADA COMPONENTE		
CONTACTOR Y RELE TERMICO	SE INSTALARON DOS CONTACTORES Y PROTECCION TERMICA EN LOS MOTORES DEL HORNO COMO ES DEBIDO		
TERMOCUPLA TIPO K	SE REMPLAZO TERMOCUPLA PT100 POR TERMOCUPLA TIPO K MAS SENCIBLE ES DECIR MAS ADECUADA AL PROCESO		
MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO	SE LIMPIO EL HORNO ,TABLERO DE CONTROL Y RESPIRADERO, SE ENGRASO LAS PARTES MOVILES COMO : RODAMIENTOS ,EJES Y RESPIDARES Y SE REEMPLAZARON LOS DISPOSITIVOS ELECRCICOS Y ELECTRONICOS MENCIONADOS ANTERIORMENTE.		
<p>OBSERVACIONES. SE RECOMIENDA QUE EL LABORATORIO DE SUELOS Y ASFALTOS DE LA FIC. IMPLEMENTEN LOS PROCEDIENTOS PROPUESTOS EN LA DOCUMENTACION REALIZADA Y SE ESTABLESCA UN MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA CONSERVACION DE LOS EQUIPOS DE LABORATORIO Y A SU VEZ ESTE SIRVA DE REFERENCIA PARA EL MANTENIMIENTO Y CUIDADO DE LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO.</p>			

Universidad  
del Cauca

7. Anexo G: Propuesta de formatos de actividades

- Formato de hoja de vida de equipo

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
 LABORATORIOS DE SUELOS DE LA FIC
 

FORMATO HOJA DE VIDA DE EQUIPOS				CODIGO:
				VERSION:
				FECHA:
EQUIPO:				CODIGO N°
SERIE:				
EN CASO DE EMERGENCIA COMUNICARSE CON:				
EMPRESA	PERSONA	DIRECCION	TELEFONO	FAX:
DIMENSIONES			N° DE BATERIAS	
LONGITUD:	ALTO:	ANCHO:	PESO:	
CARACTERISTICAS DEL EQUIPO				
Marca/Modelo		Consumo		Potencia
CONSUMO DE INSUMOS				
USO	MARCA	REFERENCIA	PERIODO DE CAMBIO	CANTIDAD

- **Formato de inventario de equipos y herramientas**



<b>FORMATO DE INVENTARIO DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS</b>	<b>CODIGO:</b>
	<b>VERSION:</b>
	<b>FECHA:</b>

--

**CENTRO DE COSTO:**


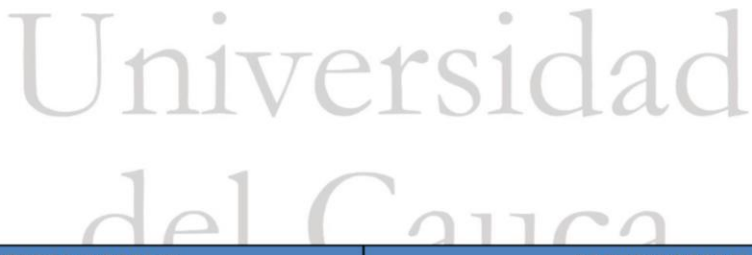
Item	Nº item	Descripcion	Marca	Modelo	Serie	Capacidad	Motor	Ubicación	Observaciones
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									

- **Formato de inspecciones preoperacionales planeadas para equipos herramientas e instrumentos**

UNIVERSIDAD DEL CAUCA								
LABORATORIOS DE SUELOS DE LA FIC								
<b>FORMATO DE INSPECCIONES PREOPERACIONALES PLANEADOS PARA EQUIPOS , HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS</b>							<b>CODIGO:</b>	
							<b>VERSION: 001</b>	
							<b>FECHA:</b>	
LUGAR DE INSPECCION:								
DESCRIPCION	ESTADO			CONDICION	CALIFICACIÓN			OBSERVACIONES
Activo:	B	R	M		A	B	C	
<b>CONDICION SUBESTADAR O INSEGURA SEGÚN LA NORMA NTC 4114</b>								
Es toda circunstancia física o condicion fuera de norma en los objetos o en el medio ambiente que puede causar directamente los accidentes								
CLASE	ESCALA DE VALORES PARA CALIFICACION DE CONDICION SUBESTANDAR					GRADO DE ACCION		
A	podria ocasionar la muerte, una incapacidad permanente o perdida de alguna parte del cuerpo, o daños de considerable valor.					INMEDIATA		
B	Podria ocasionar una lesion o enfermedad grave, con una incapacidad temporal, o daño a la propiedad menor al de la clase A.					PRONTA		
C	podria ocasionar lesiones menores incapacitantes, enfermedad leve o daños menores					POSTERIOR		
<b>OBSERVACIONES</b>								
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center; font-size: 2em; opacity: 0.5;"> <span>Universidad</span> <span>del Cauca</span> </div>								
_____				_____				
INSPECCIONADO POR				SUPERVISOR				



- **Formato de reporte de fallas**

UNIVERSIDAD DEL CAUCA LABORATORIOS DE SUELOS DE LA FIC		
<b>FORMATO REPORTES DE FALLAS</b>		<b>CODIGO:</b>
		<b>VERSION:</b>
		<b>FECHA:</b>
<b>INFORMACION GENERAL</b>		
FACULTAD:		
LABORATORIO:		
DEPENDENCIA:		
RESPONSABLE DEL REPORTE:		
CARGO:		
CORREO:		
NUMERO TELEFONICO:		
<b>INFORMACION DEL EQUIPO</b>		
NOMBRE DEL EQUIPO:		
CODIGO:		
MARCA:		
SERIAL:		
MODELO:		
<b>INFORMACION DE LA FALLA</b>		
		
<b>ACCION REALIZADA</b>		
		
<b>ENTREGA INFORME</b>		<b>RECIBE INFORME</b>
_____ FIRMA CC		_____ FIRMA CC



• **Procedimiento de mantenimiento**



FORMATO PROCEDIMIENTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN EQUIPOS					Código:
					Versión:
					Fecha:
OBJETIVO	Velar por el correcto funcionamiento de los equipos del laboratorio				
ALCANCE	Identificar los equipos que requieren mantenimiento, se le hacen mantenimiento, su correcto funcionamiento, y su registro en la hoja de vida del equipo				
ID	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	DOCUMENTO REF	REGISTRO	OBSERVACIONES
1	Inicio	Coordinador del laboratorio			
2	Identificación de Equipos	Encargado mantenimiento	Inventario de equipos y herramientas		Del inventario de equipos; se saca el equipo para mantenimiento.
3	Planeación de Mantenimiento	Encargado mantenimiento	Inventario de equipos y herramientas	Hoja de vida equipo Cronograma de mantenimiento preventivo correctivo	Se tiene en cuenta lo urgente del mantenimiento de los listados de equipos por revisar.
4	Inspección general de equipo	Encargado mantenimiento		Hoja de vida equipo	Se revisa el equipo, según el cronograma de mantenimiento, se revisan sus partes, se registra en hoja de vida del equipo
5	Hay partes?	Encargado mantenimiento			Si : no compra No: realizar pedido de partes, adecuadas Para el equipo
6	Realizar cambios	Encargado mantenimiento		Hoja de vida equipo	Se realiza el cambio de las partes que están en mal funcionamiento, se registra en la hoja de vida de equipo
7	Equipo?	Encargado mantenimiento			Se hacen pruebas de funcionamiento
8	Actualizar hoja de vida equipo	Encargado mantenimiento		Hoja de vida equipo	Se registra el mantenimiento preventivo o correctivo en la hoja de vida del equipo
9	Poner equipo en funcionamiento	Encargado mantenimiento			Sea el equipo de lugar ubica el equipo en el lugar de trabajo, se prueba nuevamente su correcto funcionamiento
	Fin				

## 8. Anexo H: Cuadros de Modelo de control, procedimental mejorados.

En el siguiente apartado se muestran algunos cuadros del modelo de control de procedimiento mejorado del ensayo de lámina asfáltica delgada en movimiento realizado en la sección 2.1, específicamente las acciones que implica la realización de las fases de medir los índices de penetración, de ductilidad, de viscosidad y medir punto de ablandamiento

Tabla H - 1 Verificar fluidez de la muestra

Verificar que la muestra sea homogénea y sin contaminación
Agitar manualmente la muestra
Verificar fluidez en la muestra
Calentar los moldes a temperatura semejante a la de la muestra
Llenar moldes a una altura superior en 10mm a la penetración supuesta
Cubrir los moldes con vaso de vidrio invertido
Dejar enfriar por un periodo de 1 y 1.5 horas
Sumergir los recipientes en un baño de agua a T° especificada en un periodo de 1 y 1.5 horas
Verificar que la aguja de penetración este limpia y seca
Colocar el peso para obtener la masa móvil de 100 gr.
Colocar la aguja sobre la superficie de la muestra
Fijar en cero el penetrómetro
Dejar caer la aguja durante 5 seg.
Registrar la distancia que haya penetrado la aguja a la muestra.
Realizar por lo menos tres penetraciones en cada recipiente sobre diferentes puntos

Tabla H - 2 Fase medir índice de viscosidad

Verificar fluidez de la muestra
Agitar manualmente la muestra
Mantener el baño a temperatura de ensayo
Verificar viscosímetro este limpio y seco
Precalentar el viscosímetro a temperatura de ensayo
Cargar el viscosímetro
Introducir el viscosímetro en el baño hasta que alcance la temperatura de ensayo
Iniciar el flujo del asfalto en el viscosímetro
Medir el tiempo requerido para que el borde guía del menisco pase de la primera marca de tiempo hasta la segunda
Limpiar el viscosímetro con un solvente especial
Secar el viscosímetro pasando una corriente lenta de aire seco y filtrado a través del capilar por 2 minutos
Verificar que el viscosímetro quede completamente libre de solvete.

