



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL
VIENTO EN EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN POR
TERMOGRAFÍA INFRARROJA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

JHONATHAN IVÁN PADILLA MEJÍA

ALEX FABIÁN VELARDE BENALCÁZAR

Riobamba – Ecuador

2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL
VIENTO EN EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN POR
TERMOGRAFÍA INFRARROJA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

JHONATHAN IVÁN PADILLA MEJÍA

ALEX FABIÁN VELARDE BENALCÁZAR

DIRECTOR:

Ing. EDUARDO HERNÁNDEZ Mgs

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Jhonathan Iván Padilla Mejía & Alex Fabián Velarde Benalcázar

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, JHONATHAN IVÁN PADILLA MEJÍA & ALEX FABIÁN VELARDE BENALCÁZAR, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 2021-09-08

Jhonathan Iván Padilla Mejía
060488919-6

Alex Fabián Velarde Benalcázar
060420556-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación “**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN POR TERMOGRAFÍA INFRARROJA**”, realizado por los señores: **JHONATHAN IVÁN PADILLA MEJÍA** y **ALEX FABIÁN VELARDE BENALCÁZAR**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular , el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA	FECHA
Ing. /PhD. José Antonio Granizo PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	2021-09-08
Ing. Eduardo Segundo Hernández Ávila Mgs DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	2021-09-08
Ing. Édisson Fernando Calderón Freire MIEMBRO DE TRIBUNAL	2021-09-08

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de integración curricular a Dios, a mi padre Roberto que siempre me apoyo incondicionalmente en la parte moral y económica, a mi madre Carolina que está en el cielo y a mi segunda madre Alejandra que formo parte para llegar a ser un profesional de la sociedad con los mejores valores inculcados. Gratitud a ellos por sus enseñanzas y cariño. A mis queridos hermanos Paola y Sebastián, con su cariño y apoyo siempre han sido motivo de inspiración para dar el ejemplo y no darme por vencido, a ustedes este logro.

Jhonathan

Terminando ésta etapa de mi vida estudiantil, dedico este trabajo de integración curricular a Dios que me ha brindado la sabiduría de seguir por el buen camino, a mis padres Luis Eduardo y Luz Esmilda que desde mi infancia supieron inculcarme valores de sencillez, humildad, responsabilidad y respeto, forjándome como un hombre de bien, luchando siempre por brindarme los recursos para continuar con mis estudios y alcanzar mis metas. A mis hermanos Anita, Félix y Rafael que con su comprensión y apoyo esperaron siempre los mejores resultados de mi parte y hoy este es el resultado de mi trabajo.

Alex

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitir el cumplimiento de este logro, a mi familia y amigos quienes me apoyaron incondicionalmente, a la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial y a toda su planta docente ya que cada uno ha contribuido en mi desarrollo profesional aportando conocimientos, experiencia y buenos valores, en especial a nuestros asesores, Ing. Eduardo Hernández y al Ing. Edison Calderón por guiarme y formar parte de otro objetivo alcanzado.

Jhonathan

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de culminar esta investigación, a mi familia quienes siempre me apoyaron y brindado su ayuda incondicional durante mi vida estudiantil en los momentos con más dificultades. A la planta docente de la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial que ha contribuido en mi formación académica impartiendo de la mejor manera todos sus conocimientos para ser un profesional ético, responsable y honesto, en especial a nuestros asesores, al Ing. Eduardo Hernández y al Ing. Edison Calderón quienes siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos y su ayuda desinteresada pudimos culminar esta investigación. A mis amigos y compañeros que han sido un pilar importante brindándome su guía y apoyo durante mi paso por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Alex

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
RESUMEN.....	xx
SUMMARY.....	xxi
INTRODUCCIÓN.....	xxii
Antecedentes.....	xxii
Planteamiento del problema.....	xxiii
Justificación.....	xxiii
<i>Variable dependiente:</i>	xxiv
<i>Variable independiente:</i>	xxiv
Objetivos.....	xxiv
<i>Objetivo general</i>	xxiv
<i>Objetivos específicos</i>	xxv

CAPÍTULO I

1	MARCO TEÓRICO.....	1
1.1	Mantenimiento basado en la condición.....	1
1.1.1	Monitorización de la condición.....	1
1.2	Leyes que intervienen en la propagación térmica.....	2
1.2.1	Leyes de la termodinámica.....	2
1.2.1.1	Ley cero de la termodinámica.....	2
1.2.1.2	Primera ley de la termodinámica.....	2
1.2.1.3	Segunda ley de la termodinámica.....	3
1.2.1.4	Tercera ley de la termodinámica.....	3

1.3	Temperatura y calor	3
1.3.1	Temperatura	3
1.3.2	Escalas de temperatura	4
1.3.2.1	Escalas relativas.....	4
1.3.2.2	Escalas absolutas.....	4
1.3.3	Calor	4
1.3.3.1	Tipos de calor.....	4
1.4	Transferencia de calor	5
1.4.1	Transferencia de calor por conducción	5
1.4.1.1	Conducción radial en estado estable en cilindros huecos	5
1.4.1.2	Tasa de transferencia de calor (Ley de Fourier)	6
1.4.2	Transferencia de calor por radiación	6
1.4.2.1	Intensidad de radiación	7
1.4.2.2	Potencia emisiva.....	7
1.4.2.3	Irradiación.....	7
1.4.2.4	Radiosidad.....	7
1.4.4	Radiación térmica	8
1.4.4.1	Ley de Stefan Boltzmann:	8
2.4.4.2	Emisividad	9
1.4.4	Transferencia de calor por convección	11
2.4.4.1	Convección natural.....	13
1.4.4.2	Convección forzada	13
1.4.5	Ley de Newton en la transferencia de calor por convección	14
1.4.7	Convección forzada y flujo cruzado externo en un cilindro	15
1.4.8	Transferencia de calor en sistemas abiertos.	15
1.4.8.1	Sistema estacionario (transitorio)	15
1.4.8.2	Principio de conservación de la masa.....	16
1.4.8.3	Trabajo de flujo y energía de un fluido en movimiento	16
1.4.8.4	Análisis de energía de sistemas de flujo estacionario	17
1.4.8.5	Análisis de procesos de flujo no estacionario	18
1.5	Radiación de los cuerpos	18
1.5.1	Ley de Kirchhoff	18
1.5.2	Características de radiación en los cuerpos.	20

1.5.2.1	Cuerpo negro.....	20
1.5.2.3	Cuerpo real.....	21
1.6	Espectro electromagnético.....	21
1.6.1	Medición del espectro electromagnético.....	22
1.6.2	Origen del espectro electromagnético.....	22
1.6.3	Características del espectro electromagnético.....	22
1.6.3.1	Ley de Planck en la radiación electromagnética.....	23
1.6.4	Regiones del espectro electromagnético.....	23
1.6.4.1	Radiación infrarroja.....	24
1.6.4.2	Luz visible.....	25
1.7	Termografía.....	25
1.7.1	Termografía infrarroja.....	25
1.7.2	Características de la termografía infrarroja.....	26
1.8	Tipos de termografías.....	26
1.8.1	Termografía comparativa.....	26
1.8.2	Termografía inicial.....	27
1.8.3	Termografía cualitativa.....	27
1.9	Aplicación de la termografía infrarroja.....	27
1.10	Sistema termográfico.....	27
1.10.1	Componentes de un sistema termográfico.....	28
1.10.2	Cámara termográfica.....	28
1.10.2.1	Cámaras infrarrojas con detectores al ambiente.....	29
1.10.3	Partes principales de una cámara IR.....	30
1.10.3.1	Receptor óptico.....	30
1.10.4	Termogramas.....	31
1.10.5	Características técnicas necesarias para operar el equipo termográfico.....	31
1.10.5.1	Enfoque.....	32
1.10.5.2	Perspectiva.....	32
1.10.5.3	Composición.....	32
1.10.5.4	Rango térmico.....	32
1.10.5.5	“Spam” térmico.....	33
1.10.5.6	Nivel térmico.....	33
1.10.5.7	Ángulo de visión.....	33

1.10.5.8	Reflejos	34
1.10.5.9	Resolución	34
1.10.6	Tipos de resolución	35
1.10.6.1	Resolución espacial.....	35
1.10.6.2	Campo de visión instantáneo (IFOV).....	36
1.10.6.3	Campo de visión (FOV).....	37
1.10.6.4	Resolución de medición.....	37
1.10.6.5	Distancia.....	37
1.10.5.6	Condiciones ambientales.....	38
1.10.5.7	Temperatura de fondo	39
1.11	Influencia del viento.....	39
1.11.1	Velocidad del viento	40
1.11.2	Medición de la velocidad del viento.....	40
1.12.1	Distribución de Shapiro Wilk	41
1.12.1.1	Estadístico de prueba de Shapiro Wilk.....	42
1.13	Regresión exponencial	43
1.14	Regresión lineal	44
1.15	Unidades a utilizar en este experimento.....	45

CAPÍTULO II

2	Marco Metodológico y construcción del módulo soplador.....	46
2.1	Planificación del diseño experimental	46
2.1.2	Formulación de hipótesis.....	46
2.1.3	Selección de la variable independiente y dependiente adecuada.....	46
2.1.3.1	Variable dependiente: Medidas de temperatura de la resistencia	46
2.1.3.2	Variable independiente: Velocidad del viento.....	46
2.1.4	Control de las variables incidentes	46
2.1.4.1	Control de la humedad,	47
2.1.4.2	Control de las corrientes de viento del ambiente	47
2.1.4.3	Control de la emisividad.....	47
2.1.4.4	Control del reflejo de rayos lumínicos adicionales del medio	47
2.1.5	Manipulación de la variable independiente y registro de la variable dependiente.	47
2.1.6	Análisis estadístico de los datos.	48

2.1.7	<i>Inferencia de la relación entre las variable dependiente e independiente</i>	48
2.2	Diseño y ensamble del módulo soplador	49
2.2.1	<i>Estructura del módulo de pruebas.....</i>	49
2.2.2	<i>Sistema de control y potencia para el módulo experimental</i>	50
2.2.3	<i>Tablero de control para el funcionamiento del módulo experimental</i>	51
2.2.3.1	<i>Protecciones eléctricas para el circuito de mando del experimento</i>	51
2.2.4	<i>Fuente de poder regulable</i>	52
2.2.4.1	<i>Motor eléctrico para el experimento.....</i>	53
2.2.4.2	<i>Variador de frecuencia</i>	53
2.2.4.3	<i>Luces piloto para señalización del funcionamiento del módulo</i>	54
2.2.4.4	<i>Selección del Paro de emergencia</i>	54
2.2.4.5	<i>Selección de las borneras.....</i>	55
2.2.5	<i>Gabinete de control para el módulo soplador</i>	55
2.2.6	<i>Ensamble del sistema de transmisión por banda para el motor del experimento... ..</i>	56
2.3	Construcción y ensamble del módulo soplador	56
2.3.1	<i>Herramientas y materiales para la construcción de la estructura del módulo</i>	56
2.3.1.1	<i>Herramientas</i>	56
2.3.1.3	<i>Materiales y construcción de la estructura del módulo soplador</i>	57
2.3.2	<i>Construcción del base motor soplador</i>	59
2.3.2.1	<i>Anclaje del motor y soplador en la base.....</i>	59
2.3.2.2	<i>Montaje del sistema de transmisión por banda</i>	60
2.3.3	<i>Ensamble de tablero eléctrico</i>	60
2.3.3.1	<i>Herramientas</i>	61
2.3.3.2	<i>Máquinas herramientas</i>	61
2.3.3.3	<i>Instrumentos de medida eléctricos</i>	61
2.3.3.4	<i>Materiales</i>	62
2.3.3.5	<i>Montaje del variador de frecuencia.....</i>	62
2.3.3.6	<i>Montaje de las protecciones eléctricas.....</i>	63
2.3.3.7	<i>Cableado del sistema de control y potencia</i>	63
2.3.7.1	<i>Acoplamiento de la base para la fijación de la resistencia.....</i>	64
2.3.7.2	<i>Conexión de los conductores de la resistencia hasta la fuente de poder</i>	65
2.3.8	<i>Ensamble de conducto de aire del soplador hacia el objeto de prueba</i>	65
2.3.9	<i>Vista final del módulo soplador</i>	66
2.4	Pruebas de funcionamiento del módulo soplador	66

2.4.1	<i>Prueba piloto del motor</i>	66
2.4.2	<i>Pruebas piloto del variador de frecuencia</i>	66
2.4.3	<i>Pruebas piloto de la fuente de poder</i>	67
2.4.4	<i>Cartucho calefactor como objeto de prueba</i>	67
2.4.5	<i>Sensor de temperatura (Termistor)</i>	67
2.4.6	<i>Conexión con Arduino</i>	68
2.5	Datos técnicos de la cámara termográfica a utilizar.	68

CAPÍTULO III

3	MEDICIÓN ANÁLISIS Y RESULTADOS	71
3.1	Procedimiento de medición	71
3.1.1	<i>Revisión del estado del módulo soplador</i>	71
3.1.2	<i>Conexión a la red de alimentación</i>	71
3.1.3	<i>Encendido de la fuente de poder</i>	71
3.1.4	<i>Encendido del variador de frecuencia</i>	72
3.1.5	<i>Carga de la batería de la cámara termográfica</i>	72
3.1.6	<i>Encendido y calibración de la cámara termográfica</i>	72
3.1.7	<i>Encendido de la cámara termográfica</i>	73
3.1.8	<i>Selección del IR/Visible</i>	73
3.1.9	<i>Enfoque de la cámara termográfica</i>	73
3.1.10	<i>Ajuste del Spam</i>	74
3.1.11	<i>Ajuste de la emisividad</i>	74
3.1.12	<i>Selección del punto 1 en el termograma</i>	75
3.1.13	<i>Selección del rango de temperatura</i>	76
3.2	Desarrollo del experimento	77
3.2.1	<i>Toma de temperaturas iniciales</i>	77
3.2.2	<i>Medición de la velocidad del viento generado por el módulo soplador</i>	77
3.2.3	<i>Determinación de la velocidad del viento en el experimento</i>	78

3.3	Análisis termográfico	79
3.3.1	<i>Análisis de espectros mediante el software SATIR.....</i>	79
3.3.2	<i>Imágenes infrarrojas obtenidas con la cámara en el experimento</i>	79
3.3.3	<i>Agrupación de los datos termográficos</i>	83
3.3.4	<i>Valores estadísticos de las mediciones</i>	84
3.3.5	<i>Ilustración de datos mediante histogramas.....</i>	85
4.3.6	<i>Realización de una prueba de normalidad mediante el método Sharipo-Wilk.....</i>	89
3.3.7	<i>Prueba de datos T -Student.....</i>	90
3.3.8	<i>Determinación de la ecuación</i>	91
3.3.8.1	<i>Ecuación con tendencia lineal</i>	92
3.3.8.2	<i>Ecuación con tendencia exponencial.....</i>	93
3.3.9	<i>Comprobación de la ecuación</i>	97
CONCLUSIONES.....		99
RECOMENDACIONES.....		100
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de un cilindro hueco	5
Figura 2-1. Radiación emitida por una superficie	6
Figura 3-1. Radiosidad superficial	7
Figura 4-1. Radiación térmica.....	8
Figura 5-1. Perfil de velocidad y temperatura para transferencia de calor por convección de una placa calentada con flujo sobre la superficie.....	11
Figura 6-1. Distribución de temperatura para convección natural	15
Figura 7-1. Distribuciones de velocidad y temperatura en la vecindad de una placa plana.....	13
Figura 8-1. Formación de la capa límite y separación sobre un cilindro en flujo cruzado	15
Figura 9-1. Representación de la ley de Kirchhoff	19
Figura 10-1. Radiación de cuerpos negros	20
Figura 11-1. Radiación de un cuerpo gris, la curva cae por debajo de la del cuerpo negro.....	21
Figura 12-1. Radiación de cuerpos reales	21
Figura 13-1. Regiones del espectro electromagnético	24
Figura 14-1. Elementos de un sistema termográfico.....	28
Figura 15-1. Cámara termográfica FLUKE 830	29
Figura 16-1. Lente de germanio transparente a la radiación.....	30
Figura 17-1. Energía emitida por el objeto y captada por la cámara termográfica	31
Figura 18-1. Spam térmico (diferencia de temperaturas).....	33
Figura 19-1. Angulo de visión focal.....	34
Figura 20-1. Comparación entre distintas resoluciones.....	35
Figura 21-1. Resoluciones de diferentes cámaras termográficas	35
Figura 22-1. Campo de visión instantáneo (IFOV)	36
Figura 23 -1. Campo visual cubierto por cada píxel del sensor	37
Figura 24-1. EXTECH anemometro	41
Figura 1-2. Estructura del módulo de prueba.....	49

Figura 2-2.	Diseño del esquema de potencia para el motor utilizado en el módulo	50
Figura 3-2.	Esquema del circuito de mando del módulo soplador.....	51
Figura 4-2.	Ubicación del motor soplador en la base.....	60
Figura 5-2.	Tablero de control del módulo soplador ensamblado.....	60
Figura 6-2.	Fijaciones del variador de frecuencia a la base de la caja de control.	63
Figura 7-2.	Montaje de fusibles cilíndricos en la caja de control del módulo soplador.....	63
Figura 8-2.	Montaje de relés bimetálicos en la caja de control el módulo soplador	65
Figura 9-2.	Cableado de la caja de control para el módulo soplador	64
Figura 10-2.	Fijación de resistencia mediante un soporte adicional a la base.....	65
Figura 11-2.	Conducto de aire ensamblado	65
Figura 12-2.	Diseño final del módulo soplador	66
Figura 13-2.	Resistencia como objeto de prueba de medición.....	67
Figura 14-2.	Termistor	68
Figura 15-2.	Conexión de tarjeta Arduino con sensor y pantalla.....	68
Figura 1-3.	Fuente de poder con los valores de intensidad y corriente a usar en el experimento	71
Figura 2-3.	Puesta en marcha del variador de frecuencia	72
Figura 3-3.	Partes importantes de la cámara para su configuración.....	72
Figura 4-3.	Configuración del Infrarrojo (IR) de la cámara.....	73
Figura 5-3.	Enfoque de la cámara termográfica con el objeto de prueba.....	74
Figura 6-3.	Ajuste del Spam térmico de la cámara	74
Figura 7-3.	Configuración del ajuste de la emisividad en la cámara termográfica SATIR	75
Figura 8-3.	Selección del punto en el termograma de la cámara termográfica SATIR	76
Figura 9-3.	Selección del punto en el termograma de la cámara termográfica SATIR	76
Figura 10-3.	Tarjeta Arduino Uno	77
Figura 11-3.	Anemómetro EXTECH	78
Figura 12-3.	Relación entre frecuencia y velocidad de viento.....	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

- Gráfico 1-3.** Histograma con velocidad de viento de 0 km/h ;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 2-3.** Histograma con velocidad de viento de 1,5 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 3-3.** Histograma con velocidad de viento de 3,4 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 4-3.** Histograma con velocidad de viento de 4,3 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 5-3.** Histograma con velocidad de viento de 5,6 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 6-3.** Histograma con velocidad de viento de 6,6 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 7-3.** Histograma con velocidad de viento de 7,7 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 8-3.** Histograma con velocidad de viento de 8,9 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 9-3.** Histograma con velocidad de viento de 10,4 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 10-3.** Histograma con velocidad de viento de 11,6 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 11-3.** Histograma con velocidad de viento de 12,9 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 12-3.** Histograma con velocidad de viento de 14,4 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 13-3.** Histograma con velocidad de viento de 15,6 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 14-3.** Histograma con velocidad de viento de 16 km/h;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 15-3.** Ecuación con tendencia exponencial;**Error! Marcador no definido.**
- Gráfico 16-3.** Ecuación con tendencia exponencial
;**Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1-2:** Emisividades de algunos materiales comunes.....;Error! Marcador no definido.
- Tabla 2-2:** Rangos aproximados de frecuencias, longitudes de onda y energías promedio...;Error! Marcador no definido.6
- Tabla 3-2:** Modelo de tabla para los datos de la prueba de Shapiro Wilk;Error! Marcador no definido.
- Tabla 4-2:** Modelo de tabla para los datos de la regresión exponencial;Error! Marcador no definido.
- Tabla 5-2:** Modelo de tabla para los datos de la regresión lineal;Error! Marcador no definido.
- Tabla 6-2:** Unidades a utilizar en el experimento;Error! Marcador no definido.
- Tabla 1-3:** Muestra de frecuencias y velocidades de viento.....;Error! Marcador no definido.
- Tabla 2-3:** Datos técnicos del relé termomagnético;Error! Marcador no definido.
- Tabla 3-3:** Datos técnicos de fusible cilíndrico;Error! Marcador no definido.
- Tabla 4-3:** Datos técnicos de la fuente regulable.....;Error! Marcador no definido.
- Tabla 5-3:** Datos técnicos del motor eléctrico utilizado en el modulo;Error! Marcador no definido.
- Tabla 6-3:** Datos técnicos del variador de frecuencia utilizado;Error! Marcador no definido.
- Tabla 7-3:** Datos técnicos de luces piloto utilizadas.....;Error! Marcador no definido.
- Tabla 8-3:** Datos técnicos del ventilador para el motor.;Error! Marcador no definido.
- Tabla 9-3:** Datos técnicos de borneras utilizadas.;Error! Marcador no definido.
- Tabla 10-3:** Medidas de los dispositivos en el tablero de control;Error! Marcador no definido.
- Tabla 11-3:** Lista de herramientas para la construcción de la estructura del módulo;Error! Marcador no definido.
- Tabla 12-3:** Lista de máquinas herramientas para la construcción de la estructura;Error! Marcador no definido.
- Tabla 13-3:** Lista de materiales para la estructura del módulo de pruebas;Error! Marcador no definido.
- Tabla 14-3:** Lista de herramientas manuales utilizadas en el ensamble del módulo;Error! Marcador no definido.
- Tabla 15-3:** Lista de herramientas para el montaje del tablero de control;Error! Marcador no definido.
- Tabla 16-3:** Lista de instrumentos de medida.....;Error! Marcador no definido.
- Tabla 17-3:** Lista de materiales para el tablero de control.;Error! Marcador no definido.
- Tabla 18-3:** Ficha técnica de la cámara termográfica SATIR ..;Error! Marcador no definido.
- Tabla 19-3:** Termogramas;Error! Marcador no definido.