Tabla H - 3 Fase medir índice de ductilidad

Verificar disponibilidad de equipos
Verificar que los equipos estén limpios y libres de residuos.
Cubrir los moldes con glicerina y dextrina, talco o Kaolin.
Calentar la muestra asfáltica
Agitar la muestra hasta que este fluida.
Verter la muestra en forma de chorro fino de extremo a extremo.
Verificar que no se incluyan burbujas de aire.
Cubrir la muestra.
Dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos
Sumergirla en un baño de agua a la temperatura de ensayo durante 30 minutos.
Quitar el exceso de material del molde con una espátula recta caliente.
Introducir en un baño de agua a temperatura de ensayo durante 85 y 95 minutos.
Retirar la placa del molde
Retirar las piezas laterales
Montar la probeta en el ductilómetro.
Introducir cada pareja de clavijas en los orificios correspondientes de cada pinza.
Poner en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada hasta producir la rotura.
Medir la distancia entre las pinzas.
Verificar que la probeta permanezca sumergida en el agua del ductilómetro mientras se está estirando.
Verificar que la probeta no se aproxime a la superficie o al fondo una distancia menor de 25mm.
Verificar que la temperatura del agua sea la normalizada.

Tabla H - 4 Fase medir punto de ablandamiento

Verificar fluidez de la muestra
Agitar manualmente la muestra
Calentar los dos anillos de bronce a la misma temperatura de la muestra
Colocar los anillos sobre el plato de base
Verter la muestra dentro de los anillos, con exceso
Dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 min
Cortar e exceso de muestra de la parte superior con un cuchillo o espátula precalentada
Verificar que la superficie del disco coincida con el nivel superior del anillo
Se escoge el baño liquido dependiendo el punto de ablandamiento esperado
Se hace el montaje de los aparatos
Llenar el baño con el líquido apropiado hasta una altura de 105 mm
Colocar las bolas en el fondo del baño hasta que adquiera la misma temperatura del resto del montaje
Mantener la temperatura de iniciación durante 15 minutos
Colocar cada bola en la guía
Calentar el baño en forma pausada
Proteger el baño de corrientes de aire
Anotar para cada anillo y bola la temperatura en el momento en que el producto bituminoso que rodea la bola toca el fondo del plato de base

## 9. Anexo I: Características motor

La Tabla I - 1 presenta las características consideradas para la elección del motor a utilizar.

Tabla I - 1 Características motor

Característica	Significado
Número de serie (SER No)	Es el número exclusivo de cada motor o diseño para su identificación, en caso de que sea necesario ponerse en comunicación con el fabricante
Tipo (TYPE)	Combinación de letras, números o ambos, seleccionados por el fabricante para identificar el tipo de carcasa y de cualquier modificación importante en ella. Es necesario tener el sistema de claves del fabricante para entender este dato
Numero de modelo (MODEL)	Datos adicionales de identificación del fabricante.
Potencia (H.P.)	Potencia nominal es la que desarrolla el motor en su eje cuando se aplica el voltaje y frecuencia nominales en las terminales del motor con un factor de servicio de 1.0
Armazón (FRAME)	La designación del tamaño del armazón es para identificar las dimensiones del motor. Si se trata de una armazón normalizada por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) incluye las dimensiones para montaje en planos gráficos
Factor de servicio (SV FACTOR)	Los factores de servicio más comunes son de que 1.0 a 1.1. Un factor de servicio de 1.0 significa que debe demandarse que el motor entregue más potencia que la nominal, si se quiere evitar daño de aislamiento, con un factor de servicio de 1.15 o cualquier mayor de 1.0), el motor puede hacerse trabajar hasta una potencia mecánica igual a la nominal multiplica por el factor de servicio sin que ocurran daños al sistema de aislamiento.
Amperaje (AMPS)	Indica la intensidad de la corriente eléctrica que toma el motor al voltaje y frecuencia nominales, cuando funciona a plena carga (corriente nominal).
Voltaje (VOLTS)	Valor de la tensión de diseño del motor, que debe ser la medida en los terminales del motor, y no la de línea. Los voltajes nominales estándar se presentan en la publicación MG1-10.30
Clase de aislamiento (INSUL)	Se indica la clase de materiales de aislamiento utilizados en el devanado del estator son sustancias aislantes sometidas a pruebas para determinar su duración al exponerlas a temperaturas determinadas, la temperatura máxima de aislamiento clase B es de 130 °C, la de la clase F 135°C y la clase H 180°C

Frecuencia (HERTZ)	La frecuencia eléctrica (HZ) del sistema de suministro para el cual fue diseñado el motor, se recomienda no utilizar diferentes frecuencias a esta porque alteraría el funcionamiento y sufrir daños el motor.
Servicio (DUTY)	En este espacio se grava la indicación de intermitente o continuo. Esta última significa que el motor puede funcionar 24 horas los 365 días del año, durante muchos años, si es intermitente se indica el periodo de trabajo, lo cual significa que el motor puede operar a plena carga durante este tiempo. Una vez transcurrido este hay que parar el motor y esperar a que se enfríe antes de ponerlo en funcionamiento nuevamente.
Temperatura ambiente (°C)	Es la temperatura ambiente máxima en grados centígrados a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro de fallas.
Secuencia de fases (PHASE SEQUENCE)	Permite identificar en la placa característica como conectar el motor, el sentido de rotación
Eficiencia (EFF)	Esta nomenclatura establece la eficiencia del motor según normativa NEMA MG-12.53b. Este valor de eficiencia se aplica a motores estándar, así como a los de eficiencia superior.
Factor de Potencia coseno de $\Phi$ (POWER FACTOR)	Es la razón entre la potencia activa medida en kilovatios que demanda el motor y la potencia aparente medida en kilovolts/amperes que demanda el motor. Si el factor de potencia de la placa es menor que el que suministra la red eléctrica entonces se procederá a calcular la cantidad de potencia reactiva capacitiva para seleccionar el capacitor que se deberá conectar a las terminales del motor y así quede corregido el factor de potencia.

Fuente: [15]

## 10. Anexo J: Explicación detallada cumplimiento RT2

### Cumplimiento del RT2

**RT2.** Proponer la instrumentación industrial para la protección eléctrica del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento a fin de evitar futuros daños en componentes eléctricos y electrónicos.

Para proponer la instrumentación industrial del horno, utilizamos como guía el diagrama P&ID desarrollado para el funcionamiento del horno presentado en la Tabla 3 - 4. Para la selección de los dispositivos eléctricos se tomaron como guía algunos capítulos, secciones y artículos del código eléctrico Colombiano NTC 20500, este establece los aspectos de seguridad para instalaciones eléctricas en construcciones basados en parámetros aplicados y validados mundialmente, los cuales garantiza al usuario una utilización segura y confiable de las instalaciones eléctricas [20].

- **Selección del tipo de arranque de los motores**

Para realizar la correcta selección de los dispositivos eléctricos que permiten proteger los motores, es necesario que tener en cuenta los siguientes factores: Arranque, parada, inversión de rotación, marcha, control de velocidad, seguridad del operador (dispositivos pilotos), protección contra daños, mantenimiento de los dispositivos de arranque (fusibles, interruptores, cortacircuitos). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen los factores teóricos presentados en la norma y en la Tabla J - 2 se exponen los factores tenidos en cuenta para la selección del tipo de arranque acorde con las necesidades del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

Tabla J - 1 Factores teóricos para la selección del tipo de arranque de los motores

Características de arranque directo	Valor
Corriente de arranque	4 a 8 veces la corriente nominal
Par de arranque	0.6 a 1.5 veces el nominal
Duración de arranque	2 a 3 segundos
Ventajas	Arranque simple y poco costoso
Inconvenientes	Corriente de arranque elevada
Aplicaciones	Pequeñas máquinas de igual arranque a plena carga

Tabla J - 2 Factores que se tuvieron en cuenta para la selección del tipo de arranque de los motores

Características de arranque y parada motor 1 y motor 2	
Frecuencia del arranque y parada	Uno por ensayo
Arranque liviano o pesado	Liviano



Arranque rápido o lento (exponencial)	Arranque normal
Arranque y parada manual o automática	Manual
Paradas exactas	1 ó 2 en su defecto
Frecuencia en la inversión de rotación	No
Luces piloto	Si una, para indicar funcionamiento
<b>Características del control de velocidad</b>	
Velocidad constante	Necesario según la norma INVE 720-07
Velocidad variable	No necesario según la norma INVE 720-07
Velocidad ajustable	No necesario según la norma INVE 720-07
Velocidad múltiple	No necesario según la norma INVE 720-07

Para poner en marcha el motor 1 y el motor 2, se decide realizar el arranque directo, debido a sus bajas potencias de trabajo ½ HP y ¼ HP respectivamente, esto permite conectar directamente el estator a la red por medio de un interruptor bipolar; disminuyendo sustancialmente recursos económicos y tiempo de instalación innecesarios. Se consideran algunos apartes de la norma NTC 2050 [20] que se resumen en la Tabla J - 3.

Tabla J - 3 Apartes considerados de la norma NTC 2050

<b>Arranque de un motor eléctrico</b>	
	Selección de los conductores del circuito del motor, parte B de la norma, artículos 430-21 a 430-29
	Selección de interruptores sección 380 parte I, artículos 430-101 a 430-113
	Protección del motor (relé térmico) y del circuito ramal contra sobrecargas, parte C Artículos 430-31 a 430-44
	Protección del motor (contactor) y del circuito ramal contra sobrecargas, parte C Artículos 430-31 a 430-44
	Selección de motores parte A de la norma, Artículos 430-1 a 430-18

- **Dimensionamiento del cable de alimentación del horno**

Para la dimensión del cableado de alimentación del horno, utilizamos la sección 220-10 del código NTC 2050 [20] donde se establece que los conductores del alimentador deben tener una capacidad de corriente suficiente para alimentar las cargas conectadas, en ningún caso la carga calculada para un alimentador debe ser menor a la suma de las cargas conectadas, En la Tabla J - 4 se resume la suma las cargas eléctricas que posee el horno. La norma NTC 2050 [20] establece que los conductores deben tener una capacidad de corriente no inferior al 125% de la corriente a plena carga, por lo tanto, se tiene en cuenta este valor para el cálculo total realizado.

Tabla J - 4 Cálculos realizados para las cargas eléctricas que posee el horno

Cargas eléctricas	Consumo (A)	Totales (A)
Motor 1	10.4 A	10.4
Motor 2	5 A	5
2 resistencias eléctricas de calefacción (1600 W)	13 A	13
Lazo de control de temperatura	1 A	1
Luces piloto	0.5 A	0.5
	Total (A) =	29.9 A
Elección diámetro (AWG) cable = 125%+Total (A)	1.25*Total (A)	37.375 A

Una vez obtenido el valor total de carga (37,375 A) se procede a relacionarlo con los presentados en la tabla 310-75, NTC 2050 [20] para ver que diámetro (AWG) que soporta este amperaje (un resumen de esta tabla se presenta en la Tabla J - 5). De acuerdo a la Tabla J - 5, se determina que el calibre del cable eléctrico a seleccionar es 8 (AWG) dúplex, ya que es el valor más cercano al valor de amperaje obtenido.

Tabla J - 5 Capacidad de corriente de cables AWG de acuerdo al amperaje según la norma NTC 20500

N° AWG	14	12	10	8	6	4	3	2	1	0
Carga (A)	15	20	30	40	55	70	80	95	110	125

- **Dimensionamiento de cables internos del horno**

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, respecto a lo establecido por la norma NTC 2050 [20] de que los conductores no deben tener una capacidad de corriente inferior al 125% de la corriente a plena carga, se realizan los cálculos correspondientes y se representan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la**

**referencia.** que contiene los valores de diámetros adecuados para los cables internos a implementar en el horno.





Tabla J - 6 Calculo de diámetros adecuados para los cables internos

Cargas eléctricas	Consumo (A)	Cálculo de carga Norma NTC 20500	Sección transversal de los conductores (AWG)
Motor 1	10.4	$10.4 \cdot 1.25 = 13A$	14
Motor 2	5	$5 \cdot 1.25 = 6.25A$	16
Resistencias eléctricas	13	$13 \cdot 1.25 = 16.25 A$	10 con protección térmica de 200°C
Lazo de control de temperatura	1	$1 \cdot 1.25 = 1.25A$	16
Luces piloto	0.5	$0.5 \cdot 1.25 = 1.25 A$	16

- **Selección de interruptores y fusibles**

Se toma como referencia de selección de interruptores la sección 380 del Código NTC 2050 [20] donde se establece que la selección del interruptor se realiza de acuerdo a la máxima carga de corriente a utilizar, la Tabla J - 7 presenta los interruptores utilizados.

Tabla J - 7 Selección de interruptores

Grafica	Descripción
	Interruptor basculante 2 contactos luminoso rojo 20A (110-240) AC utilizado para prender el motor 2
	Interruptor basculante unipolar luminoso verde 15A (110-240) AC utilizado para prender el motor 1
	Interruptor basculante unipolar luminoso verde 5A (110-240) AC utilizado para prender el lazo de control de temperatura.
	Interruptor térmico de 2 contactos 40A (110-240) AC, original del horno no es necesario su remplazo, se encuentra en buen funcionamiento; se utiliza para encender y apagar todo el horno

- **Selección de Contactores y relés térmicos**

Los Contactores son interruptores accionados mediante electromagnetismo que proporcionan un medio seguro y conveniente para interrumpir y conectar circuitos

de potencia [26]. El dimensionamiento del contactor será acorde con la intensidad de corriente absorbida por el motor, especificada en la placa característica del motor.

Por su parte, el relé térmico protege contra sobre intensidades de corriente producidas generalmente por exceso de carga en el motor, falta de una fase o baja tensión. El dimensionamiento del relé térmico estará de acuerdo con la intensidad nominal del motor, especificada en la placa característica del motor [15].

En la Tabla J - 8 se muestran los Contactores y relés térmicos seleccionados para los motores asociados al horno.

Tabla J - 8 Contactor y relé térmicos seleccionados

Equipo	Características
<p data-bbox="375 732 508 762">Contactor</p> 	<p data-bbox="716 848 1422 911">Se selecciona Contactor de 20 A Motor 1. Marca Shint Se selecciona Contactor de 6 A Motor 2 Marca Shint</p>
<p data-bbox="358 1029 524 1058">Relé termico</p> 	<p data-bbox="696 1138 1442 1201">Se selecciona Relé térmico de 20 A Motor 1. Marca Shint Se selecciona Relé térmico de 6 A Motor 2 Marca Shint</p>

Una vez se seleccionan los equipos para la protección de los motores, se plantean las conexiones a realizar de acuerdo a lo que se presenta en la Figura J - 1 y la Figura J - 2 las cuales representan los diagramas de lazo del motor 1 y motor 2 respectivamente, además se propone el diagrama de mando y potencia para la instrumentación seleccionada del motor 1 y motor 2 en la Figura J - 3 y la Figura J - 4.