- Tabla 20-3:** Mediciones de temperatura en °C a distintas velocidades de viento; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 21-3:** Primer delta de temperatura en °C a distintas velocidades de viento; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 22-3:** Segundo delta de temperatura en °C a distintas velocidades de viento; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 23-3:** Valores estadísticos de las mediciones; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 24-3:** Resultados de la prueba de normalidad; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 25-3:** Resultados de la prueba T-Student; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 26-3:** Segundo delta de temperatura en °C a distintas velocidades de viento; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 27-3:** Valores de la regresión de tendencia lineal.....; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 28-3:** Valores de la regresión de tendencia exponencial ; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 24-3:** Resultados de la regresión de las tendencias lineal y exponencial; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 25-3:** Raíz media cuadrática.....; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 26-3:** Resultados; **Error! Marcador no definido.**
- Tabla 27-3:** Resultado de la aplicación de la ecuación.....; **Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Programación para la tarjeta Arduino
- Anexo B:** Modelado del módulo soplador experimental
- Anexo C:** Especificaciones de la cámara termográfica utilizada
- Anexo D:** Datos técnicos del Anemómetro usado en el experimento

LISTA DE ABREVIATURAS

ΔT	Variación de temperatura
FOV	Campo de visión
HP	Caballos de fuerza (Horse power)
IFOV	Campo de visión instantáneo
IFOVm	Campo de visión instantáneo de media
IR	Infrarrojo
PVC	Cloruro de polivinilo
Tmax.	Temperatura máxima
Tmin.	Temperatura mínima
UNE	Norma española
W	Estadístico de Shapiro Wilk

RESUMEN

El presente proyecto investigativo tuvo como propósito encontrar un método que permita corregir la temperatura medida mediante termografía infrarroja en función de la velocidad del viento que incide sobre la superficie caliente de un elemento. Para realizar las mediciones termográficas y su posterior análisis fue necesario construir un módulo soplador experimental, el cual está constituido por dispositivos de control para el manejo de la velocidad del viento generado por el módulo y a su vez direccionado hacia un gabinete de protección donde se encuentra un cartucho calefactor cubierto de un material termo retráctil, el cual posee una alta emisividad; posteriormente al cartucho calefactor se inyectó diferentes velocidades de viento y se tomó las mediciones de temperatura por escala con la cámara termográfica SATIR Hot Find, a continuación se realizó una prueba de normalidad de datos mediante el método de Shapiro Wilk, en donde los datos se distribuyeron normalmente con un p valor mayor a 0,05; el cual permitió verificar que las condiciones en la toma de datos sea la misma. A continuación, para la contrastación de la hipótesis se realizó la prueba T Student, a partir de lo cual se concluyó que a cada velocidad de viento le correspondía un único valor de temperatura con una confianza del 95%. Se realizó una regresión exponencial para encontrar una ecuación con esta tendencia de datos, a esta ecuación obtenida se le realizó una corrección del coeficiente de reducción exponencial por el método del error medio cuadrático de manera que la ecuación se ajustó al comportamiento real de los datos, donde se obtuvo el valor de 0,071845. El error promedio en la comprobación de esta ecuación es del 5,4%. Se recomienda la utilización de la ecuación de corrección para determinar la temperatura más cercana a la temperatura real a la que se encuentra el objeto.

Palabras clave: <MANTENIMIENTO PREDICTIVO>, <INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO>, <T STUDENT.>, <TERMOGRAFÍA INFRARROJA> <MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN>, <RADIACIÓN INFRARROJA>, <DIAGNÓSTICO TÉCNICO>, <SHAPIRO WILK>.

SUMMARY

The purpose of this research project was to find a method that allows correcting the temperature measured by infrared thermography according to the speed of the wind that falls on the hot surface of an element. To carry out the thermographic measurements and their subsequent analysis, it was necessary to build an experimental blower module, which is made up of control devices for managing the speed of the wind generated by the module and then directed to a protection cabinet where there is a heating cartridge covered with a heat shrinkable material, which has a high emissivity; Subsequently, the heating cartridge was injected with different wind speeds and the temperature measurements were taken by scale with the SATIR Hot Find thermographic camera, then a data normality test was performed using the Shapiro Wilk method, where the data was normally distributed with a p value greater than 0.05; which allowed to verify that the conditions in the data collection are the same. Next, to test the hypothesis, the Student's t test was carried out, from which it was concluded that each wind speed corresponded to a single temperature value with a confidence level of 95%. An exponential regression was performed to find an equation with this data trend, this obtained equation was corrected for the exponential reduction coefficient by the mean square error method so that the equation was adjusted to the real behavior of the data, where the value of 0.071845 was obtained. The average error in checking this equation is 5.4%. The use of the correction equation is recommended to determine the closest temperature to the actual temperature at which the object is located.

Keywords: <PREDICTIVE MAINTENANCE>, <INFLUENCE OF WIND SPEED>, <T STUDENT.>, <INFRARED THERMOGRAPHY> <CONDITION-BASED MAINTENANCE>, <INFRARED RADIATION>, <TECHNICAL DIAGNOSIS>, <SHAPIRO WILK>

INTRODUCCIÓN

En el mantenimiento basado en la condición existen técnicas que ayudan en la monitorización de los equipos como es el caso de los equipos termográficos que nos permiten observar la radiación de los cuerpos y poder determinar la temperatura en la que se encuentra, pero también existen factores que pasan por desapercibido como el flujo del viento sobre una superficie caliente misma temperatura que tiene que ser corregida para tomar las acciones correctas y no desperdiciar recursos, para dicho estudio se realizará el ensamblado de un módulo de pruebas en la que se controla el flujo de viento y la temperatura de una fuente generadora de calor, tomamos los datos termográficos para realizar una comparación con temperaturas que fueron medidas con anterioridad mediante el uso de una tarjeta Arduino y un sensor, estos datos son analizados con herramientas estadísticas de la comparación de Shapiro Wilk y T-Student con la que realizaremos pruebas de normalidad obteniendo una ecuación de corrección de la temperatura tomada con la cámara termográfica y precisar la temperatura real.

Antecedentes

En las industrias del país y de Latinoamérica constantemente implementan técnicas de mantenimiento basado en la condición utilizando métodos como la termografía infrarroja.

Cuando se realiza termografía es necesario evitar las corrientes de aire debido a que, como resultado del intercambio del calor por convección, el aire cercano a la superficie tiene la misma temperatura que el objeto medido, mientras que, si hay corrientes de aire, esta capa es sustituida por otra capa cuya temperatura todavía no se ha equilibrado con la del objeto (NFPA 70B, 2018). esto ocasiona errores en las mediciones termográficas.

Los equipos termográficos a pesar de su sofisticada tecnología que es de gran ayuda para el técnico en esta área, es importante tener en cuenta diversos factores que se presentan al momento de la medición termográfica como es el caso de la presencia de viento que incide en las superficies a diagnosticar, ya sea corrientes de viento naturales a campo abierto como corrientes de viento generadas por otros equipos dentro de una planta industrial cerrada.

Planteamiento del problema

En el mantenimiento basado en la condición la realización de análisis por termografía infrarroja a superficies de equipos en plantas industriales se ve afectado por las corrientes de viento presentes, ya sean generados por el ambiente natural en espacios al aire libre o corrientes de viento generados por equipos cercanos en el caso de espacios cerrados, lo cual los activos al estar en contacto con estas corrientes de aire experimentan una pérdida de calor mediante convección generando una apreciación diferente de temperatura en los espectros termográficos dando una lectura irreal en la que el activo se encuentra, esta pérdida de temperatura por convección es variable de acuerdo a la velocidad que el viento fluye con lo cual la apreciación real de la temperatura de los activos va a sufrir variaciones, estas pérdidas por convección generadas por las corrientes de aire no son tomadas en cuenta dentro del análisis termográfico ya que no existe una ecuación de corrección de temperatura en presencia de viento, con lo cual las acciones tomadas sobre esos activos llegan a ser erróneas o poco eficientes.

Se debe tomar en cuenta que los diferentes dispositivos, equipos e instalaciones no siempre se encuentran en lugares protegidos de la intemperie por lo que están expuestos a las corrientes de viento que aparentemente no representa mayor problema al momento de realizar el mantenimiento basado en la condición aplicando termografía infrarroja, pero la realidad es que estas corrientes de viento repercuten en el valor real de la temperatura, ya que según (FLIRSystems, 2010) un recalentamiento medido a una velocidad de viento de 5 m/s (18 km/h) será aproximadamente el doble que uno medido a 1 m/s (3,6 km/h) y un exceso de temperatura medido a 8 m/s (28,8 km/h) será 2,5 veces a uno medido a 1 m/s; sin embargo, es necesario conocer un método de cálculo claro que permita corregir la disminución de temperatura a cualquier velocidad del viento

Con los datos obtenidos se pretende encontrar un método de corrección para las temperaturas medidas por termografía infrarroja, acercándonos a la temperatura real, de esta manera los técnicos de mantenimiento darán soluciones más idóneas y así aumentar la confiabilidad de este método de monitoreo de la condición, con la solución a este inconveniente se reducirá pérdidas de tiempo y dinero al aplicar un diagnóstico técnico por medio de termografía infrarroja.

Justificación.

La presente investigación se realizará por medio de la elaboración de un módulo soplador que simulará vientos a diferentes velocidades los cuales ayudará a recolectar datos de los espectros

termográficos sobre elementos bajo la influencia de viento a diferentes escalas de velocidad, estos espectros se obtendrán mediante el uso de una cámara termográfica que posteriormente las medidas serán analizadas y poder encontrar una ecuación de corrección que ayude a rectificar las mediciones termográficas previamente obtenidas de elementos que estuvieron expuestos a una corriente de viento y no fueron tomados en cuenta para la determinación de su temperatura real, con esta ecuación de corrección pretendemos acercarnos a la temperatura real del elemento medido con el equipo termográfico, y de esta manera los técnicos analistas tendrán una temperatura cercana a la real, ellos podrán dar sus criterios más adecuados para la solución de problemas presentados en las inspecciones rutinarias de mantenimiento, para lograr este objetivo se ensambla un módulo soplador experimental.

El ensamble del módulo soplador se lo realizará tomando en cuenta que se necesita espacio para el soplador que nos simulará corrientes de viento y gracias a la ayuda de un variador de frecuencia que conectado a un motor obtendremos corrientes de viento a diferentes velocidades que serán ajustados según el caso de prueba a realizar. Ahora, es necesario para que las pruebas sean efectivas se las realicen sin presencia de viento extra del ambiente, es decir en un espacio cerrado que para lograrlo se construirá una caja protectora en el módulo, además se tendrá en cuenta una temperatura constante lo cual se logra con la adaptación de una resistencia calefactora en forma de cartucho a la caja protectora.

La temperatura generada por la resistencia se logra controlar y estabilizar por medio de una fuente de poder llegando así a una temperatura estable.

Hipótesis.

Los valores de temperatura medidos mediante termografía disminuyen a medida que se incrementa la velocidad del viento que incide sobre la superficie del objeto analizado.

Variable dependiente: Valores de temperatura en el termogramas

Variable independiente: Velocidad del viento.

Objetivos.

Objetivo general

Analizar la influencia de la velocidad del viento en el monitoreo de la condición por termografía infrarroja.

Objetivos específicos

Ensamblar el módulo soplador con control de la velocidad del viento y temperatura

Recolectar datos de medidas termográficas a varias escalas de velocidad de viento en el módulo soplador.

Determinar la ecuación correctora de temperatura para medidas termográficas en presencia de vientos.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo en concordancia con el problema a investigar se realiza un análisis de los conceptos de mantenimiento y principios teóricos para el estudio de la termografía infrarroja además de la influencia de las corrientes de viento que inciden sobre las superficies a ser diagnosticadas por este método.

El mantenimiento basado en la condición va más allá de lo que tradicionalmente se le conoce como mantenimiento predictivo en la que se aplica varias técnicas con equipos de medición, entre ellos está la cámara termográfica, los equipos de ultrasonido, analizadores de vibraciones, analizadores de aceite y otros equipos que ayudan a la monitorización y determinación del estado de la condición de los activos.

1.1 Mantenimiento basado en la condición

El mantenimiento basado en la condición es una técnica que se aplica en varios campos de la industria, según la norma UNE-EN 13306 de la terminología del mantenimiento define que es el “mantenimiento preventivo que incluye una combinación de la evaluación de las condiciones físicas, el análisis y las posibles acciones de mantenimiento posteriores”

La norma ha considerado manifestar la siguiente nota de importancia.

Nota: La evaluación de la condición se puede realizar mediante la observación del operador y/o inspección, y/o pruebas, y/o monitorización de la condición de los parámetros del sistema, etc., realizada de acuerdo con un cronograma, bajo petición o en forma continua.(UNE EN, 2018, p.16)

1.1.1 Monitorización de la condición

El método de la monitorización de la condición toma como base los resultados de las inspecciones realizadas a los equipos, siendo la monitorización de la condición la “Actividad que se realiza de forma manual o automática y que está destinada a medir a intervalos predeterminados las características y los parámetros del estado físico real de un elemento”.

A si mismo la norma UNE EN 13306 de la terminología del mantenimiento versión 2018 ha considerado manifestar las siguientes notas de interés para la monitorización de la condición.

NOTA 1 La monitorización se distingue de la inspección en que aquella se utiliza para evaluar cualquier cambio en los parámetros del elemento a lo largo del tiempo.

NOTA 2 La monitorización puede ser continua, sobre un intervalo de tiempo, o después de un número dado de operaciones.

NOTA 3 Normalmente, la monitorización se realiza estando el elemento en estado de funcionamiento.(UNE EN, 2018, p.18)

Modos de falla

1.2 Leyes que intervienen en la propagación térmica

Para el diagnóstico por termografía infrarroja es necesario comprender la manera en que se produce el efecto térmico sobre las superficies y la propagación de este mediante los principios de la termodinámica

1.2.1 Leyes de la termodinámica

La termodinámica es la encargada de estudiar fenómenos donde se puede experimentar algún cambio de energía. Para su mejor comprensión y análisis se establecieron algunas leyes que orientan a conocer los procesos que ocurren entre sistemas

1.2.1.1 Ley cero de la termodinámica

Esta ley establece que, si dos sistemas están en equilibrio térmico y se encuentra entre ellos un tercer sistema, este también logrará llegar a la misma temperatura, convirtiéndolo así en una base para la medición de la temperatura. (Cerón-Reyes et al., 2020, p 71)

1.2.1.2 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica, también conocida como ley de la conservación de la energía enuncia que la energía es indestructible, siempre que desaparece una clase de energía

aparece otra, la primera ley de la termodinámica establece que, al variar la energía interna en un sistema cerrado, se produce calor y un trabajo. “La energía no se pierde, sino que se transforma”(Lichtblau & Gobbi, 1959, p.2)

1.2.1.3 Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica indica la dirección en que se llevan a cabo las transformaciones energéticas. El flujo de calor siempre es unidireccional, desde lo espontáneo de los cuerpos de temperatura más alta a aquellos de temperatura más baja.

En esta ley aparece el concepto de entropía, la cual se define como la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir un trabajo.(Lichtblau & Gobbi, 1959, p.2)

1.2.1.4 Tercera ley de la termodinámica

La tercera de las leyes de la termodinámica afirma que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos, ya que a medida que un sistema dado se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante específico. A medida que el sistema se acerca al cero absoluto, el intercambio calórico es cada vez menor hasta llegar a ser casi nulo. Ya que el flujo espontáneo de calor es unidireccional, desde los cuerpos de temperatura más alta a los de temperatura más baja (Segunda ley), sería necesario un cuerpo con menor temperatura que el cero absoluto; y esto es imposible.(Lichtblau & Gobbi, 1959, Pg 2)

1.3 Temperatura y calor

1.3.1 Temperatura

La temperatura es una manera de representar a escala microscópica la velocidad media de las partículas de un sistema, es decir, si tenemos dos sistemas similares diremos que tiene mayor temperatura aquel en el que sus partículas se mueven a mayor velocidad en el caso de los fluidos, y en el caso de los sólidos donde sus moléculas están más fijas, la temperatura será una medida de la vibración de los átomos en torno a sus posiciones.(Iglesias Vasco & Abarca Sigcho, 2012, p.6)

1.3.2 *Escalas de temperatura*

Las escalas de temperatura se dividen fundamentalmente en dos grupos, escalas relativas y escalas absolutas.

1.3.2.1 *Escalas relativas*

Esta se divide en escalas Celsius; es la medición de temperatura más ampliamente utilizada en la investigación o trabajos científicos ya que tiene cien divisiones entre el punto de ebullición y el punto de congelamiento, conocida también como escala centígrada. La escala Fahrenheit toma sus divisiones entre el punto de congelamiento y el punto de ebullición del agua en 180 partes, es decir desde 32°F y los 212°F.

1.3.2.2 *Escalas absolutas*

Esta escala parte de la existencia del cero absoluto ($0^{\circ}\text{K} = -273.15^{\circ}\text{C}$), la escala Kelvin es el estándar mundial y su unidad es el Kelvin.