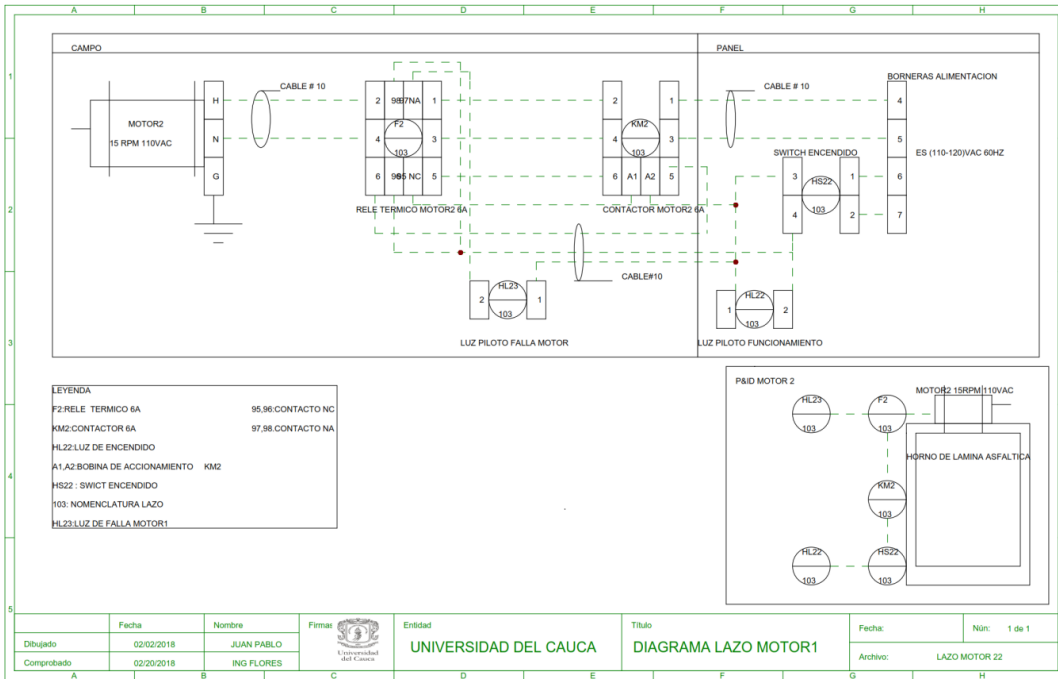


Figura J - 1 Diagrama de lazo motor 1

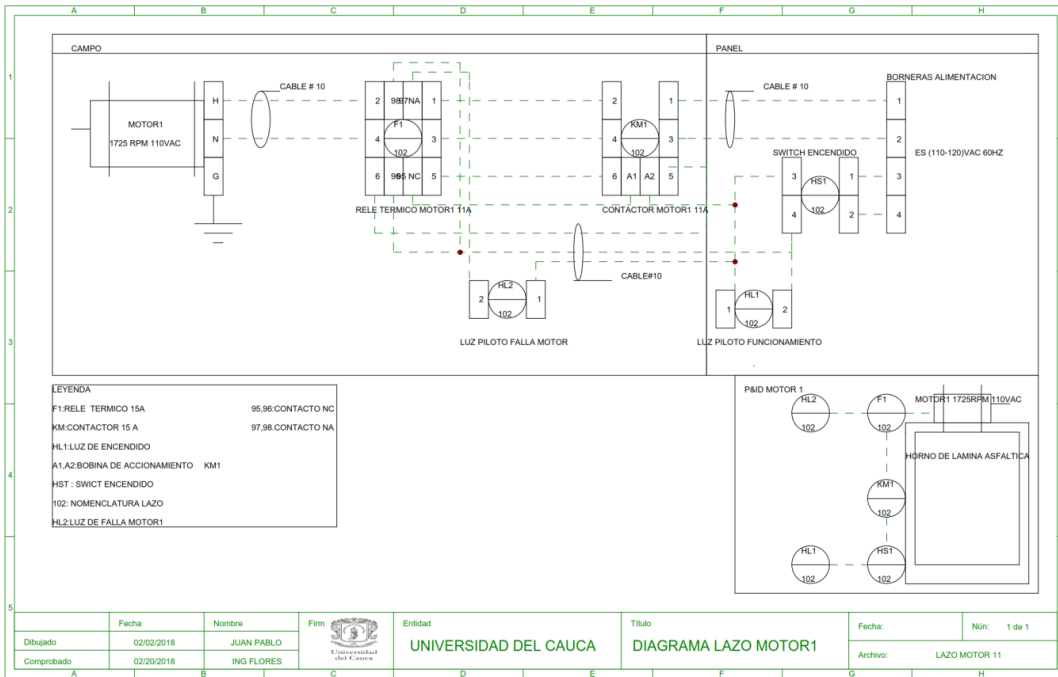


Figura J - 2 Diagrama de lazo motor 2

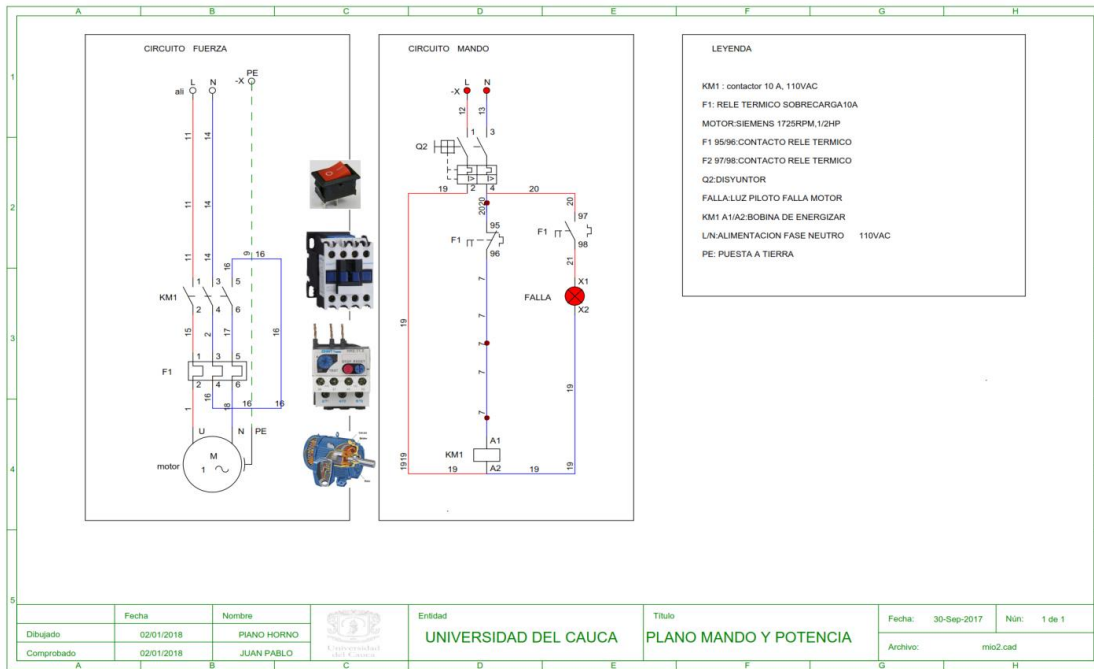


Figura J - 3 Plano de mando y potencia 1

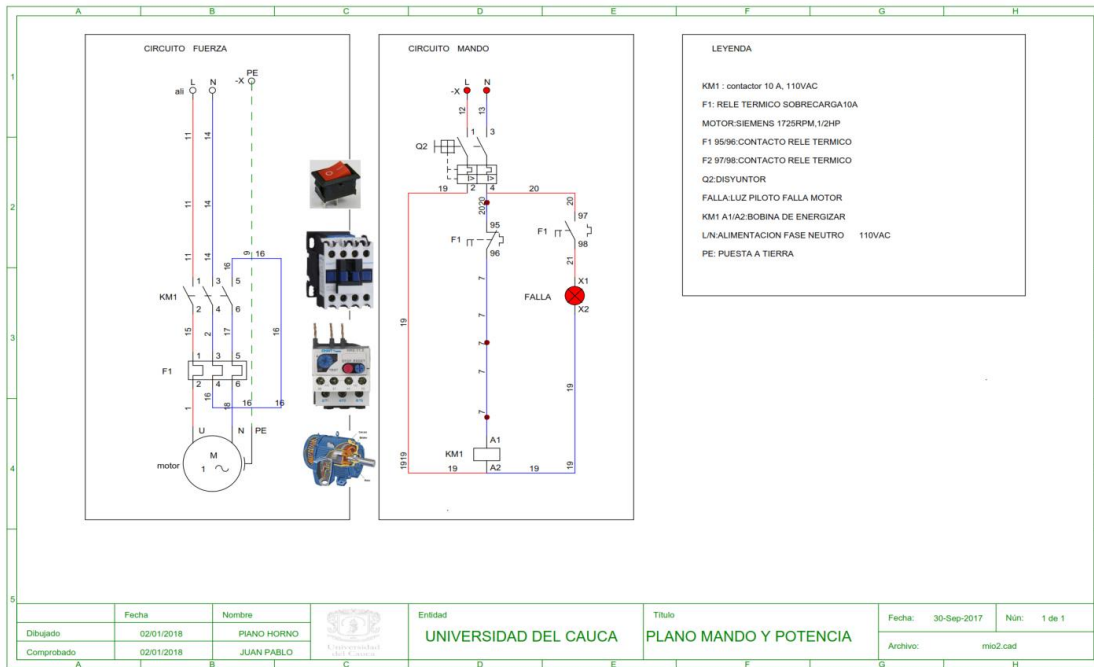


Figura J - 4 Plano de mando y potencia 2

La versión general del sistema propuesto se presenta en la Figura 3 - 4.

## 11. Anexo K: Explicación detallada cumplimiento RT3

### Cumplimiento del RT3

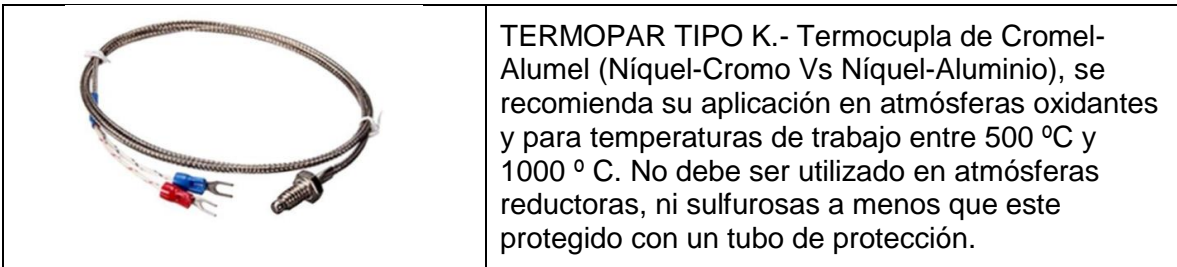
**RT3.** Proponer la instrumentación del lazo de control de temperatura del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.

La teoría de control tiene como fundamento tratar con la dinámica de procesos de diversas áreas. Es bien sabido que los procesos presentan un número importante de variables dependientes, estas variables deben ser controladas con el fin de obtener un comportamiento deseado del sistema. Para un control funcional del sistema es necesario tener en cuenta los parámetros ligados el mismo (entradas, perturbaciones, puntos de equilibrio, etc.). Ahora bien, para relacionar y lograr una interacción entre las entradas y las salidas es necesario implementar un control por realimentación, en el cual el control correctivo aplicado a la entrada del sistema se genera a través de medidas en la salida de este [27].

En la sección 3.4, se plantearon los equipos a utilizar para el lazo de control de temperatura, consecuentemente en la Tabla K - 1 se muestran los equipos a utilizar.

Tabla K - 1 Equipos a utilizar en el lazo de control de temperatura

Dispositivo	Características
	<p>SSR Marca Fotek de 40A, funciona con un opto acoplador interno.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltaje de entrada de 3-23 vdc. Permite manejo por PWM.</li> <li>- Voltaje de salida 24 -400 VAC.</li> <li>- Tiempo de conmutación 10 ms</li> </ul>
	<p>Pantalla: Pantalla dual para valor ajustado y valor actual en grados centígrados</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango: 0-1100C</li> <li>- Apto para Termopares tipo: K, J, S, E, R,</li> <li>- Salida principal: SSR: PWM</li> <li>- Precisión: 0.5%</li> <li>- Parámetros de control PID programables individualmente.</li> <li>- Consumo de energía: 10 VA</li> </ul>



El lazo de control de temperatura realimentado propuesto se representa en la Figura K - 1 y su respectivo diagrama de lazo del control de temperatura para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento se expone en la Figura K - 2.

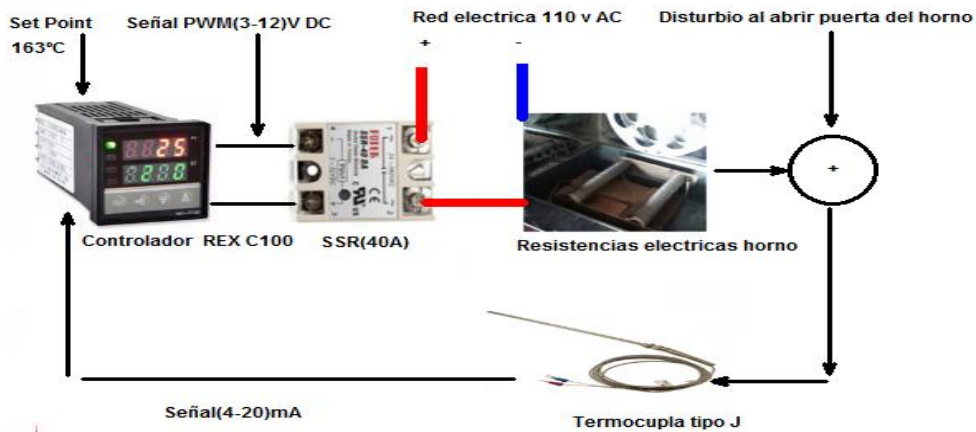


Figura K - 1 Lazo control de temperatura realimentado propuesto



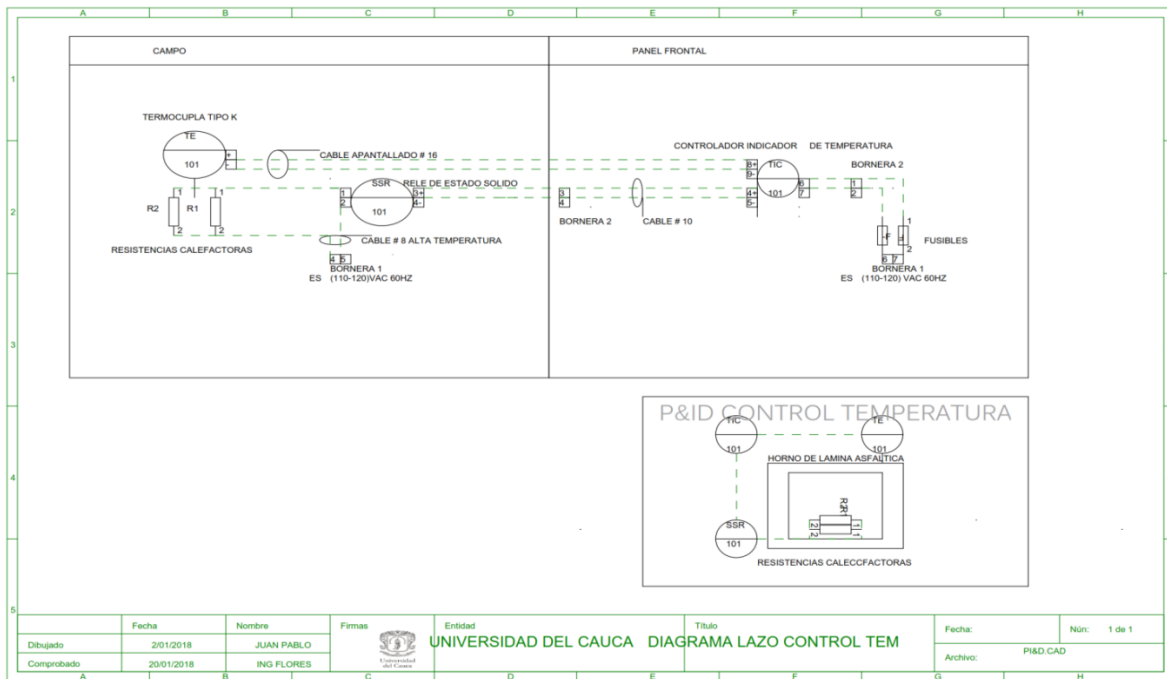


Figura K - 2 Diagrama de lazo del control de temperatura para el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento

Una vez planteada la instrumentación se expone en un plano eléctrico en la Figura 3 - 5, que facilita la lectura para la implementación o mantenimiento por parte de personal que no tenga conocimiento de la teoría referente a la normativa ISA88.

## 12. Anexo L: Función de transferencia del horno

### 1. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL HORNO

El horno de lámina asfáltica delgada en movimiento presentado en la Figura L - 1, es de sección transversal rectangular de resistencias de calentamiento indirecto sobre la carga (resistencias de calentamiento, quemadores de llama directa, tubos radiantes, etc), este se calienta por efectos de la radiación, convección o combinación de ambos, la potencia necesaria para su calentamiento procede de resistencias eléctricas internas en el horno [28]



Figura L - 1 Horno de lámina asfáltica delgada en movimiento

La ubicación de las resistencias, en su interior es de forma de solera (base del horno). Este arreglo es práctico, debido a la uniformidad de distribución de temperatura dentro, lo que se traduce en menor consumo de energía, es importante resaltar que este tipo de arreglo es el especificado por la norma INV E 720-07.

Para determinar la función de transferencia del horno es necesario calcular las capacitancias de los elementos, las resistencias térmicas, las potencias de consumo de alimentación eléctricas y como se aplica o bajo qué función de entrada se representan, por lo cual a continuación se plantean los modelos de magnitudes a hallar para deducir el modelo del horno basados en la teoría según [23].

- **Magnitudes fundamentales**

Como primera medida se presentan las magnitudes a considerar en el modelado del horno, estas son:

$T_1$  = *Temperatura de la carga.*

$T_2$  = *Temperatura ambiente.*

$T_3$  = *Temperatura de las resistencias.*

$T_4$  = *Temperatura de la pared interior.*

$Q_1$  = *Calor generado por las resistencias =  $(I^2|R)$*

$Q_2$  = *flujo de calor desde las paredes hacia la carga*

$Q_3$  = *perdidas de calor a través de las paredes del horno.*

$C_1$  = *Capacidad térmica de la carga.*

$C_2$  = *Capacidad térmica de los elementos de calentamiento.*

$C_3$  = *Capacidad térmica de las paredes del horno.*

$R_{t1}$  = *Resistencia térmica entre pared y la carga.*

$R_{t2}$  = *Resistencia térmica entre paredes y exteriores.*

$U = \text{voltaje altern de alimentacion.}$   
 $R = \text{Resistencia electrica del horno.}$   
 $I = \text{Corriente electrica altern de consumo.}$   
 $P = \frac{U^2}{R} \text{ potencia electrica.}$

Con las magnitudes presentadas se procede a determinar las funciones.

- **Determinación de funciones**

La función hacia la carga se presenta en la Ecuación 1:

Ecuación 1

$$Q1 - (Q2 + Q3) = C2 * \frac{dT3}{dt}$$

Considerando la conductividad térmica de la carga se tiene que el flujo de calor desde las paredes hacia la carga se representa por el comportamiento expresado en la Ecuación 2:

Ecuación 2

$$Q2 = \frac{(T4 - T1)}{Rt1} = C1 * \frac{dT1}{dt}$$

El flujo de calor por las paredes al ambiente se modela de acuerdo a lo presentado en la Ecuación 3:

Ecuación 3

$$Q3 = C3 * \frac{T3 - T2}{Rt2}$$

En caso de que la capacidad térmica de las paredes sea muy reducida, las pérdidas de calor a través de las paredes del horno se modelan de acuerdo a la Ecuación 4:

Ecuación 4

$$Q3 = C3 * \frac{dT4}{dt}$$

Cuando la conductividad térmica de las paredes es muy elevada y considerando lo anteriormente, se procede a realizar la sustitución de la Ecuación 4 y Ecuación 2 en la Ecuación 1, con lo cual se obtiene como resultado la Ecuación 5:

Ecuación 5

$$\frac{U^2}{R} - C1 * \frac{dT1}{dt} - C3 * \frac{dT4}{dt} = C2 * \frac{dT3}{dt}$$

Supongamos, en primera aproximación que  $T3 = T4$ , la Ecuación 5 podría escribirse como la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$\frac{U^2}{R} - C1 * \frac{dT1}{dt} = (C2 + C3) * \frac{dT4}{dt}$$

De la Ecuación 2 se deduce la Ecuación 7:

Ecuación 7

$$T4 = C1 * R_{t1} \frac{dT1}{dt} + T1$$

Luego sustituyendo la Ecuación 7 en la Ecuación 6, se obtiene la Ecuación 8:

Ecuación 8

$$\frac{U^2}{R} - C1 * \frac{dT1}{dt} = (C2 + C3) * \frac{d}{dt} (C1 * R_{t1} \frac{dT1}{dt} + T1)$$

Se nombra  $\tau = C1 * R_{t1}$  como constante de tiempo del horno, y se procede a hacer el reemplazo en la Ecuación 8, de lo cual se obtiene la Ecuación 9.