La escala Rankin se obtiene midiendo en grados Fahrenheit sobre el cero absoluto por lo tanto no tiene valores de signo negativo. (Iglesias Vasco & Abarca Sigcho, 2012, p.7)

1.3.3 *Calor*

El calor es la transferencia de energía térmica entre dos cuerpos de diferente temperatura hasta alcanzar su equilibrio térmico en donde la energía térmica está relacionada con el movimiento de átomos y moléculas, el calor puede ser transferido mediante conducción, radiación o convección explicadas en los próximos apartados. (Iglesias Vasco & Abarca Sigcho, 2012, p.6)

1.3.3.1 *Tipos de calor*

Cuando se transfiere calor a un cuerpo este experimenta diversos cambios dando lugar a los diferentes tipos de calor, siendo los más comunes.

- **Calor sensible:** Durante la transferencia de calor ocurre un cambio de entalpía directamente asociada a un cambio en la temperatura.
- **Calor latente:** El cambio de entalpía es caracterizado por un cambio de fase a temperatura constante.
- **Calor de reacción:** El calor es liberado o requerido por una reacción química.

- **Calor eléctrico:** Es el calor que se transfiere a causa del paso de una corriente eléctrica a través de un material. (Iglesias Vasco & Abarca Sigcho, 2012, p.6)

1.4 Transferencia de calor

1.4.1 Transferencia de calor por conducción

El calor, en esencia se mueve mediante un gradiente de temperatura básicamente se transfiere de una región de alta temperatura a una de baja temperatura a causa del movimiento molecular aleatorio-difusión, las temperaturas más altas se asocian con mayores energías moleculares y cuando colisionan con las moléculas con menos energía se produce la transferencia de energía. Los detalles de la transferencia de calor por conducción son bastantes complicados Para propósitos de ingeniería pueden ser manejados por la ecuación de Fourier, esta establece que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura. (Jiménez, 2016, p.6)

$$\frac{q}{T} = \frac{\partial T}{\partial X} \quad (1)$$

Donde:

q = Tasa de transferencia de calor de calor (W)

$\frac{\partial T}{\partial X}$ = Gradiente de temperatura en la dirección del flujo del calor (K/m)

1.4.1.1 Conducción radial en estado estable en cilindros huecos

Para condiciones de estado estable sin generación interna de energía y despreciando la conducción axial y angular, de acuerdo con el sistema mostrado en la figura 1-2. la distribución de temperatura es:

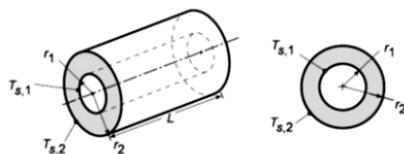


Figura 1-1. Esquema de un cilindro hueco

Fuente: (Escuela Politécnica Nacional, 2012)

1.4.1.2 Tasa de transferencia de calor (Ley de Fourier)

La ley de Fourier establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. (Escuela Politécnica Nacional, 2012)

$$q \propto A * \Delta T \quad (2)$$

Donde

A: Área normal a la dirección del flujo de calor.

L: Largo del paso o el espesor del material.

ΔT : Gradiente de temperatura.

1.4.2 Transferencia de calor por radiación

Es la intensidad con que la materia emite energía como resultado de su temperatura finita, este mecanismo de transferencia de calor se da por ondas electromagnéticas o fotones los cuales viajan grandes distancias a velocidad de la luz sin interactuar con algún medio. La radiación puede predominar sobre la conducción y la convección a temperaturas elevadas además que la radiación tiene una distribución espectral y direccional porque su magnitud varía con la longitud de onda y no es constante para todas las direcciones posibles como se puede observar en la figura. (Fundamentos de transferencia de calor, Incropera, 1996 .p 245)

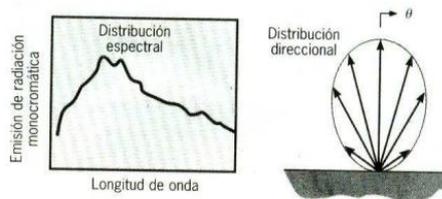


Figura 2-1. Radiación emitida por una superficie

Fuente: (Fundamentos de transferencia de calor, Incropera, 1996)

1.4.2.1 Intensidad de radiación

La intensidad de radiación viene por dada (W/m^2) y es la rapidez de propagación de la energía radiante en una dirección particular por unidad de área normal a la dirección. (Escuela Politécnica Nacional, 2012)

1.4.2.2 Potencia emisiva

La potencia emisiva $E=(W/m^2)$ es la rapidez a la que se emite radiación por unidad de área en todas las longitudes de onda y en todas las direcciones. Un emisor difuso es una superficie para la que la intensidad de la radiación emitida es independiente de la dirección. (Fundamentos de transferencia de calor, Incropera, 1996 ,p 245)

1.4.2.3 Irradiación

Descrita por $G((W/m^2)$, es la razón a la que incide la radiación por unidad de área desde todas las direcciones y a todas las longitudes de onda. (Kreith, 2015)

1.4.2.4 Radiosidad

La radiosidad $J(W/m^2)$, es la rapidez a la que sale la radiación de una superficie debido a la emisión y reflexión por unidad de área en todas las direcciones y a todas las longitudes de onda, como muestra la figura 3-2.

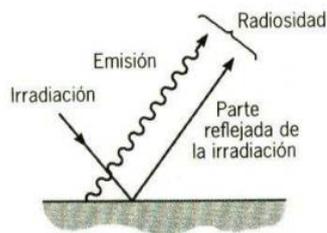


Figura 3-1. Radiosidad superficial

Fuente: (Fundamentos de transferencia de calor, Incropera, 1996)

1.4.3 Radiación de un cuerpo negro

Un cuerpo negro es un emisor y absorbedor perfecto de radiación. A una temperatura y una longitud de onda específica, emite más energía que ningún otro cuerpo y absorbe toda la radiación incidente sin importar la longitud de onda ni dirección, es un emisor difuso, la potencia emisiva total de un cuerpo negro $E_b(W/m^2)$ está dada por la ley de Stefan Boltzmann que se detalla en el apartado 2.4.3.1.

1.4.4 Radiación térmica

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o también llamados fotones como resultado de los cambios en las constantes configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

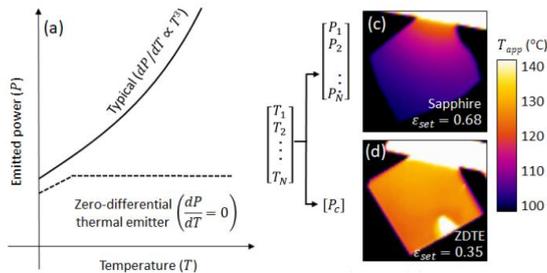


Figura 4-1. Radiación térmica

Fuente: (Shahsafi, Patrick Roney,2019)

Los objetos más calientes son más brillantes, dado que la radiación térmica de un cuerpo caliente crece con la temperatura siguiendo la ley de Stefan–Boltzmann.

Cuando la diferencia térmica ($\partial P/\partial T = 0$), es que, en cierto rango de temperaturas, $\epsilon(\lambda, T) = \gamma T^{-4}$, donde γ es una constante. Este material cuántico fuertemente correlacionado presenta una transición de fase aislante-a-metal (IMT) sin histéresis; gracias a ello su emisividad depende fuertemente de la temperatura. (Shahsafi, Patrick Roney,2019, p 3)

1.4.4.1 Ley de Stefan Boltzmann:

$$Q \text{ emitida máx.} = \sigma A s T_s^4 \text{ [W]} \quad (3)$$

T_s = Temperatura de la superficie.

σ =Constante de Stefan Boltzmann

$(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K^4 \text{ o } 0.1714 \times 10^{-8} \text{ BTU/h ft}^2 R^4)$

As= La superficie idealizada o teórica que emite la radiación

La radiación emitida por las superficies reales se expresa de la siguiente manera;

$$Q \text{ emitida máx.} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \text{ [W]} \quad (4)$$

Donde ϵ representa a la emisividad de los materiales. (Fernández, 2013, p. 20)

La potencia térmica total emitida por un cuerpo negro es

$$P = A(T) \sigma T^4 \quad (5)$$

Donde

A es el área de la superficie.

$\epsilon(\lambda, T)$ es la emisividad espectral.

λ es la longitud de onda emitida.

T es la temperatura

σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Fórmula de la cantidad de radiación

$$Q \text{ rad.} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T^4) \text{ [W]} \quad (6)$$

2.4.4.2 Emisividad

Es un factor que describe la eficiencia de irradiar energía de cierto objeto de comparación con un cuerpo negro de la misma temperatura, es decir la emisividad tiene la capacidad de medir la eficiencia de la superficie de un objeto cuando irradia energía infrarroja. (Fernández, 2013, p.21)

Los valores de la emisividad están en un intervalo de 0 a 1 es una medida que indica que tan próxima esta una superficie de ser un cuerpo negro, es decir la emisividad se acercara a 1.

En termografía infrarroja hay que evitar hacer mediciones en materiales metálicos pulidos, para una alta emisividad es recomendable utilizar materiales como:

- Cinta aislante (type), válido hasta 260 °C.
- Pintura negra mate.

- Para censar la temperatura en cuerpos pulidos se utiliza termómetros con emisividad ajustable.
- La emisividad va a depender de lo siguiente:
 - El material de la superficie del objetivo
 - La rugosidad de la superficie, una superficie rugosa tiene un área de mayor emisión
 - La geometría del objeto, las superficies convexas tienen una emisividad más baja que las planas
- El ángulo de incidencia con el que observamos el objeto (de 0° a 90°) se recomienda trabajar entre 15° y 45°.

Tabla 1-1: Emisividades de algunos materiales comunes.

MATERIAL	EMISIVIDAD
Cuerpo negro	1
Piel humana	0,98
Agua	0,98
Amianto	0,95
Cerámica	0,95
Aislante type	0,95
Pintura negra	0,98
Pintura blanca	0,90
Cemento	0,95
Tejido	0,95
Grava	0,95
Papel	0,95
Plástico	0,95

Comentado [EFAM1]: corrija el tamaño de fuente

Goma	0,95
Cobre oxidado	0,96
Cobre pulido	0,02

Fuente:(Fernández, 2013, p.21)

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

1.4.4 Transferencia de calor por convección

El modo de transferencia de calor por convección consiste en dos mecanismos simultáneos, tratándose de la transferencia de energía generada por el movimiento molecular o llamado también modo conductivo y superpuesta esta la transferencia de energía por el movimiento macroscópico de fracciones de fluido. Esta transferencia de calor se da cuando existe un fluido en movimiento como el aire en donde existen regiones de distinta densidad siendo las regiones de bajas temperaturas más densas que las regiones cálidas ubicadas en la parte inferior a la zona de mayor densidad, el fluido que se encuentra en la región de mayor densidad (zona fría) se desplazara hacia la región de menor densidad (zona caliente).(Kreith, 2015, p 17)

El movimiento de fluido viene a ser el resultado de fracciones de fluido, donde cada una consiste en una gran cantidad de moléculas, que se mueven por la acción de una fuerza externa, esta fuerza extraña puede ser el resultado de un gradiente de densidad, como en la convección natural, o por una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador dando lugar a la convección forzada, o posiblemente por medio de una combinación de las dos. Cuando el personal pertinente realiza un diagnóstico técnico por termografía infrarroja debe tener en claro la transferencia de calor por convección ya que por lo general se realiza estos diagnósticos a sólidos en donde los campos de temperatura se ven afectados por este fenómeno de transferencia de calor, siendo los gases calientes visible para la cámara infrarroja. (Cengel, 2004, p.12)

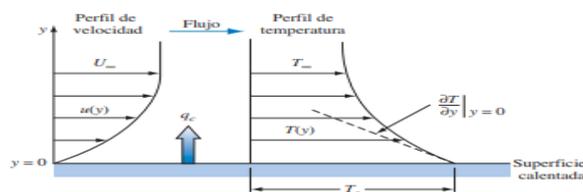


Figura 5-1. Perfil de velocidad y temperatura para transferencia de calor por convección de una placa calentada con flujo sobre la superficie.

Fuente: (Kreith, 2015, p 17)

En la figura 5-1 se muestra una placa a una temperatura superficial (T_s) y un fluido a una temperatura diferente (T_f) que fluye paralelo a la placa. La situación es muy similar en la convección natural con la diferencia principal de que en la convección forzada la velocidad lejana de la superficie se aproxima al valor de corriente libre impuesto por una fuerza externa, en tanto que en la convección natural la velocidad al principio aumenta con el aumento de la distancia desde la superficie de transferencia de calor y después disminuye. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009)

La razón de este comportamiento es que la acción de la viscosidad disminuye rápidamente con la distancia desde la superficie, mientras que la diferencia de densidad disminuye lentamente. Sin embargo, con el tiempo la fuerza de flotación también disminuye conforme la densidad del fluido se aproxima al valor del fluido circundante no calentado. Esta interacción de fuerzas ocasionará que la velocidad alcance un máximo y luego tiende a cero lejos de la superficie calentada. Los campos de temperatura en la convección natural y forzada tienen formas similares y en los dos casos el mecanismo de transferencia de calor en la interfaz fluido-sólido es la conducción. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009)

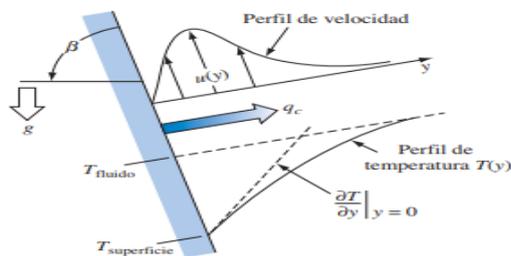


Figura 6-1. Distribución de velocidad y temperatura para convección natural.

Fuente: (Kreith, 2015, p 17)

El análisis anterior indica que la transferencia de calor por convección depende de la densidad, viscosidad y velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico). Mientras que en la convección forzada la velocidad suele imponerse en el sistema por una bomba o un ventilador y se puede especificar directamente, en la convección natural la velocidad depende de la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, el coeficiente de dilatación térmica del fluido (que determina el cambio de densidad por diferencia de temperatura unitaria) y el campo de fuerza del cuerpo, que en sistemas ubicados en la tierra es simplemente la fuerza gravitacional. (Kreith, 2015, p 17)

2.4.4.1 Convección natural

La transferencia de calor por convección natural, a la que también se le refiere como convección libre o flujo inducido por flotación con transferencia de calor, es el resultado del movimiento de un fluido producido por inversión de su densidad. Por ejemplo, el aire en contacto con una superficie caliente, su densidad disminuye y en presencia de gravedad, sube debido a la flotación. Después el aire frío se desplaza desde los alrededores para llenar este vacío y se establece una corriente de flujo de aire ascendente. El proceso inverso ocurre cuando el aire entra en contacto con una superficie más fría. Se hunde, o se mueve hacia abajo y se desarrolla una corriente inversa. Esto, en esencia, describe la convección natural y es el modo de transferencia de calor que se observa cuando las velocidades de los fluidos en corrientes de convección natural, en especial las generadas por la gravedad, por lo general son bajas, pero las características del flujo en la vecindad de la superficie de transferencia de calor son similares a las de la convección forzada. Se forma una capa límite cerca de la superficie y la velocidad del fluido en la interfaz es cero. (Kreith, 2015, p 18)(Cengel, 2004, p 43)

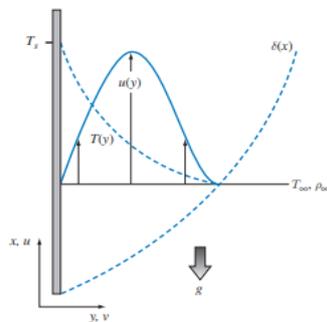


Figura 7-1. Distribuciones de velocidad y temperatura en la vecindad de una placa plana

] Fuente: (Kreith, 2015, p 19)

1.4.4.2 Convección forzada

Al proceso de transferir calor por convección forzada se da cuando el flujo de fluido es impulsado por un gradiente de presión aplicado, las paredes en contacto con el fluido realizan movimientos favoreciendo a la circulación de dicho fluido, empleando para ello elementos mecánicos como ventiladores, agitadores y otros. (Cengel, 2004, p.13)

También se puede utilizar la misma relación que la convección natural para determinar el área requerida para transferir calor a una tasa especificada para un potencial de temperatura dado, pero cuando el calor se transfiere a un fluido dentro de un conducto, la temperatura del fluido varía a lo largo del conducto y en cualquier sección transversal. Por tanto, la temperatura del fluido para flujo dentro de un conducto se debe definir con cuidado y precisión. El coeficiente de transferencia de calor (h) se puede calcular a partir del número de Nusselt que más adelante se verá. (Kreith, 2015, p 18)

1.4.5 Ley de Newton en la transferencia de calor por convección

Con el conocimiento previo de transferencia de calor por medio del fenómeno de convección se detalla la siguiente fórmula de la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q = hA\Delta T \quad (7)$$

Donde:

Q: Cantidad de calor transferido (cal, BTU, Joules)

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

A: Área

ΔT : Diferencia de temperaturas

En la diferencia de temperaturas hay dos maneras de interpretar el cambio que se da para ello hay q fijarse en la temperatura en la q se encuentran tanto la superficie como el fluido en movimiento. (Escuela Politécnica Nacional, 2012, p.6)

T_s : temperatura de la superficie ($^{\circ}C$, $^{\circ}K$)

T_f : temperatura del fluido ($^{\circ}C$, $^{\circ}K$)

Cuando la superficie es más caliente

$$\Delta T = T_s - T_f \quad (8)$$

Cuando el fluido es más caliente

$$\Delta T = T_f - T_s \quad (9)$$

1.4.7 Convección forzada y flujo cruzado externo en un cilindro

Cuando tenemos un flujo de dirección normal al eje de un cilindro es un fenómeno complejo en la cual se produce una capa límite laminar en la parte frontal del fluido llegando hasta un punto donde se da la separación de esta, llegando a formarse una estela en la región corriente abajo, el flujo de esta región se caracteriza por la formación de vórtices irregulares. (Escuela Politécnica Nacional, 2012, p.8)

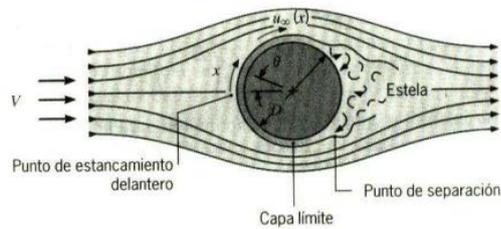


Figura 8-1. Formación de la capa límite y separación sobre un cilindro en flujo cruzado

Fuente: (Kreith, 2015, p 18)

1.4.8 Transferencia de calor en sistemas abiertos.

Refiriéndonos a la primera ley de la termodinámica en la que da a entender que la materia no se crea ni se destruye si no que se transforma, los sistemas abiertos a su vez se subdividen en sistemas estacionarios y sistemas no estacionarios. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009)

1.4.8.1 Sistema estacionario (transitorio)

Estos son procesos en los que ocurren cambios dentro del volumen de control con el paso del tiempo.

La conservación de la masa es uno de los principios fundamentales de la naturaleza. Incluso el balanceo de ecuaciones químicas se lo realiza con base en el principio de conservación de la masa.