Ecuación 9

$$\tau * \frac{d^2T1}{dt^2} + \frac{(C1 + C2 + C3)}{(C2 + C3)} * \frac{dT1}{dt} = \frac{U^2}{R} * \frac{1}{(C2 + C3)}$$

La Ecuación 9 es la función de transferencia general del comportamiento dinámico del horno de resistencias eléctricas. Para resolverla es necesario hallar los valores de las capacitancias, las resistencias térmicas, las pérdidas térmicas y las temperaturas anteriormente dichas.

Para poder hallar los valores mencionados sería ideal medir las capacitancias de los recubrimientos térmicos que posee el horno ya que no se tiene certeza respecto a los materiales de que están compuestos pero debido a que sus uniones son de tipo soldadura eléctrica, no se pueden desarmar frenando así la toma de medidas, esto sumado a la dificultad para determinar las pérdidas de temperatura se convierte en un obstáculo para el proceso de hallar las constantes. Por estas razones se decide proceder a realizar un experimento de lazo abierto, que permita establecer los valores necesarios para la función de transferencia del horno, sin embargo, para llevar a cabo este experimento es preciso implementar tanto hardware (HW) como software (SW) que permitan la adquisición y, manipulación de los datos. A continuación, se presenta la metodología desarrollada para poner en marcha el experimento.

## 2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La metodología elegida para el desarrollo de las pruebas consta de 8 partes, las cuales tienen como punto de partida el inicio de la conexión de sensores y actuadores al Arduino y computador, posteriormente se hace la lectura de las mediciones entregadas por la termocupla, luego se hace el censado de la corriente de consumo de las resistencias, posteriormente se procesan los datos mediante el computador. Utilizando un SSR se manipula la potencia en las resistencias de calentamiento con una señal de voltaje y se registran en Excel los datos adquiridos para posteriormente realizar las gráficas correspondientes en Matlab y se finaliza el proceso con el análisis de los datos.

Una vez establecida la metodología se procede con el desarrollo del plan. Inicialmente se presenta un breve marco teórico respecto a las características de los elementos requeridos a fin de generar un contexto.

- ***Medición de temperatura***

El rango de operación del horno varía desde la temperatura ambiente en la ciudad de Popayán Cauca 21°C hasta la temperatura de trabajo según la norma INV E 720-07 que son 163°C, para la medición de este parámetro se utiliza una termocupla tipo K de cromel /alumel presentada en la Figura L - 2, la cual tiene pozuelo metálico de 100 mm y cuyos rangos de operación van desde los 0°C a los 400°C.



Figura L - 2 Termocupla tipo K

Para poder analizar las señales entregadas por la termocupla es necesario acondicionarlas de tal manera que puedan ser interpretadas por el sistema a utilizar, este proceso se describe a continuación.

- **Acondicionamiento de señal termocupla**

El acondicionamiento de la señal entregada por la termocupla se realiza mediante un dispositivo de compensación de uniones frías, el cual amplifica la señal en pequeños cambios de voltaje para la adquisición de la temperatura que registra la termocupla. El dispositivo es el Max 6675 presentado en la Figura L - 3 el cual digitaliza la señal medida, la resolución de este es de 0.25°C y la salida posee una resolución de 12 bits con protocolo SPI.



Figura L - 3 Max 6675

- **Medición de corriente eléctrica**

Para la medición de la corriente de consumo en las resistencias eléctricas del horno se utiliza el sensor de corriente ACS712 presentado en la Figura L - 4, internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo. El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente, dependiendo la aplicación es posible usar el ACS712-05A, ACS712-20A o el ACS712-30A, para rangos de 5, 20 o 30 amperios respectivamente.

El sensor entrega un valor de 2.5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente es:  $I = \frac{V-2.5}{\text{sensibilidad}}$ ; donde sensibilidad=100mv/A.

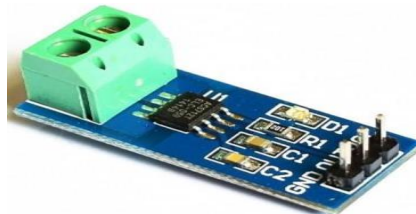


Figura L - 4 Sensor de corriente ACS12-20

- **Etapa de potencia**

Para la manipulación de las resistencias eléctricas(1200W) del horno se utiliza un relé de estado sólido SSR -40 DA-H marca Foltek como el presentado en la Figura L - 5, con posibilidad de manipulación de cargas de 480 VAC y corriente de 40A, este dispositivo se puede operar mediante las salidas digitales de la tarjeta Arduino Mega ADK 2560 sin inconvenientes.



Figura L - 5 Relé de estado sólido SSR-40DA-H

El relé de estado sólido SSR permite activar y desactivar cargas solo cuando la señal senoidal de línea de entrada cruce por su punto cero (ver Figura L - 6), lo cual permite evitar interferencias electromagnéticas, este control es adecuado para manipulación de cargas capacitivas, resistivas e inductivas no saturadas

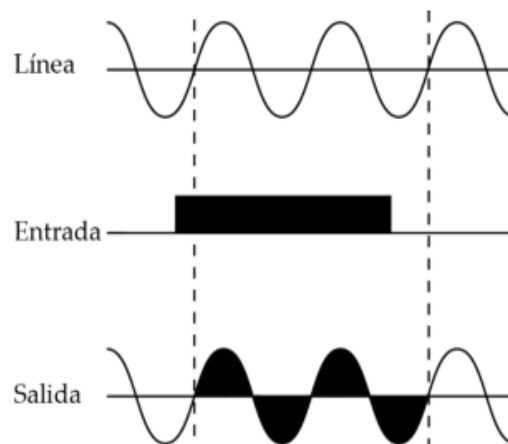


Figura L - 6 Método de cruce por Cero

- **Herramientas para la adquisición y procesamiento de los datos**

Para la adquisición de los datos se utiliza la tarjeta de desarrollo Arduino Mega ADK 2560 presentado en la Figura L - 7, la cual es una plataforma de HW libre con entorno de desarrollo y lenguaje de programación Java. Esta tarjeta tiene procesador Atmega2560, posee 54 pines digitales, de los cuales 15 pueden usarse como salidas PWM (modulación por ancho de pulso), tiene 4 puertos UART y un cristal de 16 MHz.

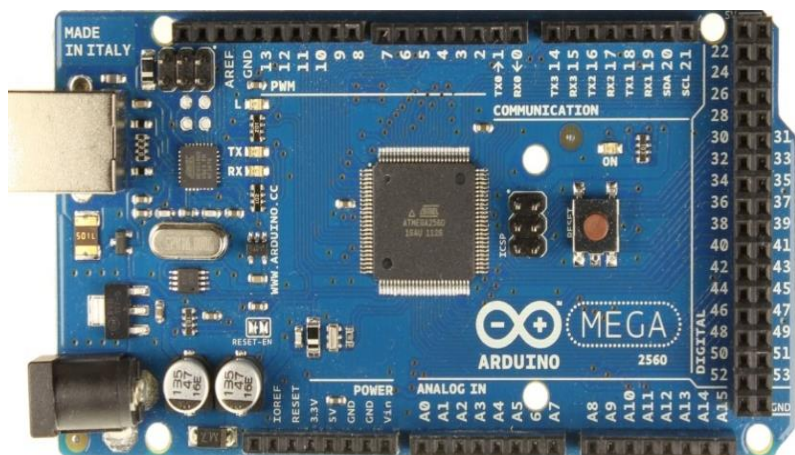


Figura L - 7 Arduino Mega Adk 2560

- **Programa Arduino**

Es la plataforma SW utilizada para la programación de las tarjetas Arduino (ver Figura L - 8), que utiliza un lenguaje propio, basado en Java de alto nivel. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares con Arduino, soporta protocolo de comunicación serial lo cual facilita la conexión con SW utilizados en adquisición de datos de forma serial.

```

temperatura1.ino
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

temperatura1

1 #include "max6675.h"
2 float Sensibilidad= 0.0934; //0.08399; //sensibilidad en V/A para nuestro sensor 0.080;0.0855Buena;0.0844mejoro 20ma error: la m
3 float offset=0.089; // Equivale a la amplitud del ruido 0.100;0.089buono erro 10 mfloat voltajeSensor;
4 float voltajeSensor;
5 float vol_pwm;
6
7
8
9 int thermoDO = 4;
10 int thermoCS = 5;
11 int thermoCLK = 6;
12 int linea=0;
13 //funcion de leer temperatura
14 MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
15 int vccPin = 3;
16 int gndPin = 2;
17
18
19

```

Figura L - 8 Interfaz de programación Arduino

En el caso del presente trabajo de grado se utiliza un Arduino como puente para la obtención de los datos a analizar, a través de este, los datos son leídos y entregados al Programa PLXDAC.

- **Programa PLXDAC**

Programa para adquisición de datos de la empresa Parallax Microcontroller Data Acquisition for Excel (PLXDAC), adquiere los datos de la tarjeta Arduino Mega ADK por medio de protocolo serial USB y los registra en una hoja de Excel en forma de



columnas como muestra la Figura L - 9. En la casilla *PORT* se configura el puerto en que se encuentra conectado la tarjeta Arduino, la velocidad de conexión (en baudios) se configura en la casilla *Baud* por lo general en un valor de 9600, luego se procede a establecer conexión por el tiempo que estipule la prueba de recolección de datos, posteriormente se procede a guardar los datos para su posterior manipulación con el programa elegido, en este caso **MATLAB 2015R**.

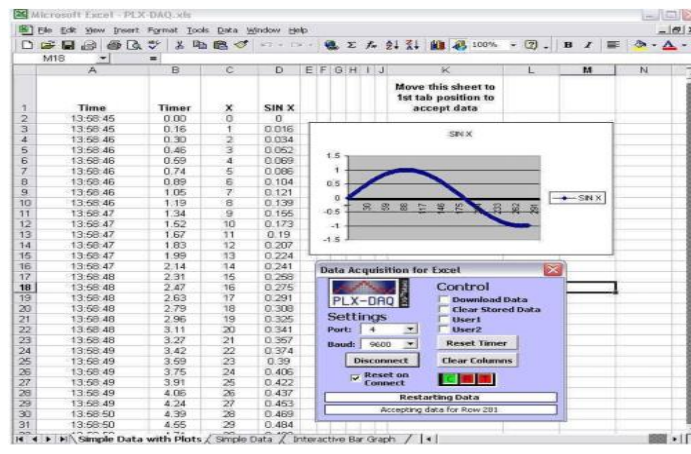


Figura L - 9 Programa PLXDAC

- **Programa MATLAB**

Matlab es una herramienta SW matemática que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y comunicación con programas en otros lenguajes y con dispositivos HW [29]. Debido a esto, es la herramienta elegida para la graficación de los datos.

- **Conexiones de los dispositivos para adquisición de datos**

La manera de conexión de los dispositivos electrónicos para la adquisición de datos con el computador se plantea con el fin de medir la curva de reacción del horno en lazo abierto y poder deducir las constantes del controlador, esta configuración electrónica se muestra en la Figura L - 10 y Figura L - 11. Cabe aclarar que el éxito de este proceso depende del estado y la correcta conexión de cada elemento que compone el horno, pues de no ser así los resultados a obtener no representarían correctamente el proceso. De acuerdo a lo mencionado es válido afirmar que el proceso a realizar es también una forma de verificación del funcionamiento y conexión de las partes del horno, así como de las mejoras planteadas.

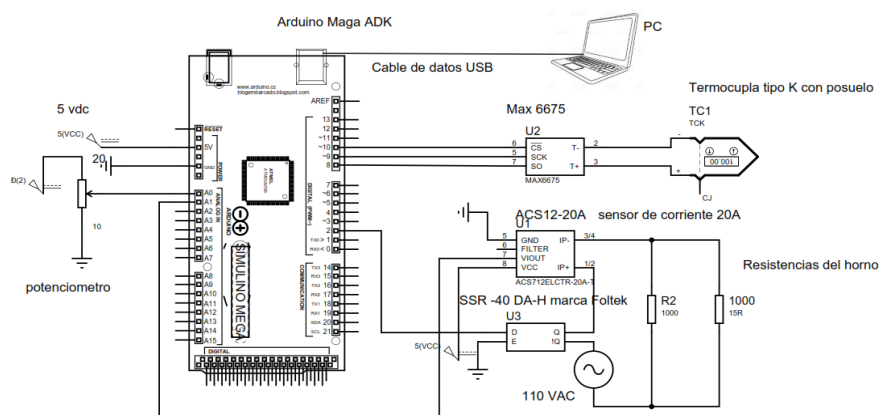


Figura L - 10 Diagrama de conexión de los dispositivos electrónicos para la adquisición de datos

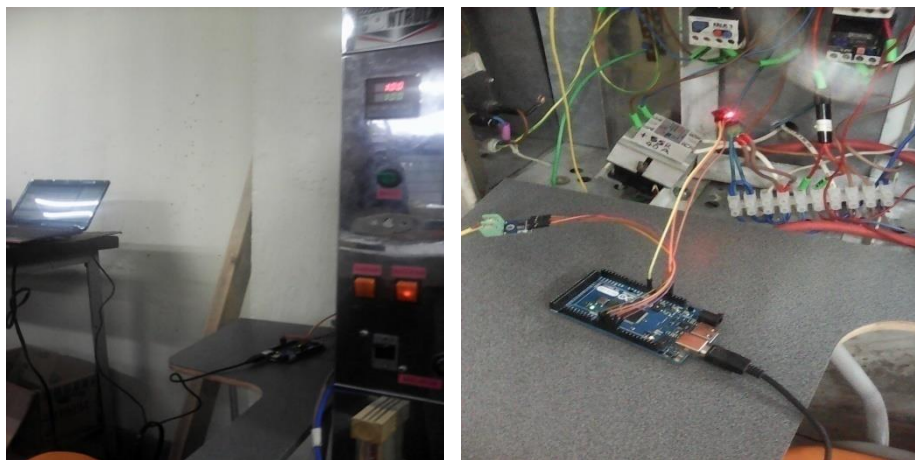


Figura L - 11 Fotos conexión de los dispositivos electrónicos para la adquisición de datos

Para la adquisición de los datos generados por el horno y su graficación, se realiza la medición de la temperatura por un periodo de 2 horas, con periodo de muestreo de 5 segundos, los datos obtenidos mediante Arduino y tabulados en **Excel** mediante el SW PLXDAC son pasados a **MATLAB** para la manipulación y análisis de tal manera que apoyen el diseño del controlador.

- **Resultado adquisición de datos con el HW planteado**

Después de la implementación del HW planteado para la adquisición de datos del horno, se procede a su registro con el SW **PLXDAC** (Figura L - 12), el cual muestra el registro del tiempo en horas y minutos en la columna A de nombre **Hora**, el registro de la evolución de la temperatura se presenta en la columna B de nombre **thermocouple.readCelsius()**, el registro del voltaje generado por el SSR-40 DA-H

se encuentra en la columna C de nombre **P** y finalmente para registrar el tiempo exacto en que se activó la tarjeta Arduino se utiliza la columna D de nombre **Millis()**.

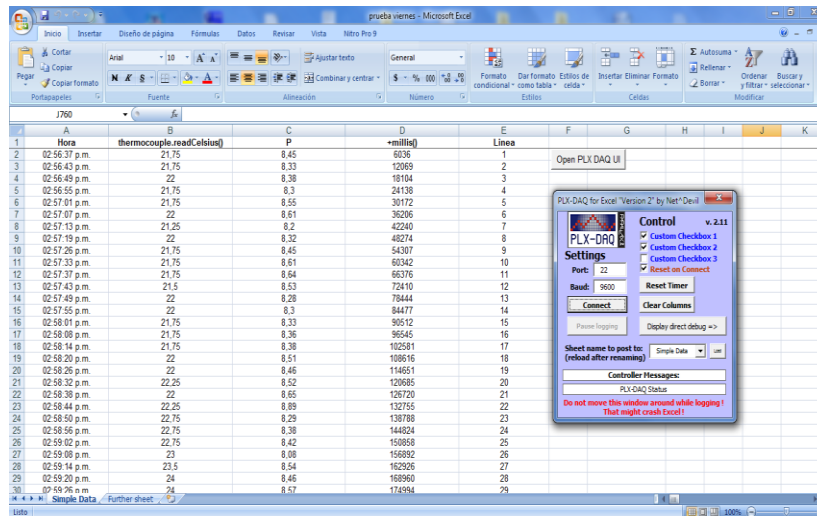


Figura L - 12 Datos adquiridos con SW PLXDAC

Para la graficación de los datos recogidos se utiliza el sw MATLAB (ver Figura L - 13) debido a su gran resolución en las gráficas y a que permite la manipulación de los datos para el análisis de la curva en lazo abierto del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento requerido.

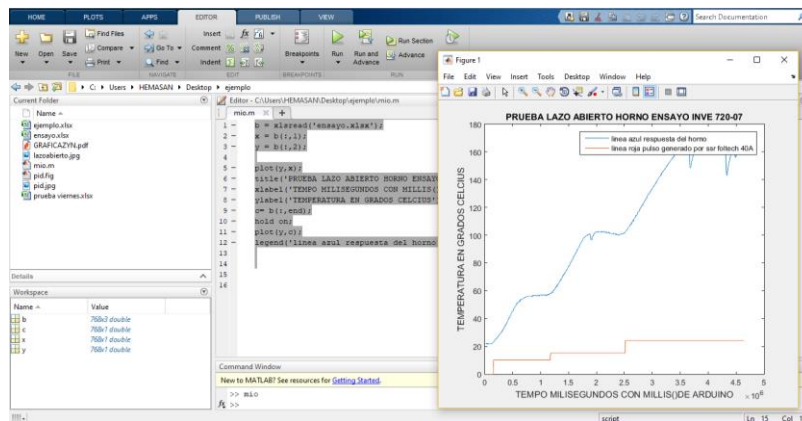


Figura L - 13 SW en Matlab para recolección de datos

Con los datos obtenidos se procede a la sintonización del controlador industrial.

- **Sintonización del controlador industrial de temperatura presente en horno de lámina asfáltica delgada en movimiento**

La sintonización de controladores consiste en la estimación de los parámetros del algoritmo de control que permiten obtener una respuesta aceptable en lazo cerrado

en términos de tiempo de estabilización y sobre paso del valor deseado. En la actualidad hay muchas técnicas de sintonización de un controlador, las cuales, en su mayoría, están basados en:

- Métodos empíricos, como el método de Zigler y Nichols.
- Métodos analíticos, como la técnica basada en el Lugar geométrico de las Raíces.
- Métodos basados en optimización, como el método de Cianone o López.
- Método de sintonía directa.