Al igual que la energía, la masa es una propiedad conservada que no es posible crear ni destruir durante un proceso. Sin embargo, la masa m y la energía E se pueden convertir entre sí según una fórmula bien conocida que propuso Albert Einstein (1879-1955): expresada como $E=mc^2$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y tiene un valor de 2.9979×10^8 m/s. Esta ecuación indica que la masa de un sistema cambia cuando su energía también lo hace. Sin embargo, para todas las interacciones de energía encontradas en la práctica, con excepción de las reacciones nucleares, el cambio en la masa es extremadamente pequeño que incluso no lo detectan los dispositivos más sensibles. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 235)

El principio de conservación de la masa se usa de modo implícito al requerir que la masa del sistema permanezca constante durante un proceso. Sin embargo, para volúmenes de control, la masa puede cruzar las fronteras, de modo que se debe mantener un registro de la cantidad de masa que entra y sale. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 235)

1.4.8.2 Principio de conservación de la masa

El principio de conservación de la masa para un volumen de control se puede expresar como: la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo t es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante t . Es decir (m entrada $-m$ salida = cambio neto de la masa dentro del volumen de control durante el tiempo) (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 236)

1.4.8.3 Trabajo de flujo y energía de un fluido en movimiento

A diferencia de los sistemas cerrados, en los volúmenes de control hay flujo másico a través de sus fronteras, y se requiere trabajo para introducirla o sacarla del volumen de control. Este trabajo se conoce como trabajo de flujo o energía de flujo, y se requiere para mantener un flujo continuo a través de un volumen de control. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 239)

A fin de obtener una relación para el trabajo de flujo, considere un elemento de fluido de volumen V . El fluido corriente arriba fuerza inmediatamente a este elemento de fluido a entrar al volumen de control; por lo tanto, se puede considerar como un émbolo imaginario. Es posible elegir el elemento de fluido lo suficientemente pequeño para que tenga propiedades uniformes en todas partes. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 239)

1.4.8.4 *Análisis de energía de sistemas de flujo estacionario*

Un gran número de dispositivos de ingeniería como turbinas, compresores y toberas funcionan durante largos periodos bajo las mismas condiciones una vez completado el periodo de inicio transitorio y establecida la operación estacionaria; y se clasifican como dispositivos de flujo estacionario. Los procesos en los que se utilizan estos dispositivos se pueden representar razonablemente bien a través de un proceso un tanto idealizado, llamado proceso de flujo estacionario, definido en el capítulo 1 como un proceso durante el cual un fluido fluye de manera estacionaria por un volumen de control. Es decir, las propiedades del fluido pueden cambiar de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en cualquier punto permanecen constantes durante todo el proceso. (Recuerde, estacionario significa ningún cambio con el tiempo. (Talledo-c)

Durante un proceso de flujo estacionario, ninguna propiedad intensiva o extensiva dentro del volumen de control cambia con el tiempo. Por lo tanto, el volumen V , la masa m y el contenido de energía total E del volumen de control permanecen constantes. Como resultado, el trabajo de frontera es cero para sistemas de flujo estacionario (puesto que VVC constante), y la masa total o energía que entra al volumen de control debe ser igual a la masa total o energía que sale de él (puesto que $m VC$ constante y EVC constante). Estas observaciones simplifican en gran medida el análisis. (Talledo-zevallos, 2017, p,60)

Las propiedades del fluido en una entrada o salida permanecen constantes durante un proceso de flujo estacionario. Sin embargo, las propiedades pueden ser diferentes en entradas y salidas distintas, e incluso podrían variar en la sección transversal de una entrada o salida. No obstante, las propiedades, entre otras la velocidad y la elevación, deben permanecer constantes con el tiempo tanto en un punto fijo como en una entrada o salida. Se deduce entonces que el flujo másico del fluido en una abertura debe permanecer constante durante un proceso de flujo estacionario. Como una simplificación adicional, las propiedades del fluido en una abertura son comúnmente consideradas uniformes (en algún valor promedio) en la sección transversal. Así, las propiedades del fluido en una entrada o salida pueden ser especificadas por los valores promedio únicos. Así mismo, las interacciones de calor o trabajo entre un sistema de flujo estacionario y sus alrededores no cambian con el tiempo. Por lo tanto, la potencia que entrega un sistema y la tasa de transferencia de calor hacia o desde el sistema permanece constante durante un proceso de flujo estacionario. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 242)

1.4.8.5 *Análisis de procesos de flujo no estacionario*

Durante un proceso de flujo estacionario no ocurren cambios dentro del volumen de control; por esto, no hay que preocuparse de lo que sucede dentro de las fronteras. No tener que preocuparse de ningún cambio dentro del volumen de control, con el tiempo simplifica en gran medida el análisis. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 243)

Sin embargo, muchos procesos en los que se tiene interés tienen que ver con cambios dentro del volumen de control con tiempo. Esta clase de procesos se conocen como de flujo no estacionario o flujo transitorio. Cuando se analiza un proceso de flujo no estacionario es importante estar al tanto del contenido de masa y energía del volumen de control, así como de las interacciones de energía a través de la frontera. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 244)

Algunos procesos comunes de flujo no estacionario son, la carga de recipientes rígidos desde líneas de suministro, la descarga de un fluido desde un recipiente presurizado, el inflado de neumáticos e incluso la cocción con una olla de presión ordinaria.

A diferencia de los procesos de flujo estacionario, los procesos de flujo no estacionario comienzan y terminan en algún tiempo finito en lugar de continuar indefinidamente. Por lo tanto, en esta sección se abordan los cambios que ocurren en algún intervalo de tiempo Δt en lugar de las tasas de cambios (cambios por unidad de tiempo). En algunos aspectos un sistema de flujo no estacionario es similar a un sistema cerrado, excepto porque la masa dentro de las fronteras del sistema no permanece constante durante un proceso. (Boles Yunus, A. Çengel, 2009, p 244)

Otra diferencia entre sistemas de flujo estacionario y no estacionario es que los primeros son fijos en espacio, tamaño y forma, pero los segundos no, sino que normalmente no se mueven como tal; es decir, están fijos en el espacio, pero pueden tener fronteras móviles y por lo tanto trabajo de frontera. (Talledo-zevallos, 2017, p,63)

1.5 **Radiación de los cuerpos**

1.5.1 *Ley de Kirchhoff*

Gustav Kirchhoff afirma que, toda la materia emite una radiación electromagnética cuando se encuentra a una temperatura mayor al cero absoluto y la energía emitida depende de la naturaleza de la superficie, considerando que una superficie negra tiene mayor poder de emisividad que una superficie brillante, también hace mención de que toda materia puede

absorber radiación electromagnética del entorno en el que se encuentra., no todas las superficies de los cuerpos absorben la radiación en su totalidad, por lo general es absorbida una fracción de la radiación emitida, se dice que un mal reflector es un buen emisor y viceversa.

La ley de Kirchhoff en este campo establece que, la suma de la radiación que sale de la superficie de un objeto es igual a 1

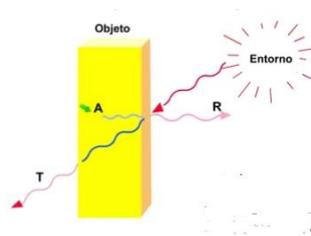


Figura 9-1. Representación de la ley de Kirchhoff

Fuente: (FLUKE, 2018)

De la representación anterior.

A: Energía absorbida

T: Energía transmitida

R: Energía reflejada

$A+R+T=$ Energía total que incide.

Si se utiliza porcentajes obtenemos

$$E = a(\lambda)E + r(\lambda)E + t(\lambda)E \quad (10)$$

$$1 = a(\lambda) + r(\lambda) + t(\lambda) \quad (11)$$

Siendo $a(\lambda)$, $r(\lambda)$, $t(\lambda)$ los coeficientes de absorción, reflexión y transmisión del material respectivamente, que toman valores entre 0 y 1.

1.5.2 Características de radiación en los cuerpos.

1.5.2.1 *Cuerpo negro*

Un cuerpo negro se manifiesta cuando la radiación emitida tiene un valor de 1 y la radiación que se refleja tiene un valor de 0, la radiación que es emitida será dependiente de la temperatura dando un espectro completo de radiación que es incidente en presencia de un cuerpo negro.

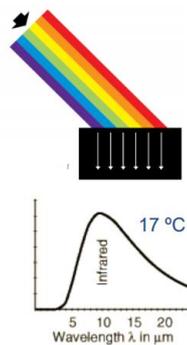


Figura 10-1. Radiación de cuerpos negros

Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

1.5.2.2 *Cuerpo gris*

Un cuerpo es gris cuando la radiación que emiten estos cuerpos es menor que 1 además se mantiene constante a través del rango espectral y la radiación que es emitida tiene una forma idéntica, pero de menor amplitud a comparación de la curva del cuerpo negro.

La radiación de un cuerpo gris es emitida y reflejada, manteniéndose constante a lo largo de la onda, hay una incidencia de un espectro completo de radiación frente a un cuerpo gris

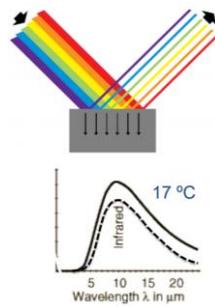


Figura 11-1. Radiación de un cuerpo gris, la curva cae por debajo de la del cuerpo negro

Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

1.5.2.3 *Cuerpo real*

Un cuerpo real es como tal cuando la radiación que emite tiene un valor menor que 1 y la radiación emitida es variable a lo largo del rango espectral al igual que la radiación reflejada.

La radiación de un cuerpo real es emitida y reflejada pero varía con respecto al largo de la onda. Un espectro completo de radiación es incidente ante la presencia de un cuerpo real. A demás la radiación reflejada es dependiente del largo de la onda

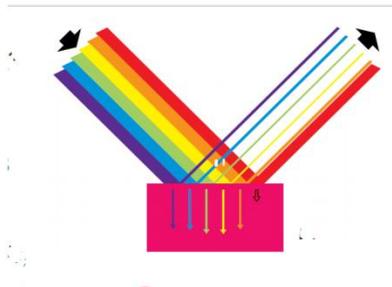


Figura 12-1. Radiación de cuerpos reales

Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

1.6 Espectro electromagnético

La radiación y la luz forman parte de un rango muy amplio, que no tiene límite inferior o superior, denominado el Espectro Electromagnético. Este espectro se ha dividido en diferentes regiones, pero no tienen fronteras rígidas entre regiones adyacentes. Se utilizan dos parámetros comunes para referirse al espectro electromagnético: frecuencia y longitud de onda. (Fontal, Suárez., 2005, p.6)

1.6.1 *Medición del espectro electromagnético*

La radiación electromagnética básicamente corresponde a ondas electromagnéticas que constan de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que son mutuamente perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda viajando a la velocidad de la luz que es de 2.99792458×10^8 m/s (188282 millas/seg), o sea cerca de 300 000 Km/s .(Fontal et al., 2005, p.7)

1.6.2 *Origen del espectro electromagnético*

La radiación del espectro electromagnético llega a nosotros por medio del espacio provenientes de cuerpos celestes y estrellas del cosmos que nos rodea, las cargas eléctricas en movimiento también generan radiación electromagnética.

Partículas cargadas (como electrones o protones) que son aceleradas en los aceleradores de partículas producen radiación sincrotrón, que hoy día tiene aplicaciones importantes.

La materia calentada a altas temperaturas produce radiación electromagnética (los átomos vibrando se convierten en pequeños osciladores), igualmente, la materia a temperaturas de millones de grados en las estrellas produce radiación electromagnética.(Fontal et al., 2005, pp.13-14)

1.6.3 *Características del espectro electromagnético*

Debido al comportamiento en muchos experimentos iniciales con la luz visible, su descripción como una onda o sea su comportamiento ondulatorio fue el mayormente aceptado, cuando la luz visible u otra radiación electromagnética choca con una superficie metálica pulida ocurre una reflexión.

Dependiendo del ángulo de incidencia, cuando la luz visible choca con la superficie de un material transparente como el agua o el vidrio, ocurre una refracción, o sea la luz cambia de dirección en el material, según el valor del índice de refracción, de dicho material.

La característica de reflexión y refracción de la luz ha permitido ser aplicada en artefactos importantes como el prisma que permite separar los colores de la luz blanca, en la gran variedad de lentes, y parabólicas que permiten concentrar o dispersar la luz y aplicarlo en lupas, gafas, cámaras fotográficas, microscopios, telescopios y otros artefactos ópticos útiles.(Fontal et al., 2005, pp.11-13)

Cuando la luz pasa a través de agujeros o rendijas muy pequeños o pasa a través de materiales diferentes muy delgados (todos del tamaño de la longitud de onda de la luz, como por ejemplo una película de jabón) se observa el fenómeno de difracción o interferencia que produce bandas claras y oscuras o coloreadas .(Luque, 2012, p.22)

Algunos experimentos tales como la radiación de un cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico no pudieron ser explicados por el modelo ondulatorio de la radiación, siendo necesario proponer una alternativa para su explicación.

La propuesta vino de Max Planck quien propuso que la emisión de radiación de un cuerpo negro estaba cuantizada y de A. Einstein quien propuso que la luz estaba conformada por fotones que se comportaban más como partículas y viajaban a la velocidad de la luz y su energía dependía de su frecuencia: $E= h\nu$, donde h = constante de Planck = 6.625×10^{-34} joule-seg.(Fontal et al., 2005, p.13)

1.6.3.1 Ley de Planck en la radiación electromagnética

La ley de Planck describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida. La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro (o radiancia espectral) es función de la temperatura T y frecuencia f

1.6.4 Regiones del espectro electromagnético

El espectro electromagnético ha sido dividido en diferentes regiones cuyos límites son más o menos arbitrarios y dependen en buena medida en nuestra capacidad de poder producir o detectar esas regiones del espectro. El descubrimiento y especialmente el desarrollo de las aplicaciones prácticas de las diferentes regiones ha dependido de la capacidad tecnológica de producir fuentes de radiación apropiadas y detectores o medidores sensibles a esas respectivas regiones..(Fontal et al., 2005, p.16)

Tabla 2-1: Rangos aproximados de frecuencias, longitudes de onda y energías promedio

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (m)	Energía del fotón (eV promedio)
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	10^{10}
Rayos-X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	10^5

Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	10^3
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^6 - 7 \times 10^6$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	10^{-3}
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	10^{-5}
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$	10^{-10}
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^5$	10^{-15}

Fuente: (Fontal et al., 2005, p.16)

Realizado por: Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

A continuación, se muestra los distintos espectros electromagnéticos con sus valores en las correspondientes regiones.

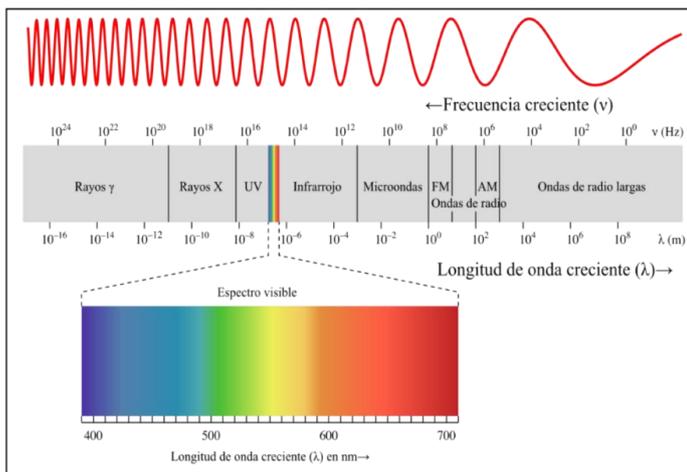


Figura 13-1. Regiones del espectro electromagnético

Fuente: <http://www.gaiaciencia.com/2016/11/gleamoscope-la-via-lactea-como-nunca-la-has-visto-antes/>

1.6.4.1 Radiación infrarroja

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la radiación de luz visible, pero menor que las microondas. Su rango de longitudes de onda está entre 0,7 y 1.000 μm , dependiendo de diversas clasificaciones. La radiación infrarroja es denominada también radiación térmica ya que cualquier cuerpo a una temperatura mayor a 0 °K (cero absolutos, -273,15 °C) la emite. En general, la radiación infrarroja se asocia con el calor,

ya que es producida por la temperatura de los cuerpos. Existen diferentes clasificaciones de la radiación infrarroja en función de su longitud de onda y del objeto de estudio en cada caso (astronomía, sensores, comunicaciones, etc.)

La radiación infrarroja no atraviesa la atmósfera, por lo que no es adecuada para comunicaciones con satélites. Tampoco penetra paredes, por lo que la comunicación en interiores se reduce a cortas distancias sin obstáculos y con visión directa. Éste es el motivo por el que un mando a distancia de un televisor no funciona ni desde una habitación contigua ni con un ángulo de incidencia muy grande respecto del sensor. (Luque, 2012, p.25)

1.6.4.2 *Luz visible*

Se denomina espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. La radiación electromagnética en este rango es denominada luz visible o luz, y se manifiesta al ser humano en un conjunto continuo de colores y tonalidades.

El espectro visible se encuentra entre la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta, que reciben sus nombres precisamente por encontrarse sus frecuencias por debajo del rojo o por encima del violeta respectivamente.

La radiación electromagnética de la luz visible es empleada en infinidad de disciplinas sociales y científicas, y se corresponde con la percepción visual del mundo. Es además una radiación no ionizante, no afectando a las estructuras moleculares. (Luque, 2012, p.26)

1.7 **Termografía**

1.7.1 *Termografía infrarroja*

Hablando etimológicamente la termografía infrarroja significa “escritura con calor de lo que está debajo del rojo”, en la actualidad a este término se le conoce como una técnica que permite medir la temperatura superficial de un objeto sin la necesidad de entrar en contacto físico con dicho objeto, este hecho se logra con la ayuda de la captación de la radiación infrarroja que los cuerpos emiten como parte de la radiación electromagnética, cabe señalar que esto ocurre por encima de los 0 Kelvin. Por aquello, se puede convertir las mediciones de dicha radiación en mediciones térmicas, en la actualidad la tecnología de la termografía infrarroja ha avanzado a tal punto de poder generar una imagen termográfica en dos dimensiones permitiendo conocer de

manera instantánea la distribución superficial de temperatura en un objeto para simplificar el análisis de estudio. (Picazo Rodenas, 2016, p 32)

1.7.2 *Características de la termografía infrarroja*

Tomando en cuenta que la termografía infrarroja es un tipo de radiación electromagnética diremos que es parte del espectro electromagnético muy similar a la luz visible.

- Viaja a la misma velocidad de la luz
- La luz visible y la infrarroja se diferencia por la longitud de onda.
- Las ondas infrarrojas son más largas si comparamos con la luz visible

1.8 **Tipos de termografías**

1.8.1 *Termografía comparativa*

Es un proceso utilizado para comparar componentes en condiciones similares para así evaluar el estado del equipo que se está inspeccionando. Cuando la termografía comparativa se utiliza de forma correcta, las diferencias entre los equipos analizados suelen ser indicadores de su estado. Es de suma importancia establecer el margen de error aceptable antes de empezar una inspección y trabajar con mucho cuidado para no salirse de esos límites, mediante la comparación del objeto de interés con otros similares, suelen ser fácil de detectar una anomalía, la formación y la experiencia son fundamentales para el proceso de inspección puesto que puede haber muchas variables que deban tenerse en cuenta. (Luque, 2012, p.29)

La habilidad de obtener medidas cuantitativas se basa en un sistema de imágenes radiométricas, cómo se moviliza el calor, cuáles son los factores que afectan su transferencia, la física implicada en la información infrarroja obtenida, característica del objeto, sensor de la cámara, atmósfera que rodea al objeto.

Aspectos que pueden influir de forma directa en el valor de las medidas cuantitativas:

- La emisividad menor de 0,6
- Temperatura reflejada de fondo
- Estado de calibración de la cámara
- Condiciones ambientales (velocidad del viento, lluvia, etc.).
- Los reflejos.

1.8.2 *Termografía inicial*

Con una inspección inicial se pretende establecer un punto de referencia del equipo cuando funciona en condiciones normales y sin problemas. Es importante determinar el estado del equipo normal y utilizarlo como firma térmica inicial con la que comparar imágenes posteriores.

1.8.3 *Termografía cualitativa*

Identifican y localizan los problemas existentes en los diferentes sistemas inspeccionados, basado en el método comparativo de sus rasgos anormales de operación. No cuantifica la cantidad de pérdida de calor. Una diferencia entre similares sistemas o áreas podría significar un problema potencial, un ejemplo patrón de un techo y terminales eléctricos. (Luque, 2012, p.33)

Más del 90% de los trabajos de inspección se realizan por comparación. En la práctica se debe obtener información de la estructura, sistema, objeto o proceso a través de observarlo con imágenes de la radiación infrarroja, grabarlas y presentar la información.

1.9 **Aplicación de la termografía infrarroja**

La técnica mediante termografía es utilizada para ver la temperatura de las superficies con precisión sin tener contacto con las mismas. Las diferencias de temperatura se muestran en escalas de grises o color, donde por lo regular blanco representa el área más caliente y negro la más fría, a menos que se invierta la paleta de colores.

- Aplicación de la termografía en sistemas eléctricos
- Aplicación de la termografía en sistemas mecánicos
- Las cámaras termográficas se utilizan para inspeccionar distintas aplicaciones industriales como en bombas, tuberías, soldaduras, edificaciones e incluso en la medicina humana.

1.10 **Sistema termográfico.**

Una característica importante es que basado en la teoría de la radiación es capaz de censar sin tener un contacto físico para posteriormente obtener características térmicas de una superficie, un cuerpo o un sistema completo además proporciona toda la información de interés, estos datos censados por medio de varios sensores del equipo serán procesados digitalmente aplicando algoritmos que permiten obtener una imagen térmica del objeto medido.(Picazo Rodenas, 2016)

1.10.1 Componentes de un sistema termográfico.

- Fuente de radiación u objeto: se trata del objeto o superficie a ser estudiado además de los cuerpos que están dentro del campo visual del sensor
- Trayectoria de transmisión: Se trata del medio por donde se propagarán las diferentes ondas electromagnéticas y donde se determinan las bandas de transmisión en el espectro.
- Subsistemas de procesamiento y sensor: Los resultados que se obtiene son de gran utilidad dependiendo de la calidad del sensor y del sistema de procesamiento, recalando que las cámaras termográficas son equipos para diagnostico técnico y es usualmente utilizado dentro del mantenimiento basado en la condición

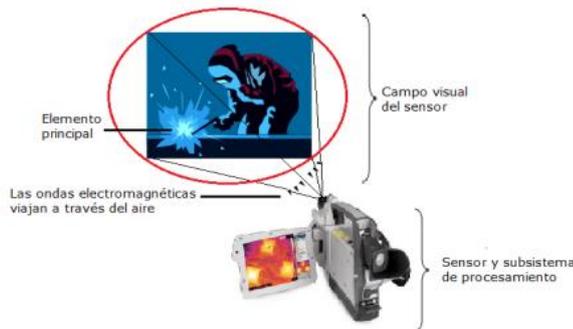


Figura 14-1. Elementos de un sistema termográfico
Fuente: Flir Sistem

1.10.2 Cámara termográfica

La cámara termográfica es un equipo de alta complejidad con la funcionalidad de medir la emisión natural de radiación infrarroja de cierto objeto cuenta con la posibilidad de determinar la temperatura y generar una imagen térmica realizando un procesamiento digital de las señales censadas

Las cámaras termográficas de hoy en día son portátiles y de fácil transporte, muy fáciles de manejar y con una respuesta de alta velocidad en una escala de milisegundos o microsegundos, la imagen que se representa en la pantalla de la cámara termográfica indica un espectro de varios colores indicando cada color un nivel térmico. Esta tecnología ha tenido un desarrollo exponencial en los últimos años y actualmente se emplea en innumerables aplicaciones, desde la Medicina hasta la industria. (Mantenimiento et al., 2017, p.48)



Figura 15-1. Cámara termográfica FLUKE 830

Fuente: <https://isotest.net/productos/mantenimiento-predictivo/>

1.10.2.1 Cámaras infrarrojas con detectores al ambiente.

Estas utilizan sensores que funcionan a temperatura ambiente o que suelen estar estabilizados por medio de elementos electrónicos de control a una temperatura próxima a la temperatura ambiente, los sensores de actualidad funcionan cambiando sus propiedades eléctricas cuando se exponen al calor de la radiación infrarroja, estos cambios que se producen tanto de corriente de voltaje y resistencia son medidos y comparados con los valores de temperatura de operación del sensor, para reducir las interferencias de percepción en la imagen los sensores pueden estabilizarse a una cierta temperatura de operación, es por ello que no requieren de equipos de enfriamiento, estos sensores están contruidos a base de materiales ferroeléctricos y piroeléctricos o utilizan tecnología del microbolómetro las ventajas de estos son:

- Tamaño reducido
- Menor costo, si comparamos con los criogenizados

Estas cámaras tienen la desventaja de tener menor sensibilidad y resolución si lo comparamos con los criogenizados. (Ramírez-Arbeláez et al., 2015, p 77)

Según su respuesta espectral: Se realiza la clasificación estableciendo longitudes de onda que puede captar la cámara termográfica

Tabla 3-1: Longitud de onda en cámaras termográficas

Onda corta: 0.8 μm a 2.5 μm
Onda media: 2.5 μm a 5.5 μm
Onda larga: 7.5 μm a 14 μm

Fuente: (Ramírez-Arbeláez et al., 2015, p 77)

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Según la técnica utilizada también es posible clasificar de acuerdo con la utilización o no de un estímulo infrarrojo en la superficie a estudiar.

Cámaras infrarrojas activas: Funciona basado en la estimulación de la respuesta térmica de la superficie que se va a estudiar, la radiación infrarroja es emitida por reflector de un elemento auxiliar que puede estar integrado en la cámara o en otra parte el haz de infrarrojo ilumina la superficie a estudiar para que pueda ser percibido por la cámara y a su vez la cámara nos dará una imagen monocromática. El colector tiene un filtro para prevenir la interferencia de la luz visible en la cámara mientras mayor sea el alcance mayor será el tamaño del reflector. (Mantenimiento et al., 2017, p.45)

Cámaras infrarrojas pasivas: Estas cámaras carecen de reflectores y perciben la radiación infrarroja tal cual como es emitida por un cuerpo, el inconveniente es que no detectan cuerpos a la misma temperatura del detector motivo por el cual suelen enfriarse de manera criogénica (Mantenimiento et al., 2017, Pg 30)

1.10.3 Partes principales de una cámara IR

Como se ha mencionado su funcionamiento consiste en detectar la energía infrarroja de un objeto o superficie convertir en señales eléctricas y procesarlas para producir una imagen térmica, las cámaras termográficas constan de tres partes fundamentales.

1.10.3.1 Receptor óptico: Está compuesto por:

Lente: Es por donde entra la energía que es emitida por la superficie del objeto que esta echo de un material transparente a la radiación infrarroja como el Germanio o el Silicio revestidos con anti reflectivos para el mejoramiento de las características ópticas.

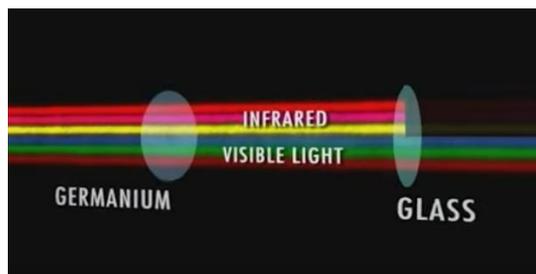


Figura 16-1. Lente de germanio transparente a la radiación

Fuente: <https://isotest.net/productos/mantenimiento-predictivo/>

El Germanio (Ge) que es de alto costo es el material preferido para la construcción de lentes para cámaras termográficas por su robustez y excelentes características transmisivas en toda la

banda espectral de las cámaras IR. Es de anotar que el costo de la óptica de una cámara termográfica está alrededor del 45% del valor de esta en donde el lente principal es el componente óptico de más valor.(HERNANDEZ, 2018)

Diafragma: Es conocido como unidad de apertura y permite seleccionar la cantidad de energía entrante al sistema termográfico, la apertura se selecciona de acuerdo con el nivel de temperatura que se requiere observar.

Filtro: Este permite seleccionar la cantidad de energía infrarroja entrante al sistema termográfico, usualmente es necesario cuando se desea ver y medir las temperaturas en termocuplas de piel de tuvo en los hornos donde es necesario eliminar las perturbaciones de la llama.



Figura 17-1. Energía emitida por el objeto y captada por la cámara termográfica

Fuente: <https://www.eneka.com.uy/instrumentos/cameras-termograficas/industrial/6243-camara-termografica-industrial-flir-e60-detail.html>

1.10.4 *Termogramas*

Los termogramas son imágenes de objetos electrónicamente procesado y mostrado en la pantalla en donde las distintas tonalidades de colores corresponden con la distribución de la radiación infrarroja que emite la superficie del objeto. Con este proceso la persona encargada de tomar las mediciones será capaz de observar la temperatura del objeto mediante termogramas, que corresponde con la energía irradiada procedente de la superficie del objeto.(Lidia, Neita Elkin, 2016, p.77)

1.10.5 *Características técnicas necesarias para operar el equipo termográfico*

La elección correcta de la cámara IR para inspeccionar cada equipo y componente dependen de ciertas características técnicas en la que se va a operar dicho equipo, el medio ambiente en que se desenvuelve, el lugar y el tipo de inspección.

1.10.5.1 *Enfoque*

Los problemas más frecuentes que presentan la mayoría de las mediciones termográficas se dan a causa de capturas desenfocadas. Esto representa tanto para el análisis y para la evaluación termográfica un problema ya que una imagen termográfica desenfocada puede generar una disminución de la temperatura real sobre todo si se está midiendo puntos muy calientes de una superficie (TESTO,2012, Pg. 4)

En los equipos termográficos encontramos diferentes tipos de enfoque que tienen incorporados, entre ellos está el enfoque fijo, enfoque manual y algunos equipos tienen un enfoque automático.

1.10.5.2 *Perspectiva*

Se refiere a mantener la superficie o el objeto de seleccionado lo más grande y visible posible además mantener la perspectiva de la imagen conforme a lo que lo rodea.

1.10.5.3 *Composición*

Es idéntico a capturar una fotografía donde es importante mostrar la relación con el área circundante y tomar en cuenta que se muestre el problema y sus causas.

1.10.5.4 *Rango térmico*

Los sistemas infrarrojos requieren de un rango térmico que son valores mínimos y máximos que una cámara termográfica puede medir con precisión, los objetos que se encuentran fuera del rango pueden ser difíciles de observar además sus mediciones no serán precisas. (Mantenimiento et al., 2017, p.55)

Puede haber confusiones en la temperatura de la imagen, si ponemos un ejemplo de que si el objeto tiene la temperatura más caliente de 200°C y se usa en el equipo un nivel de temperatura que va de -20° a 100°C sólo podremos ver una imagen en blanco en la pantalla de la cámara. El uso de un nivel adecuado de temperatura es primordial ya que proporcionará una mejor imagen para el análisis y para poder encontrar el posible origen del problema. (TESTO,2012, Pg. 6)

1.10.5.5 “Spam” térmico

El Spam térmico en termografía es la diferencia entre el ajuste de temperatura alto y bajo en la captura de una imagen infrarroja. El control del “Spam” puede ser calibrado de manera manual o automática

- Manual: Satura las áreas con temperaturas que pueden ser altas o bajas y no están relacionadas específicamente con el objeto de interés.
- Automático: La ventaja es que los problemas potenciales se pueden ver parcialmente ocultos por altas temperaturas.

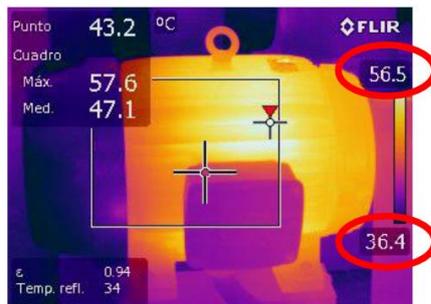


Figura 18-1. Spam térmico (diferencia de temperaturas)

Fuente: Satir Software

1.10.5.6 Nivel térmico

Es el punto medio del “Spam” los lugares calientes sobre las superficies de los elementos que trabajen a un nivel térmico medio o alto se corresponden normalmente entre sí.

1.10.5.7 Ángulo de visión

Básicamente se debe mantener el ángulo de la cámara tan cerca de la perpendicularidad como sea posible además de permanecer atento a la variación de temperatura radiante a causa de:

- Cambios en el ángulo de visión
- Variación de forma de su objetivo.

La emisividad es afectada por el ángulo de visión ya que en una superficie disminuye al aumentar el ángulo de visión con respecto a su normal, y las mediciones de temperatura precisas se logran con ángulos inferiores a 30°. Si se mide con un ángulo de 30° a 60° se introduce un pequeño error a partir de 60° el error se hace más grande.

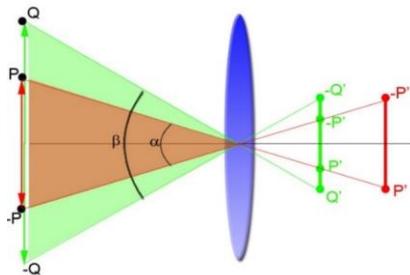


Figura 19-1. Ángulo de visión focal

Fuente: <http://fotoigual.com/7-angulo-vision-distancia-focal-tamano-del-sensor/>

1.10.5.8 *Reflejos*

Cuando ya hayamos identificado un posible problema, este debe ser revisado desde varios ángulos para confirmar que el diagnóstico que se aplicó sea el correcto. Son diversas causas, por las que un problema aparece en una imagen capturada, para poder observarlo desde otro ángulo desaparece o se mueve, esto se lo conoce como reflejos que se evitan moviéndose de un lugar a otro.

1.10.5.9 *Resolución*

Es el menor detalle que puede ser medido ya que un objeto puede ser visto pero puede estar muy pequeño o distante para medirlo con precisión. El tamaño del detector de los lentes y la distancia definen el tamaño mínimo de lo que podemos ver y de lo que podemos medir.

En la figura se indica un punto caliente en una fusilera, pero no se lo puede medir. Al acercarse se puede medir resolviendo en parte el problema de la resolución de medición.

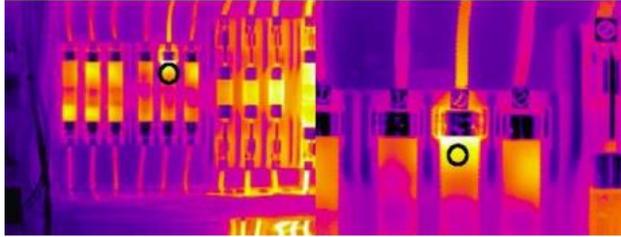


Figura 20-1. Comparación entre distintas resoluciones
Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

La resolución de una cámara infrarroja dependerá del detector, el lente y la trayectoria óptica.

Ejemplos de resolución

- Resolución 120 x 120
- Resolución 120 x 160 (detector)
- Resolución 320 x 240 (lente)
- Resolución 640 x 480 (trayectoria óptica)

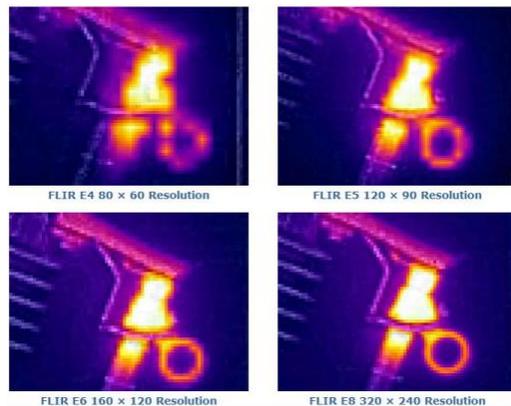


Figura 21-1. Resoluciones de diferentes cámaras termográficas
Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

1.10.6 Tipos de resolución

1.10.6.1 Resolución espacial

En la resolución espacial importa el tamaño del detector de los lentes y las distancias puesto que definen el tamaño mínimo de lo que se puede ver y de lo que se puede medir. (Lidia, Neita Elkin, 2016, p.85)

Generalmente se especifica en radianes y se define como campo de visión instantáneo (instantaneous field of view-IFOV).

1.10.6.2 Campo de visión instantáneo (IFOV)

Es una característica para describir la capacidad de una cámara termográfica para resolver detalles espaciales (resolución espacial). Es equivalente a la proyección de un píxel en la superficie observada y la suma de todos los IFOV's que forma el Campo de Visión (FOV). Cuando se proyecta desde un detector a través de un lente, el campo de visión instantáneo da el tamaño de un objeto que puede verse a una cierta distancia (Mantenimiento et al., 2017, p.50)

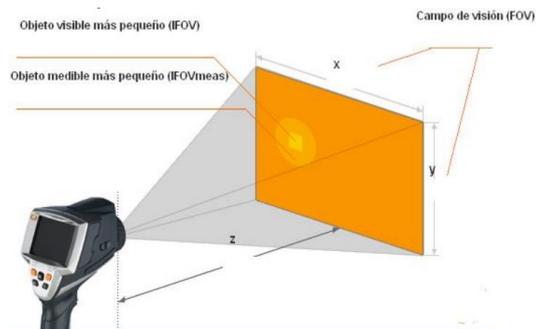


Figura 22-1. Campo de visión instantáneo (IFOV)
Fuente: (HERNANDEZ, 2018)

El IFOV es el campo visual cubierto por cada píxel del sensor, como ejemplo tenemos una cámara Ti400 que tiene una lente con un campo de visión $24^\circ \times 17^\circ$ y un sensor de 320×240 píxeles, lo que determina un IFOV de:

$24^\circ/320 = 0,075^\circ$ píxel o lo que es lo mismo $1,31$ mrad según FLUKE, esto significa que a 1 metro de distancia esta cámara ve objetos tan pequeños como $1,13$ mm de sección

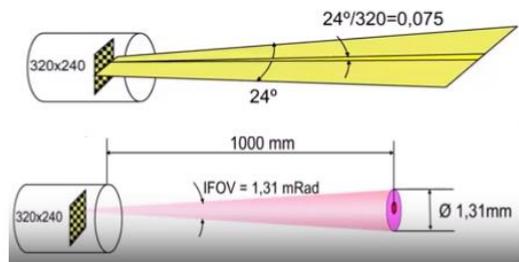


Figura 23 -1. Campo visual cubierto por cada píxel del sensor
Fuente: FLUKE

1.10.6.3 Campo de visión (FOV)

Es una característica que define el tamaño de lo que se observa en la imagen térmica, define el área total que puede ser visto por la cámara. El lente es el componente de mayor influencia en la conformación del (FOV), independientemente del tamaño de la matriz.

1.10.6.4 Resolución de medición

Define al objeto más pequeño del que puede medirse su temperatura con precisión a una cierta distancia. Se puede ver el punto caliente y ser medido. al acercarse se puede medir resolviendo en parte el problema de la resolución de medición.

La resolución de medida de una cámara termográfica describe el tamaño mínimo que debe tener un objeto, para que pueda medirse a una cierta distancia, el (IFOVm) se expresa en radianes, aunque generalmente es tres veces mayor que el campo de visión instantáneo (IFOV). Esto se debe a que una cámara termográfica necesita más información sobre la radiación del blanco para medirlo que para detectarlo. (Mantenimiento et al., 2017, p.58)

1.10.6.5 Distancia

La distancia también se convierte en un factor importante en termografía. Esto está relacionado con dos cosas, primero con la resolución espacial de la cámara y segundo con la condición atmosférica (1 metro). (Lidia, Neita Elkin, 2016, p.85)

El conocimiento de la resolución de su cámara termográfica es importante debido a la capacidad de la cámara para capturar el punto más pequeño en un área de 1 píxel. Se debe acercarse lo suficiente a su objeto para que pueda obtener una lectura correcta.