Cada método de sintonización tiene diferentes ventajas y desventajas, las cuales poseen mayor o menor peso según el tipo de proceso que se desea controlar. Por ejemplo, en muchos casos, los problemas de control en tiempos cortos pueden ser los que presentan mayor desbordamiento; en algunos procesos el desbordamiento trae inestabilidades, lo cual impide que se empleen estos métodos de control. Sin embargo, existen otros procesos en los que se requiere respuesta rápida sin importar el sobre paso de la variable controlada con respecto al valor de referencia.

Para algunos sistemas complejos es casi imposible encontrar un ajuste en la sintonización que satisfaga simultáneamente todos los requerimientos (disminución de tiempo de respuesta, evitar desbordamiento, eliminar el error de estado estable y dar estabilidad a todo el proceso). Por tanto, se deben escoger parámetros de sintonización que generen la respuesta más apropiada para el proceso, en los que se compense la velocidad de respuesta y la desviación del punto de operación [30].

Teniendo en cuenta las condiciones de la planta disponible para el desarrollo del presente trabajo de grado y dado que no se conocen con exactitud las constantes de la función de transferencia de la Ecuación 9 se procede a calibrar el controlador por el método empírico de Zigler y Nichols, el cual se explica a continuación.

- ***Calibración por el método de Zigler y Nichols (ZyN) en lazo abierto***

Para sintonizar el controlador de un sistema por el método de ZyN de lazo abierto, es necesario suponer que el sistema es lineal en todo su rango de operación y presenta un comportamiento dinámico de primer orden con tiempo muerto.

En este método se ajusta la respuesta dinámica del sistema a un modelo de primer orden con tiempo muerto, a partir de datos experimentales en los que la entrada del sistema se somete a un cambio de tipo escalón [24]

Para poder avanzar en el proceso de sintonización, es necesario realizar el cálculo de la ganancia del sistema, así como de las constantes de tiempo y de tiempo muerto.

- ***Cálculo de la ganancia***

La ganancia del sistema ( $k$ ) representa el cambio total del Estado Estable (EE) inicial al EE final debido a la manipulación sobre el actuador, es decir, es la relación entre el cambio en la variable de proceso  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  y el cambio en la variable manipulada  $\Delta V_{\text{voltaje } dc}$ , su relación viene dada por la Ecuación 10.

Ecuación 10

$$k = \frac{\Delta T^{\circ}\text{C}}{\Delta V v d c}$$

- **Estimación de la constante de tiempo y tiempo muerto**

La estimación de la constante de tiempo ( $t_o$ ) y tiempo muerto ( $\tau_o$ ) de un sistema de primer orden, a partir de los datos dinámicos obtenidos cuando la entrada del proceso es una señal de tipo escalón, se realiza de la siguiente forma, teniendo en cuenta la información dinámica de la respuesta del sistema en dos periodos de tiempo específicos, cuando se alcanza el 28% de  $\Delta T^{\circ}\text{C} = t_1$  y el 63% de  $\Delta T^{\circ}\text{C} = t_2$  del cambio total de la variable del proceso que para este caso es la temperatura registrada por el horno según [24], el valor aproximado de  $\tau_o$  y  $t_o$  para este ajuste se puede obtener por medio de la solución simultanea de la Ecuación 11 y la Ecuación 12.

Ecuación 11

$$t_1 = t_o + \frac{\tau_o}{3}$$

Ecuación 12

$$t_2 = t_o + \tau_o$$

El modelo obtenido se utiliza para sacar un diseño de controlador que permita alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos para ello por ZyN son los que se muestran en la Tabla L - 1.

Tabla L - 1 Parámetros sugeridos por ZyN para el diseño del controlador

Tipo de controlador	$k_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{v_o}{k_o * \tau_o}$	-	-
PI	$\frac{0.9 * v_o}{k_o * \tau_o}$	$3 * \tau_o$	-
PID	$\frac{1.2 * v_o}{K_o * \tau_o}$	$2 * \tau_o$	$0.5 * \tau_o$

Según [24] y la experiencia propia se decide seleccionar un controlador de tipo PI debido a que la dinámica del sistema no requiere una respuesta rápida y si se tuviera en cuenta la constante derivativa (D) generaría oscilaciones innecesarias que podrían entorpecer el funcionamiento del sistema.

Cuando se calculan los parámetros de un controlador PI por el método de ZyN en lazo abierto, se deben tener en cuenta que estas fórmulas son empíricas y solo se aplican para un rango limitado de  $t_o$  y de  $\tau_o$ ; según [24] en estudios realizados previamente se encontró que estas fórmulas por lo general son aplicables a un

rango de  $t_o/\tau_o$  específico, cuando el resultado se encuentra entre 0.1 y 1.0 por lo cual se deben cumplir estos valores para que funcione correctamente el controlador.

Utilizando la metodología de ZyN anteriormente descrita sobre los datos obtenidos con el HW y SW propuestos, se procede a graficar mediante Matlab la curva de reacción del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento en lazo abierto como muestra la Figura L - 14.

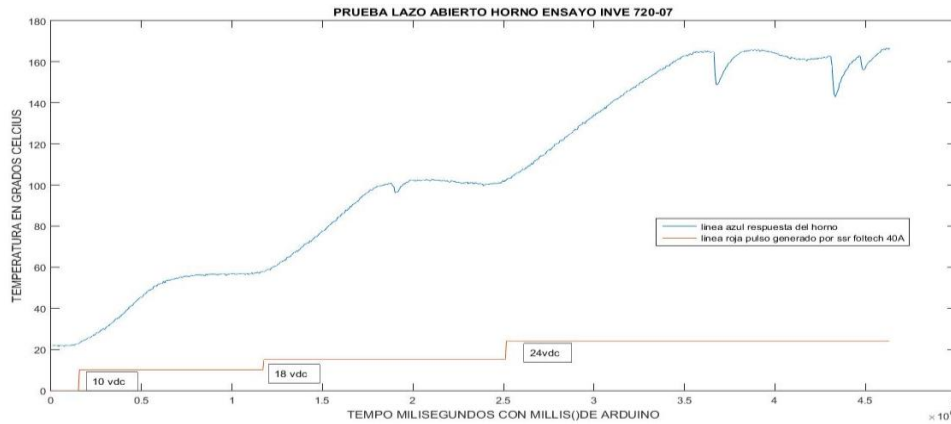


Figura L - 14 Curva de reacción del horno de lámina asfáltica delgada en movimiento en lazo abierto

Posteriormente se procede a hallar los valores del 28% de  $\Delta T^{\circ}C = t_1$  y del 63% de  $\Delta T^{\circ}C = t_2$  sobre la grafica de curva de reaccion, los resultados se exponen en la Figura L - 15.

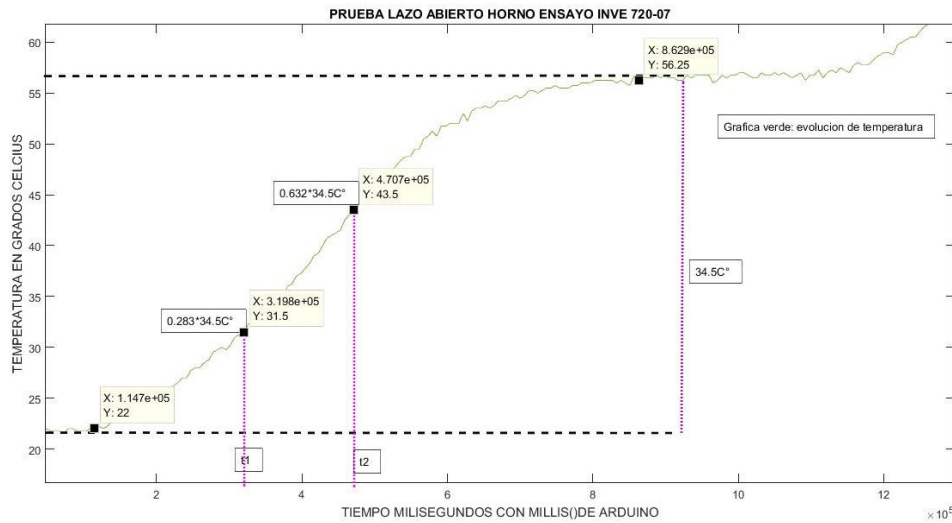


Figura L - 15 Valores de  $t_1$  y  $t_2$

Una vez establecidos los valores de  $t_1$  y  $t_2$ , es posible determinar los valores equivalentes de  $k, t_o$  y  $\tau_o$  de acuerdo al tipo de controlador elegido.

$$t_1 = 3.198e^{05} = 319800 \text{ milis} = 5.33 \text{ min};$$

$$t_2 = 4.707e^{05} = 470700\text{milis} = 7.845\text{min};$$

$$t_0 = 4.075\text{min}$$

$$\tau_o = 3.843\text{min}$$

$$k = \frac{\Delta T^{\circ}\text{C}}{\Delta V\text{vdc}} = \frac{34.5^{\circ}\text{C}}{10\text{vc}} = 0.345^{\circ}\text{C/vdc}$$

$$\frac{t_0}{\tau_o} = 1.0058$$

Tabla L - 2 Valores de constantes para el tipo de controlador

Tipo de controlador	$k_p$	$T_i$	$T_d$
PI	2.6086	12.79	-

Los valores presentados en la Tabla L - 2 son configurados en el controlador industrial de acuerdo a lo establecido en el manual de usuario entregado por el fabricante [16], de tal manera que se logra la sintonización esperada.