Relación distancia: Tamaño del objeto: Los errores de medición ocurren cuando el objeto es más pequeño que el área mínima observable, las temperaturas del medio son integradas a las lecturas del instrumento, para eso el termógrafo debe asegurarse de estar a una distancia propia para la medición. (Lidia, Neita Elkin, 2016, p.85)

Foco: El correcto enfoque de la imagen es fundamental para la interpretación de la imagen y la exacta medición de la temperatura del objeto. Un mal enfoque impide distinguir correctamente el objeto bajo observación y distorsiona la emisividad que llega a la cámara atenuándola, por tanto, la temperatura del objeto parecerá menor. En conclusión, un mal enfoque llevará a un diagnóstico erróneo.

Distancia focal: Se debe usar lentes apropiados para la aplicación. Es de gran utilidad, además de contar con el lente estándar de la cámara, tener lentes ángulo ancho y telefotos. Cada lente debe ser calibrado en forma particular a la cámara termográfica. (Mantenimiento et al., 2017, p.58)

1.10.5.6 *Condiciones ambientales*

El medio ambiente donde se realiza las inspecciones de termografía es de suma importancia para evaluar los resultados. La radiación emitida por el sol, el factor de transmisión atmosférica, el viento, la lluvia y la humedad relativa puede afectar la inspección en los motores eléctricos.

Radiación solar: La mayor parte de equipos y componentes al aire libre, están expuestos a la radiación solar, el cual influye de dos formas en una inspección.

Carga solar: La carga afecta a los componentes aumentando la temperatura y dificultando la distinción de un componente defectuoso y uno normal.

El nivel de carga depende de la temporada que se realice la inspección termográfica, se recomienda hacer la inspección en períodos libres de radiación solar, es decir, entre el anochecer y la madrugada, o en días con el cielo nublado en equipos que estén expuestos al aire libre. En la necesidad de llevar a cabo las inspecciones termográficas con días de alta carga solar, el efecto puede ser minimizado mediante la toma de las lecturas de temperatura en contra de la incidencia solar. (Lidia, Neita Elkin, 2016, p.79)

Reflexión solar: La radiación que llega al detector de la cámara en su mayor parte puede provenir de una fuente de calor cercana o de la radiación solar reflejada por la misma superficie del componente. (Ramírez-Arbeláez et al., 2015, p 87)

El brillo del sol incide en la imagen, al no tener la experiencia necesaria se puede diagnosticar situaciones normales como una falla inminente y, por lo tanto, solicitar una parada innecesaria para el mantenimiento urgente.

Para eliminar esta reflexión solar, se recomienda llevar a cabo la inspección en la noche o en días con cielo nublado. Si la inspección se recomienda un cambio de ángulo entre la cámara termográfica y el equipo o componente que se inspecciona, para así eliminar el problema presente. (Ramírez-Arbeláez et al., 2015, p 80)

1.10.5.7 *Temperatura de fondo*

Las cámaras termográficas miden la radiación procedente por los objetos para calcular su temperatura, sin embargo, es la radiación emitida por la superficie del objeto y no la reflejada por el mismo procedente del entorno la que determina su temperatura. Por ello, las cámaras termográficas a través del ajuste del parámetro denominado “temperatura de fondo o del entorno” compensan el efecto de la radiación emitida por el entorno y reflejada en la superficie del objeto.

Enfriamiento: En ambiente con alta humedad producido por las precipitaciones de agua y la alta conductividad térmica del agua, ayuda a disipar el calor producido, el resultado es una reducción considerable de la temperatura del componente que se inspecciona. (Lidia, Neita Elkin, 2016, p.82)

Atenuación: El vapor de agua en la atmósfera provoca una absorción de la radiación infrarroja reduciendo así la transmitancia atmosférica. En caso de neblina, la atenuación es mayor debido a la dispersión de la radiación por las partículas suspendidas en el ambiente. (Ramírez-Arbeláez et al., 2015, p 77)

Se recomienda no realizar inspecciones termográficas bajo niebla, lluvia, llovizna o humedad relativa demasiado alta.

1.11 **Influencia del viento**

El viento es un fluido que, si se mueve en dirección paralela a una superficie y sufre un rozamiento continuo en la zona de contacto, este contacto produce una fuerza de cizallamiento por lo que el perfil de viento mantendrá una forma logarítmica

En el siguiente proyecto el viento a varias escalas de velocidad es indispensable para realizar las mediciones bajo ese parámetro por lo que se debe controlar la cantidad de flujo de aire y su velocidad para ello debemos conocer la escala de viento en la que nos encontramos, con la ayuda de un dispositivo que nos ayudara a medir esta velocidad de viento, se le conoce como anemómetro.(Hernández et al., 2020, p 5)

1.11.1 *Velocidad del viento*

El viento influye en las mediciones en particular sobre superficies expuestas al exterior, como los motores, transformadores, fachadas de edificios, puentes, etc.

La pérdida de calor por medio de convección por influencia del viento puede enmascarar el calentamiento de un elemento defectuoso resultando en los análisis termográficos una temperatura menos a la real por lo que al observarse una temperatura menor se tomara acciones de corrección erróneas.(González & Cordova, 2015, p 43)

Para trabajar con el efecto del viento que puede enmascarar las fallas debe tenerse en cuenta que la temperatura de fondo varía siendo el invierno la estación más favorable y las horas de la noche las que dan mayor contraste en el equipo termográfico con el que se realiza el diagnostico.

1.11.2 *Medición de la velocidad del viento.*

Para poder conocer este parámetro es muy común usar instrumentos como anemómetros que se encarga en medir instantáneamente la velocidad del viento pudiendo ser de un flujo contenido o el flujo del aire atmosférico conocido como flujo no confinado, hay que tomar en cuenta que la variación de flujo de aire repercute en la toma de datos dando solución a este problema tomar un promedio de todos los datos tomados.

Estos datos se obtienen de una simulación de viento generado por un blower y mediante ductos PVC direccionamos el flujo hacia la caja donde será el lugar de pruebas, dicho flujo de aire es medido con un anemómetro, instrumento de medición para detectar la velocidad de aire que corre en determinado lugar. A continuación, se observa el anemómetro de marca EXTECH.



Figura 24-1. Anemómetro EXTECH
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

1.12 Distribuciones estadísticas para el análisis de medidas termográficas

1.12.1 Distribución de Shapiro Wilk

La prueba de Shapiro Wilk es una prueba estadística de normalidad, esta prueba es útil para muestras de tamaño $n \leq 50$ y que dicha muestra sea un tamaño par, seleccionando los datos muestrales aleatoriamente

La hipótesis nula H_0 es la afirmación de que las variables provienen de una distribución normal y en dicha prueba de Shapiro Wilk la Hipótesis nula (H_0) se rechaza cuando el estadístico Shapiro Wilk (W) es menor al valor crítico y se acepta cuando el estadístico Shapiro Wilk (W) es mayor que el valor crítico. (Romero Saldaña, 2016, p.112)

Para la prueba de normalidad de Shapiro Wilk se utilizará la siguiente tabla del cual se obtendrá el estadístico de prueba.

Tabla 4-1: Modelo de tabla para los datos de la prueba de Shapiro Wilk

Listado de temperaturas pares	Coefficiente del par a_i de Shapiro (W)	Dato mayor	Dato menor	Diferencia de datos
Pares	a_i	X mayor	X menor	X mayor - X menor

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

1.12.1.1 *Estadístico de prueba de Shapiro Wilk*

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^k a_i (X_{\text{ultimo}} - X_{\text{primero}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^k a_i (X_i - X_{\text{media}})^2} \quad (12)$$

VC= Valor de tablas de Shapiro-Wilk con tamaño n y α conocidos.

Reglas de decisión

$W < VC$: H_0 se rechaza

$W > VC$: H_0 se acepta

1.12.2 **Distribución T-Student**

La distribución T es una distribución de probabilidad que estima el valor de la media de una muestra pequeña extraída de una población que sigue una distribución normal y de la cual no conocemos su desviación típica.

Para calcular las medidas de temperatura con una muestra menor a 30 valores, misma que se nos hará más fácil para encontrar la media aritmética de esa muestra y encontrar el valor de la desviación estándar de dicha muestra (Romero Saldaña, 2016, p.5)

La distribución T nos permite definir una hipótesis nula o una hipótesis alternativa para decidir el comportamiento de las medias aritméticas de las temperaturas que viene a ser la población
Grados de libertad y significancia

$$g = n - 1 \quad (13)$$

Al tamaño de nuestra muestra le restamos 1

Valor de significancia (α), hay que tomar en cuenta el nivel de confianza y se indica en la siguiente ecuación.

$$NC = 1 - \alpha \quad (14)$$

El nivel de significancia se busca utilizando los grados de libertad para encontrar un valor preciso en la tabla que le corresponde a la distribución T.

Fórmulas para utilizar

$$\text{Error estándar} = E E = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

s: Desviación típica de la muestra

n: Tamaño de la muestra

μ : Media aritmética estimada para la población

$$\text{Distribución T} = \frac{X_{\text{media}} - \mu}{E.E} \quad (16)$$

Para la evaluación se recolecta los datos calculados previamente siendo estos los siguientes.

- Grados de libertad (g)
- Nivel de significancia (α)

Estos dos datos se utilizan para ingresar a la tabla de distribución T y encontrar un valor de α más preciso, este valor representamos en la curva estadística para posteriormente compararlo y verificar si el valor de α calculado está dentro de los valores de α de la tabla, si este es el caso vamos a aceptar el valor de la hipótesis nula y, en caso de que quede dicho valor fuera de los extremos de α de la tabla entonces aceptamos la hipótesis alternativa. (Romero Saldaña, 2016, p.7)

1.13 Regresión exponencial

La regresión exponencial es el proceso mediante el cual se busca una ecuación exponencial la cual se ajuste de la mejor manera a un conjunto de datos, para este proceso utilizamos las siguientes ecuaciones.

La ecuación característica de una función exponencial es:

$$Y = A * e^{BX} \quad (17)$$

Donde realizamos el siguiente proceso para encontrar los valores de A, y B.

$$\text{Ln}(Y) = \text{Ln}(A * e^{BX}) \quad (18)$$

$$\text{Ln}(Y) = \text{Ln}(A) + \text{Ln}(e^{BX}) \quad (19)$$

$$\text{Ln}(Y) = \text{Ln}(A) + BX \quad (20)$$

Sustituimos los valores de la ecuación

$$\text{Ln}(Y) = Y' \quad (21)$$

$$\text{Ln}(A) = A' \quad (22)$$

Finalmente se obtiene las ecuaciones para el cálculo de la ecuación de la función exponencial

$$Y' = A' + Bx \quad (22)$$

$$B = \frac{n(\sum XY') - (\sum X)(\sum Y')}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (23)$$

$$A' = \bar{Y}' - B\bar{X} \quad (24)$$

Tabla 5-1: Modelo de tabla para los datos de la regresión exponencial

X	Y	Y' = Ln(Y)	XY'	X ²
1				
2				
3				
$\sum X$		$\sum Y'$	$\sum XY'$	$\sum X^2$

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

1.14 Regresión lineal

La regresión lineal es el proceso mediante el cual se busca una ecuación lineal la cual se ajuste de la mejor manera a un conjunto de datos, para este proceso utilizamos las siguientes ecuaciones. (Minnaard, 2016,p 32)

La ecuación característica de una función lineal es:

$$y = a + bx \quad (25)$$

Donde realizamos el siguiente proceso para encontrar los valores de a, y b.

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (26)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (27)$$

Tabla 6-1: Modelo de tabla para los datos de la regresión lineal

X	Y	X ²	X*Y
1			
2			
3			
$\sum X$	$\sum Y$	$\sum X^2$	$\sum X*Y$

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

1.15 Unidades a utilizar en este experimento

Tabla 7-1: Unidades a utilizar en el experimento

Magnitud	Unidad
Temperatura	Grados centígrados
Velocidad de viento	Kilómetros/hora
Distancia	Metros
Voltaje	Voltio
Intensidad	Amperio

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Para el cálculo de este experimento se han empleado las unidades más utilizadas en la bibliografía de mantenimiento basado en la condición y termografía infrarroja entre ellos “Termografía, guía de bolsillo” de Testo, en donde las unidades con las cuales se va a trabajar se muestra en la tabla 7-1.

CAPÍTULO II

2. Marco Metodológico y construcción del módulo soplador

Para poder obtener los datos en la presente investigación es necesario el ensamble de un módulo el cual nos permita direccionar un flujo de viento a distintas velocidades sobre una superficie caliente con una temperatura estable, de esta manera se realizará las medidas termográficas sometidas a varias escalas de velocidad de viento para después poder comparar las medidas y así encontrar una ecuación de corrección para las temperaturas termográficas, sabiendo que se debe tomar en cuenta las variables extrañas que, en el presente proyecto se tiene que controlar, factores como la humedad del ambiente la emisividad del cuerpo a ser medido y la corriente de aire presente en el ambiente en donde se realiza las mediciones de prueba para ello elaboramos una planificación del diseño experimental que se detalla a continuación.

2.1 Planificación del diseño experimental

2.1.2 *Formulación de hipótesis*

Las corrientes de viento al estar en contacto con una superficie que se encuentra a diferente temperatura crean una capa entre la cámara termográfica y la superficie que está siendo medida, generando una distorsión en la lectura de la temperatura por termografía infrarroja.

2.1.3 *Selección de la variable independiente y dependiente adecuada*

2.1.3.1 *Variable dependiente:* Medidas de temperatura de la resistencia

2.1.3.2 *Variable independiente:* Velocidad del viento.

2.1.4 *Control de las variables incidentes*

Las variables extrañas que interfieren en la toma de datos pueden generar errores en los resultados a corregir en este caso se verá afectada la ecuación de corrección de temperatura tomada por termografía infrarroja e incluso se puede dar la nulidad de la investigación por lo que se debe controlar obligatoriamente estas variables

- Humedad
- Corrientes de viento del ambiente.

- Emisividad.
- Reflejo de rayos lumínicos.

2.1.4.1 *Control de la humedad*

En el desarrollo del proyecto usamos un soplador para generar viento por medio del aire, dicho aire sale impulsado por los álabes del soplador o blower mismo que es direccionado por ductos de material de cloruro de polivinilo (PVC), este flujo de aire saliente es comprobado que es relativamente seco para el desarrollo de la investigación

2.1.4.2 *Control de las corrientes de viento del ambiente*

El control de las corrientes de aire extrañas al módulo soplador se realizará por medio del sellado hermético que presenta el gabinete metálico en el cual está alojado nuestro objetivo de prueba que es una resistencia, este gabinete cuenta con una entrada de aire directamente del soplador y un conducto por donde el aire saldrá del interior.

2.1.4.3 *Control de la emisividad*

El objeto de prueba es una resistencia el cual tiene un cuerpo de acero inoxidable, el cual tiene una emisividad inferior al 0,5 con lo cual las medidas de temperaturas en los termogramas tendrán una alteración en su exactitud, para ello se ha recubierto el cuerpo de la resistencia junto con el sensor de temperatura con un recubrimiento de polivinilo termo retráctil ya que al ser un polímero, su valor de emisividad está en 0,95 mismo que se indica en la tabla 1-2 y de esta la corrección del valor de emisividad en los termogramas tendrá como resultado valores de temperatura más exactos.

2.1.4.4 *Control del reflejo de rayos lumínicos adicionales del medio*

Para evitar la reflexión térmica de otras fuentes de calor se pintó la base de la resistencia con pintura de color negro, así también la posición de la cámara termográfica se realizará de manera perpendicular a la resistencia con ello se evita el reflejo térmico de fuentes de calor externas al módulo soplador.

2.1.5 ***Manipulación de la variable independiente y registro de la variable dependiente***

La variable independiente de este trabajo investigativo se realizará de acuerdo con las escalas establecidas, estas escalas empiezan desde cero como valor inicial sin la presencia de corrientes de viento, su siguiente escala es el valor de 1,4 km/h ya que es el valor mínimo el cual puede medir el anemómetro a utilizar el cual es un modelo 45170 de la marca EXTECH Instruments.

De esta manera manipulando el módulo soplador por medio del control de la velocidad del motor también controlamos la velocidad del viento ya que el ducto por donde fluye el viento va a ser de un diámetro fijo y no presentaría mayor problema en el control de la velocidad del viento en el módulo soplador.

2.1.6 *Análisis estadístico de los datos*

El análisis estadístico de los datos se lo realiza una vez obtenido las medidas termográficas que con la utilización del módulo soplador aplicando al objeto de prueba caliente distintas velocidades de viento mismas que serán aplicadas a comparaciones mediante la distribución normal de Shapiro Wilk y T Student que más adelante se desarrollará.

2.1.7 *Inferencia de la relación entre las variable dependiente e independiente*

En este punto se ha escogido una muestra de datos para sacar una media muestral, los mismos que consisten en seleccionar aleatoriamente, pero de forma creciente frecuencias para el funcionamiento del motor, mismo que acciona a un soplador y genera un viento controlado.

Una vez funcionando el motor del soplador a cierta frecuencia en Hertz, también se toma nota de las velocidades de viento que puede generar cierto valor de frecuencia como se muestra en la tabla siguiente, que para cada valor de frecuencia le pertenece un valor de velocidad de viento.

Tabla 1-2: Muestra de frecuencias y velocidades de viento

Frecuencia (Hertz)	Velocidad de viento generado (km/h)
0	0
11,44	1,5
15,24	3,4
19,5	4,3
22,86	5,6
26,62	6,6
30,48	7,7

34,29	8,9
38,1	10,4
41,9	11,6
45,62	12,9
49,53	14,4
53,34	15,6
54,7	16

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2. Diseño y ensamble del módulo soplador

El módulo que va a generar los datos a estudiar tiene que cumplir con los requerimientos apropiados para su efectivo funcionamiento por lo que en parte del siguiente capítulo se detalla la construcción y ensamble del módulo soplador.

2.2.1. Estructura del módulo de pruebas.

La estructura del módulo soplado se construyó de manera que se distribuyan adecuadamente todos los elementos necesarios para poder cumplir la funcionalidad del experimento a desarrollar, para ello se eligió como material piezas de tubo cuadrado de 2,5cm en todos sus lados y de 2mm de espesor, en la parte inferior a 15cm del suelo se coloca una placa de acero de 7mm de espesor ya que es donde se alojara el motor-soplador considerando su peso dentro de la estructura, el modelo se observa en la figura 1-2.



Figura 1-2. Estructura del módulo de prueba

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.2. Sistema de control y potencia para el módulo experimental.

En el circuito eléctrico de mando y potencia se detallan los elementos presentes dentro del módulo soplador representados de manera gráfica junto con la interconexión de cada uno de los componentes

El circuito de potencia se encuentra diseñado en la imagen a continuación, el cual es el encargado de recibir y ejecutar las señales enviadas desde el circuito de mando.

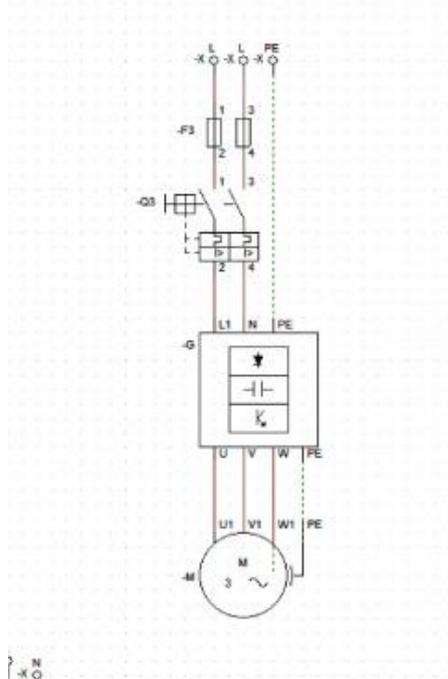


Figura 2-2. Diseño del esquema de potencia para el motor utilizado en el módulo

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

El circuito de mando se encuentra detallado en la imagen a continuación, trabaja con la misma tensión del circuito de potencia y es quien envía las señales al circuito de mando

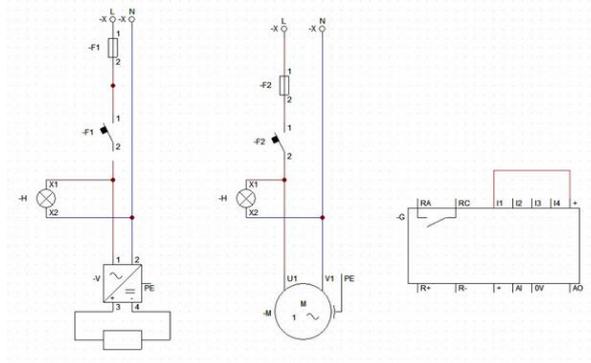


Figura 3-2. Esquema del circuito de mando del módulo soplador
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.3 Tablero de control para el funcionamiento del módulo experimental

En el tablero de control se alojan todos los elementos maniobra, protección, control y señalización, así también las conexiones entre estos elementos por ello su adecuada selección es importante para la correcta distribución de estos elementos en su interior, tomando en cuenta las dimensiones de los dispositivos como relés de protección, fusibles, variador de frecuencia las bornera y sus canaletas se ha decidido seleccionar un tablero de control con su respectivo gabinete de 0,30 m de ancho, 0,40 m de alto y 0,20 m de profundidad.

2.2.3.1 Protecciones eléctricas para el circuito de mando del experimento

La protección utilizada contra sobrecargas para el variador de frecuencia es un relé termo magnético el cual presenta las siguientes características.

Tabla 2-2: Datos técnicos del relé termomagnético

Datos Técnicos del Relé Termo magnético	
Marca	LS
Modelo	BKN
Voltaje	400 V
Intensidad	4 A

Frecuencia	60Hz
------------	------

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

La protección utilizada contra cortocircuitos para el variador de frecuencia es un fusible cilíndrico colocado en una porta fusible para riel DIN el cual presenta las siguientes características.

Tabla 3-2: Datos técnicos de fusible cilíndrico

Datos Técnicos del Fusible Cilíndrico	
Marca	EBASEE
Modelo	10X38
Voltaje	500 V
Intensidad	2 A

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4 Fuente de poder regulable

La fuente de poder es la encargada en transformar la corriente alterna en corriente continua, posee una regulación de corriente y tensión, desde de hasta 2 amperios y 15 voltios regulables con lo cual puede darse valores específicos de potencia hacia la resistencia colocada en el modulo

Tabla 4-2: Datos técnicos de la fuente regulable

Datos Técnicos de la Fuente Regulable	
Marca	BAKU
Modelo	BK-1502DD
Voltaje de entrada	110 V
Voltaje de salida	0-15 V
Intensidad de entrada	A
Intensidad de salida	A
Frecuencia	60 Hz

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4.1 Motor eléctrico para el experimento

El motor eléctrico es el encargado de entrar la fuerza motriz al soplador, puesto que del motor no se necesita un cálculo de potencia, más bien su función es realizar un control de velocidad por lo que se ha seleccionado un motor con las características detalladas en la tabla 12-3.

Tabla 5-2: Datos técnicos del motor eléctrico utilizado en el modulo

Datos Técnicos del Motor Eléctrico	
Marca	WEG
Modelo	0295AA54205
Potencia	0,33HP
rpm	1100
Voltaje	220 V
Conexión	Estrella
Intensidad	2,43 A
Frecuencia	60Hz

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4.2 Variador de frecuencia

El variador de frecuencia permite realizar un control de la frecuencia suministrada al motor con el fin de variar su velocidad y con ello tener el control requerido en la velocidad del viento suministrado por el módulo soplador, las características de este variador deben ser acordes al motor que se va a ocupar las cuales se detallan en la tabla 13-3 mostrada a continuación.

Tabla 6-2: Datos técnicos del variador de frecuencia utilizado

Datos Técnicos del variador de frecuencia			
Marca	KINCO	Intensidad de entrada	5,3 A
Modelo	CV20-004G	Intensidad de salida	2,5 A

Potencia	400 W	Frecuencia de entrada	50/60 Hz
Voltaje de entrada	220/240 V	Frecuencia de salida	0-300 Hz
Voltaje de salida	220 V	Serie	30131119046002

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4.3 Luces piloto para señalización del funcionamiento del módulo

La luz piloto es un aparato de señalización el cual indica que proceso está realizando el variador, indica si el variador de frecuencia junto con el motor eléctrico se encuentra energizados, en funcionamiento o fuera de servicio, tales luces piloto son de color verde (energizado) y el otro de color rojo que indica que se encuentre parado por emergencia, estos aparatos de señalización tienen las siguientes características.

Tabla 7-2: Datos técnicos de luces piloto utilizadas

Datos Técnicos de Las Luces Piloto	
Marca	CAMSCO
Tensión	110-120 V
Intensidad	A
Color	Verde - Rojo

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4.4 Selección del Paro de emergencia

El paro de emergencia permite impedir el paso de la corriente hacia el motor eléctrico al mandar una señal al variador de frecuencia, con esto se permitirá tener un dispositivo de protección ante sucesos no deseables precautelando así la integridad de las personas trabajen en el módulo, las características de este paro de emergencia son.

Tabla 8-2: Datos técnicos del ventilador para el motor.

Datos Técnicos del paro de emergencia	
Marca	CAMSCO
Tensión	110 V

Intensidad	3 A
Velocidad	rpm

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.4.5 Selección de las borneras

Son elementos de conexión entre dos conductores, que permite el paso de la corriente de uno a otro al ser ajustado dentro de un cuerpo metálico por un tornillo, estos elementos van colocados de manera continua sobre un riel DIN, las borneras presentan las siguientes características.

Tabla 9-2: Datos técnicos de borneras utilizadas.

Datos Técnicos de las borneras	
Marca	LEGRAND
Tensión	600 V
Intensidad	2.5 A
Calibre de conductor	22-12 AWG

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.5 Gabinete de control para el módulo soplador

El gabinete de control está dimensionado de acuerdo con las medidas de los aparatos que van instalados en su interior, para ellos se detallan las dimensiones de los dispositivos alojados en el gabinete en la tabla 17-3.

Tabla 10-2: Medidas de los dispositivos en el tablero de control.

Orden	Descripción	Medidas		
		Altura	Ancho	Profundidad
1	Variador Kinco	151 mm	100 mm	128 mm
2	Protección termo magnética	82 mm	37 mm	57 mm

3	Borneras	53 mm	5 mm	47 mm
4	Porta fusibles	20 mm	78 mm	62 mm

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.2.6 *Ensamble del sistema de transmisión por banda para el motor del experimento*

En vista a la necesidad del módulo en generar viento a través de un soplador se optó por hacer un acoplamiento de transmisión por banda motor soplador, donde se toma en cuenta las dimensiones del motor eléctrico y del soplador q se va a utilizar dentro del módulo, así también como la definición del espacio adecuado que se va a ocupar en el montaje de estos equipos

Previamente conociendo las dimensiones del motor eléctrico y del soplador además del espacio entre ellos para la colocación de la banda se llega a la conclusión que se necesita un espacio de 0,40 m por el frente y 0,30 m por los lados (40cm X 30cm).

2.3 **Construcción y ensamble del módulo soplador**

Una vez realizado el modelado y dimensionamiento de la estructura del módulo soplador procedemos a la construcción de este, para lo cual se toma en cuenta una serie de pasos a seguir, así como las precauciones que hay que tener en el proceso de construcción de la estructura.

2.3.1 *Herramientas y materiales para la construcción de la estructura del módulo*

A continuación, se detalla las herramientas, materiales para la construcción del módulo soplador

2.3.1.1 *Herramientas*

Las herramientas que se utilizan básicamente ayudan al desenvolvimiento de la construcción de dicho módulo de manera correcta cumpliendo normas técnicas y de seguridad

Tabla 11-2 Lista de herramientas para la construcción de la estructura del módulo de pruebas

Nº	Descripción
1	Escuadra

2	Flexómetro
3	Rayador
4	Piqueta
5	Cepillo de alambre
6	Pinzas
7	Martillo

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.1.2 Máquinas herramientas

Las maquinas herramientas son de gran ayuda para realizar actividades de corte y desbaste con mucha facilidad, las máquinas herramientas detalladas en la tabla 19-3 son utilizadas para construcción de la estructura del módulo soplador.

Tabla 12-2: Lista de máquinas herramientas para la construcción de la estructura del módulo de pruebas

N°	Descripción
1	Taladro
2	Amoladora
3	Soldadora eléctrica
4	Compresor de aire

Fuente: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.1.3 Materiales y construcción de la estructura del módulo soplador

Los materiales utilizados para construcción de la estructura del módulo soplador se eligieron de manera que soporte las vibraciones del motor utilizado, es decir un material resistente, pero de bajo peso como lo es el acero carbonado, los materiales utilizados en la construcción del módulo soplador experimental se detallan en la tabla 20-3, así también hay materiales consumibles como los discos de corte que van incorporados con la amoladora , electrodos 6011 utilizados para la soldadora eléctrica y otros que se detallan en las tablas más adelante

Tabla 13-2: Lista de materiales para la estructura del módulo de pruebas

N°	Descripción
1	Tubo cuadrado de acero
2	Platina 10 x 3 mm de acero laminado
3	Tol de 1 mm
4	Angulo de 25 x 2 mm acero
5	Pintura color negro
6	Tiñer
7	Electrodos E6011
8	Pernos, tuercas, tornillos

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.1.4 Construcción del módulo soplador paso a paso

Con los materiales y maquinas herramientas así también las herramientas manuales establecidas para el proceso de construcción se realiza las siguientes actividades:

- 1.- Medición y señalización del tubo cuadrado de acero acorde a las medidas indicadas anteriormente.
- 2.- Se procede a cortar el tubo cuadrado de acero por partes para obtener las piezas necesarias para el armado de la estructura metálica para el módulo soplador. Para esta actividad se utiliza la cortadora y amoladora con su respectivo disco de corte de metal. En esta actividad se debe tener en cuenta la seguridad ya que hay presencia de varias situaciones subestándares
- 3.- Una vez ya obtenidos las piezas correspondientes se ubica en las posiciones adecuadas y con los ángulos correctos de los pedazos de tubo cuadrado de acero para ello se utiliza el flexómetro, la escuadra y se procede a la siguiente actividad
- 4.- La siguiente actividad consiste en unir los pedazos de tubo de acero mediante fusión eléctrica esta suelda se lo realiza provisionalmente para poder realizar ajustes de encuadramiento de la estructura.
- 5.- En este paso se realiza la unión de la estructura mediante suelda eléctrica reforzando las medidas provisionales, obteniendo la estructura armada

6.- A continuación, se procede al pulido total de la estructura del módulo soplador, para esta actividad se utiliza también la amoladora, pero con el disco pulidor, también se debe tomar en cuenta el salto de limalla caliente por lo que es necesario la utilización de gafas protectoras o faciales en el mejor de los casos, así como también guantes y calzado apropiado, tener en cuenta el medio en el que se realiza esta actividad es decir libre de productos inflamables.

7.- Posteriormente se realiza un fondeado con pintura anticorrosiva al módulo soplador de manera que a más de verse estético se encuentra protegido de agentes corrosivos.

8.- Se localiza y señala los puntos exactos donde serán perforados para la unión de los gabinetes al módulo mediante pernos y tuercas. Para esta actividad se utiliza el flexómetro, escuadra, taladro con su respectiva broca, de igual manera se debe tomar en cuenta la seguridad en este ambiente de trabajo que conlleva a la utilización de los equipos de protección personal.

2.3.2 Construcción del base motor soplador

Para la construcción del base motor soplador que llevara una transmisión por banda, debido a que estos equipos ejercerán una fuerza en la base, como tal se escogió una placa de acero al carbono de 7mm, gracias a su grosor evitamos flexiones en la placa base y la producción de vibraciones y ruidos desagradables además que se evita cualquier tipo de desajuste

2.3.2.1 Anclaje del motor y soplador en la base

La base de anclaje de estos equipos consiste en una placa de acero al carbono laminado de 7mm de espesor, misma que se ubica en la base inferior de la estructura, esta ubicación nos ayuda a la estabilización del módulo ya que en ese punto está el mayor peso y sostiene a toda la estructura a lo alto.

Esta placa de acero mencionada lleva agujeros en los puntos exactos donde se unirá los equipos a la base por medio de pernos, dejando una fuga en los agujeros que servirán para el temple de la banda y su alineación correspondiente.



Figura 4-2. Ubicación del motor soplador en la base

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.2.2 Montaje del sistema de transmisión por banda

El montaje consiste en hacer los ajustes necesarios en los equipos anclados para su fijación además se toma en cuenta la distancia que hay entre las poleas del motor y del soplador que es aproximadamente de 30 cm, medida que será ajustada según el temple de la banda que incide en pocos milímetros, además las poleas insertadas en el motor y en el soplador deberán alinearse, puesto q la distancia entre poleas es mínima esta alineación no presenta mayor inconveniente en realizarla.

2.3.3 Ensamble de tablero eléctrico

Las herramientas, equipos, materiales, instrumentos y demás componentes que se detallan a continuación son necesarios para el montaje adecuado del tablero de control correspondiente al módulo soplador en donde se fija las canaletas y los rieles sobre la base del tablero para poder montar los dispositivos con facilidad y seguridad, teniendo precaución con las mordeduras de las pinzas o herramientas que tengan un filo cortante, en la figura 26-3 se indica el resultado.



Figura 5-2. Tablero de control del módulo soplador ensamblado.

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.3.1 Herramientas

Las herramientas que se detallan a continuación son necesarias para el montaje adecuado del tablero de control correspondiente al módulo soplador

Tabla 14-2: Lista de herramientas manuales utilizadas en el ensamble del módulo de pruebas

N°	Descripción
1	Destornilladores
2	Pinza
3	Alicate
4	Flexómetro
5	Escuadra
6	Peladora de cable
7	Ponchadora de cable
8	Arco de sierra
9	Llave combinada

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.3.2 Máquinas herramientas

Las maquinas herramientas detalladas son utilizadas para el montaje del tablero de control

Tabla 15-2: Lista de herramientas para el montaje del tablero de control

N°	Descripción
1	Taladro
2	Pinza

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.3.3 Instrumentos de medida eléctricos

Los instrumentos de medida que se utiliza en el desarrollo del experimento son necesarios para la medición de magnitudes ya sean eléctricas como la tensión, la corriente, la resistencia que se utiliza en el módulo soplador, así como magnitudes de temperatura y de velocidad de viento que también son necesarios para el registro de datos de medidas de temperaturas y medidas de velocidades de viento, a continuación, se indica en la tabla 23-3 los instrumentos de medida

Tabla 16-2: Lista de instrumentos de medida

N°	Descripción
1	Multímetro
2	Pinza amperimétrica
3	Comprobador de voltaje
4	Conectores

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.3.4 Materiales

Tabla 17-2: Lista de materiales para el tablero de control.

N°	Descripción
1	Bornera
2	Riel DIN
3	Pernos con tuerca
4	Cable flexible N° 16 y 14
5	Terminales

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.3.5 Montaje del variador de frecuencia

Una vez conocido los datos del variador de frecuencia que se va a utilizar en el módulo soplador cumpliendo con las características de uso que se le va a dar procedemos a realizar el montaje de este, dentro de la caja de protección, sujetándolo sobre rieles colocados en la caja.





Figura 9-2. Cableado de la caja de control para el módulo soplador.

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.7.1 Acoplamiento de la base para la fijación de la resistencia

La fuente generadora de calor que se utiliza en el módulo de pruebas consiste en la conexión de una resistencia con una termocupla unidos, mismos que deberán fijarse al centro de la caja de protección, para realizar esta fijación se adapta un soporte a la base de dicha caja.

La adaptación del soporte nos brinda fijación del objeto de prueba (resistencia), y con la fijación logramos datos más precisos además que tratamos de evadir los reflejos de calor, esto podría representar imprecisiones en las medidas de temperatura tomadas con la cámara termográfica, a continuación, se indica en la figura la adaptación de dicho soporte para el objeto de prueba y el sensor de temperatura.

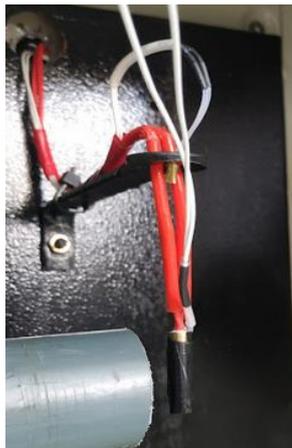


Figura 10-2. Fijación de resistencia mediante un soporte adicional a la base

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.7.2 Conexión de los conductores de la resistencia hasta la fuente de poder

Para la alimentación de la resistencia ya mencionada que es la que va a generar el calor se usa una fuente de poder, mismos datos de esta fuente se encuentra especificado en la tabla 1-2.

Se escogió esta manera de alimentar el objeto de prueba ya que para estabilizar la temperatura generada es necesario fijar los valores de corriente (A) y de tensión (V), mismos que se logra con el control de la fuente de poder.

2.3.8 Ensamble de conducto de aire del soplador hacia el objeto de prueba

Ahora, para direccionar el flujo de aire proveniente del soplador se utiliza 2 codos PVC de 2 in y un tubo con las mismas especificaciones que los codos con una longitud de 85cm además se utiliza acoples para tubo de dicha medida y poder fijar los tubos a la caja donde se encuentra el objeto de prueba, a continuación, se muestra el resultado de este acople de tuberías.



Figura 11-2. Conducto de aire ensamblado

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.3.9 *Vista final del módulo soplador*

En la siguiente imagen se puede apreciar el resultado final después de la construcción de la estructura metálica como base para su posterior ensamble de los gabinetes correspondientes al tablero de control y el objeto de prueba donde el gabinete que contiene el objeto de prueba está conectado por un ducto PVC con un soplador y su motor correspondiente.



Figura 12-2. Diseño final del módulo soplador
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.4 **Pruebas de funcionamiento del módulo soplador**

2.4.1 *Prueba piloto del motor*

La prueba piloto del motor eléctrico utilizado en el módulo experimental consiste en realizar un arranque de forma directa con una conexión estrella que se considera un arranque suave en la cual se podrá observar su correcto funcionamiento bajo los parámetros que indica la placa.

2.4.2 *Pruebas piloto del variador de frecuencia*

Otro dispositivo indispensable en el experimento es el variador de frecuencia que necesariamente se debe garantizar su correcta funcionalidad por lo que se realiza las pruebas piloto que básicamente consiste en realizar la conexión del motor al variador y realizar la programación del variador para realizar un arranque controlado desde el panel del variador a valores arbitrarios de

frecuencia desde 0 Hz hasta los 200Hz, esta programación se realizará bajo los siguientes parámetros propios del variador

2.4.3 *Pruebas piloto de la fuente de poder*

Las pruebas de la fuente de poder consisten en regular su voltaje y comprobar con un multímetro adicional el valor de tensión o intensidad que genera la fuente, así mismo alimentar la resistencia con el voltaje e intensidad que requiere (2.2 V y 0,56 A) y comprobar la funcionalidad que requiere el experimento

2.4.4 *Cartucho calefactor como objeto de prueba*

En la siguiente figura (37-2) se muestra una resistencia en forma de cartucho el cual cumple con la función de objeto de prueba en el experimento, esta resistencia tiene un valor de $100\text{k}\Omega$ y está conectada a una fuente de poder con valores de voltaje considerado para el experimento de 2,4 V e intensidad con un valor de 0,54 A, mismos que fueron seleccionados para alcanzar una temperatura de $113\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin ninguna corriente de viento en el medio en el que se realiza el experimento.



Figura 13-2. Resistencia como objeto de prueba de medición
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.4.5 *Sensor de temperatura (Termistor)*

Para censar la temperatura generada en la resistencia se utiliza un termistor, mismo que su funcionamiento consiste en dos conductores unidos al final por un cristal, que al recibir un valor de voltaje el conductor se calentara y enviara señales a un procesador, en el caso de este experimento se utiliza una tarjeta Arduino, de esta manera se hará visible la temperatura en un valor numérico por medio de la conexión de una pantalla digital a la misma tarjeta Arduino

como salida, esto nos facilita a la comprobación y registro de datos para la presente investigación



Figura 14-2. Termistor
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

2.4.6 *Conexión con Arduino*

Para poder medir la temperatura que se encuentra en el objeto de prueba (resistencia) se conecta un sensor de temperatura explicado anteriormente con la tarjeta Arduino y esta tendrá una salida hacia una pantalla LCD donde indicará la temperatura censada, a continuación, se indica la conexión correspondiente a lo explicado,

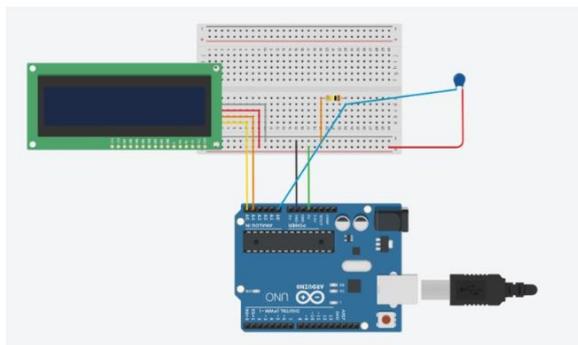


Figura 15-2. Conexión de tarjeta Arduino con sensor y pantalla
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

La programación para que la tarjeta pueda cumplir la función que requiere el experimento se indica en el anexo (A)

2.5 **Datos técnicos de la cámara termográfica a utilizar.**

En la tabla 18-2 se indica los datos técnicos de la cámara infrarroja que se utiliza en las mediciones del experimento para la investigación de datos termográficos de un objeto de prueba con superficie caliente y sometida a varias velocidades de viento.

Tabla 18-2: Ficha técnica de la cámara termográfica SATIR

CAMARA TERMOGRÁFICA SATIR HotFind -VR	
N. SERIE 26020057	
FOV/Min Distancia de enfoque	20°rad X 15/0.1m
resolución espacial	2.2 mrad
Sensibilidad térmica	≤ 0.08°C @ 30°C 100mk
Tipo de detector	UFPA Microbolómetro refrigerado
Resolución	160 X 120
Enfoque	Manual
Modo de imagen	IR, Digital, fusión de imagen, Picture in Picture, Auto Blend
Rangos de medida	±20°C, + 250, hasta +1500C (opcional)
Precisión	±2°C, ± 2% de las lecturas.
Modos de medición	4 puntos movibles, detección automática de puntos fríos o calientes, 5 áreas, línea de perfil, isotermas.

brújula electrónica	Incorporada
Rango espectral	8-14μm

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

CAPÍTULO III

3 MEDICIÓN ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1 Procedimiento de medición

Para poder realizar el proceso de medición hay una serie de pasos previos que se debe realizar antes de hacer las capturas termográficas mismas que van en el orden siguiente.

3.1.1 *Revisión del estado del módulo soplador*

Antes de energizar el módulo soplador se debe realizar una revisión del estado físico de la protección y los componentes del módulo soplador, asegurarse que no existan conductores sueltos y objetos dentro del sistema de transmisión por banda y a al ducto de salida de aire, que puedan afectar al funcionamiento en caso de que una de estas presente una avería se debe realizar el mantenimiento necesario.

3.1.2 *Conexión a la red de alimentación*

Se deben conectar los cables de alimentación del módulo soplador a la red de 110V y 220V lo cual alimentará a la fuente de poder y al ventilador para la refrigeración el motor, el cable de alimentación a la red de 220 voltios a su vez alimentará al variador de frecuencia del módulo.

3.1.3 *Encendido de la fuente de poder*

La fuente de poder se alimentará con las protecciones de color azul, una vez energizada se encender ala fuente de poder desde su botón de encendido, se regulará la corriente a 0,58 A y el voltaje a 2,2 V. Una vez se ha encendido la fuente de poder se debe esperar un lapso de cinco minutos para que la temperatura de la resistencia la cual es el objeto de prueba se estabilice.



Figura 1-3. Fuente de poder con los valores de intensidad y corriente a usar en el experimento

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.4 Encendido del variador de frecuencia

El variador de frecuencia se alimentará con las protecciones de color naranja, y se controlará al motor desde el panel del variador de frecuencia.



Figura 2-3. Puesta en marcha del variador de frecuencia

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.5 Carga de la batería de la cámara termográfica

Al ser un instrumento de medición la cámara termográfica debe tener su batería cargada por al menos dos horas o hasta que el cargador de la batería tenga su indicador en color verde.

3.1.6 Encendido y calibración de la cámara termográfica

Para el correcto manejo de la cámara termográfica se deberán reconocer los botones que este equipo tiene los cuales están detallados a continuación.

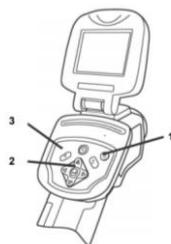


Figura 3-3. Partes importantes de la cámara para su configuración.

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

- 1 botón de encendido

2 teclado

Incluye

- Tecla de ajuste automático
- Tecla de cancelación
- Tecla de congelación / en vivo
- Tecla de menú (entrar) y
- 4 teclas de dirección.
- 3 led de encendido

3.1.7 *Encendido de la cámara termográfica*

Para el encendido de la cámara termográfica se deberá sujetar con firmeza el mango del instrumento y con cuidado abrir el monitor LCD, se pulsará el botón de encendido y se verificará el nivel de carga de la batería, a su vez se revisará que la cámara cuente con una tarjeta SD para el almacenamiento de la información.

La calibración de la cámara termográfica es el procedimiento más importante dentro de este experimento ya que al no estar realizado de manera correcta puede dar valores erróneos de temperatura, para ello se debe seguir rigurosamente los siguientes pasos.

3.1.8 *Selección del IR/Visible*

Entrar al menú principal de la cámara y con la tecla “Enter” se seleccionará la cuarta opción que permite editar el IR/Visible, en el cual se seleccionará con la misma tecla el modo (Mix) con un porcentaje del 100%, que permitirá visualizar el termograma y la vista normal de los objetos, para regresar al menú principal se presionará la tecla “C”.



Figura 4-3. Configuración del Infrarrojo (IR) de la cámara
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.9 *Enfoque de la cámara termográfica*

Para realizar el enfoque de la cámara termográfica se retirará la tapa del lente de la cámara termográfica,



Figura 5-3. Enfoque de la cámara termográfica con el objeto de prueba
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.10 *Ajuste del Spam*

Para realizar el ajuste del Spam y una vez se haya realizado el enfoque de la cámara termográfica se presionará la tecla con la letra “A” la cual realizara un ajuste de manera automática del Spam del termograma.



Figura 6-3. Ajuste del Spam térmico de la cámara
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.11 *Ajuste de la emisividad*

Para el ajuste de la emisividad se entrará al menú principal, se seleccionará los siguientes botones

Además, revisar que la emisividad de la cámara termográfica nos marque un valor de 0,95.



Figura 7-3. Configuración del ajuste de la emisividad en la cámara termográfica SATIR

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.12 Selección del punto 1 en el termograma

Para seleccionar un punto dentro del termograma se debe ingresar al menú principal y se selecciona "Analysis", en el caso de existir otros puntos o líneas que se encuentren programados de análisis anteriores con las teclas de dirección se ubicara en "Remove" se dará "Enter" hasta que todos los puntos y líneas se hayan seleccionado.

Una vez se haya realizado este procedimiento en el menú de "Analysis" se seleccionará la opción "Punto" y se escogerá el punto 1, se presionará la tecla "C" hasta regresar al menú principal para continuar con la configuración.



Figura 8-3. Selección del punto en el termograma de la cámara termográfica SATIR

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.1.13 Selección del rango de temperatura

La selección del rango de temperatura de la cámara termográfica esta seleccionada por la temperatura a la cual se encuentra el objeto de prueba, para ellos se selecciona el rango desde 20 °C hasta 250 °C para ello se entra en el menú de “Analysis” y con la tecla “Enter” se selecciona la opción “” en donde se selecciona el rango necesario para este experimento.



Figura 9-3. Selección del punto en el termograma de la cámara termográfica SATIR

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Una vez se haya realizado este procedimiento la cámara termográfica se encuentra lista para realizar el experimento.

3.2 Desarrollo del experimento

3.2.1 Toma de temperaturas iniciales

Una vez que el módulo esté listo para realizar el experimento, comenzamos con la toma de datos tanto de temperatura como de velocidad de viento según la regulación del variador de frecuencia, dichos datos se indicarán más adelante.

Para medir la temperatura con la que se encuentra el objeto de prueba se usa un sensor de temperatura (termistor) mismo que va conectado a una placa Arduino UNO y de esta manera se observa en una pantalla LCD que va empotrada en el gabinete de control.

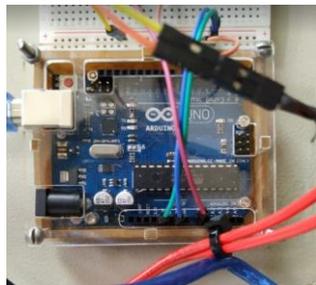


Figura 10-3. Tarjeta Arduino Uno

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.2.2 Medición de la velocidad del viento generado por el módulo soplador

Para conocer el valor de la velocidad del viento se utilizó un anemómetro, el cual es de marca EXTECH INSTRUMENTS 45170 4-en-1 meter measures (Velocidad de aire, humedad relativa, temperatura y nivel de luz) de este dispositivo entrega valores en km/h ,empezando las pruebas desde una corriente de viento igual a cero, incrementando a la velocidades de viento más baja la cual puede ser medida con este instrumento el cual es el valor de 1,5 km/h y después incrementando en los valores siguientes establecidos para el experimento mismos que se indicaran más adelante.



Figura 11-3. Medición de la velocidad del viento generado por el módulo soplador

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

A continuación, se observa en la imagen el anemómetro, instrumento con el que se realizó la medición de la velocidad del viento que cubre la superficie del objeto de prueba



Figura 12-3. Anemómetro EXTECH

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.2.3 *Determinación de la velocidad del viento en el experimento*

A medida que se ajusta el variador de frecuencia se obtiene diferentes escalas de velocidades de viento, en el experimento se empieza desde una frecuencia de cero.

A continuación, se indica en la figura 8-3 la determinación de las velocidades de viento con relación a la frecuencia del motor soplador como ejemplo regulamos una frecuencia a 36,20 Hertz y obtenemos una velocidad de viento de 9,5 km /h, dicha frecuencia se obtuvo de la multiplicación de la media resultante que a la vez se obtuvo de la razón entre la frecuencia del motor eléctrico del soplador y la velocidad del viento como se indica en el apartado 3.1.7, tabla 1-3, estos datos están registrados en la tabla 16-3, más adelante.



Figura 13-3: Relación entre frecuencia y velocidad de viento
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3 Análisis termográfico

Para el análisis termográfico usaremos el software de SATIR con el que nos ayudaremos en la apreciación de temperaturas según los espectros que nos indican mostrándonos los puntos más calientes y los más fríos, en el presente experimento nos enfocaremos en un solo punto fijo mismo que se configura en la cámara termográfica como se explicó en el plan de medición.

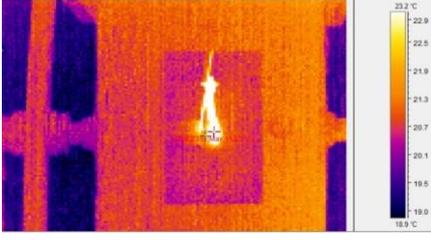
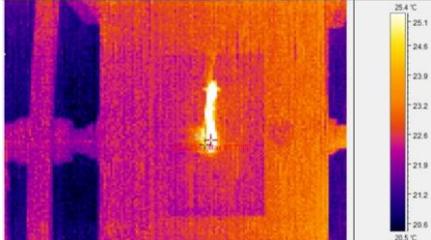
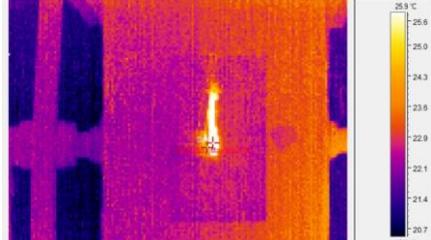
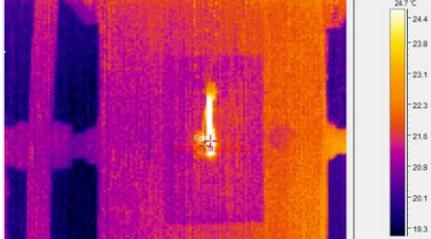
3.3.1 Análisis de espectros mediante el software SATIR

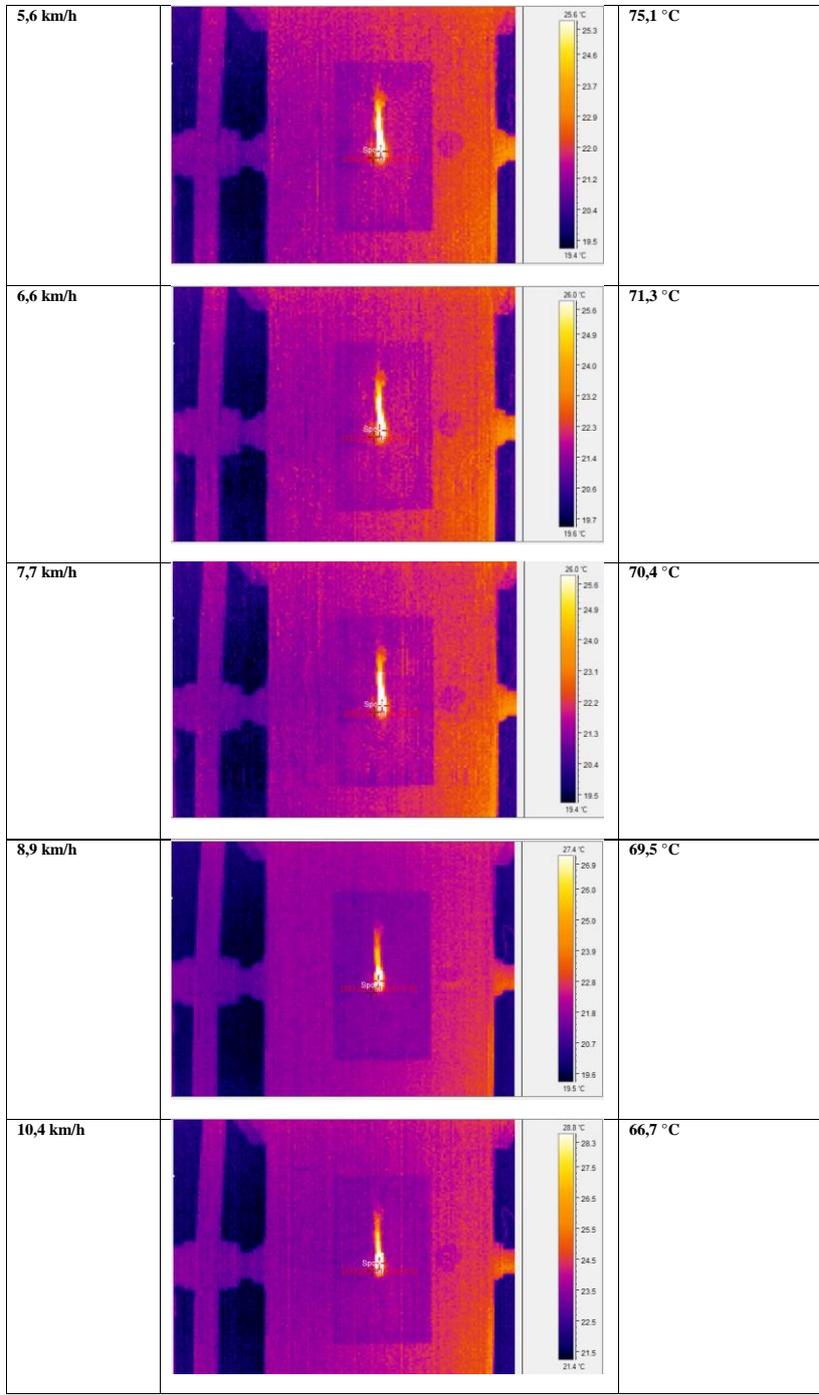
Para poder observar la temperatura del objeto de prueba abrimos el termograma capturado con la cámara termográfica mediante el software de SATIR y nos dirigimos con los comandos que nos brinda y de esta manera se busca los puntos que queremos conocer la temperatura a la que se encuentra mencionado objeto de prueba, en este caso se buscara el punto más caliente del cartucho calefactor que anteriormente se explicó que cumple la función de objeto de prueba.

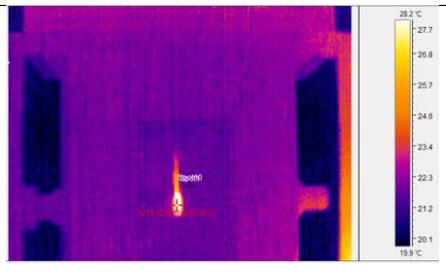
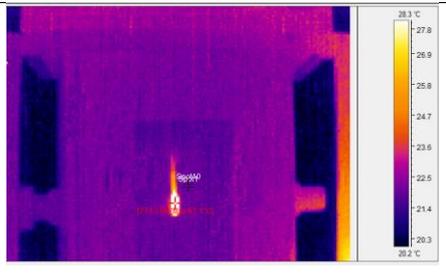
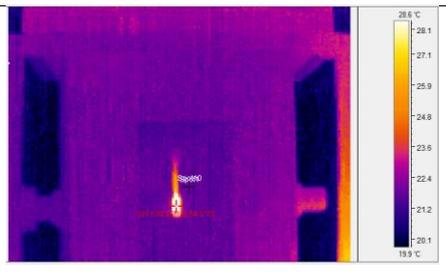
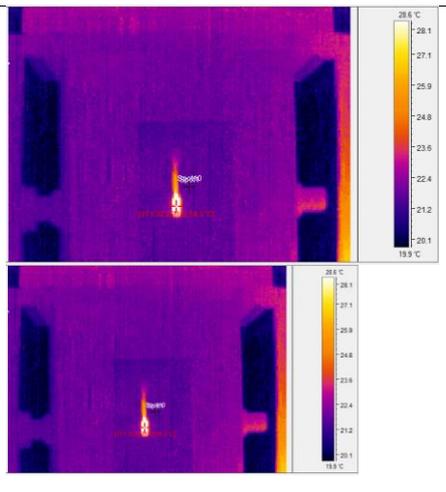
3.3.2 Imágenes infrarrojas obtenidas con la cámara en el experimento

Las imágenes siguientes fueron selectas de acuerdo con el termograma que tenga un valor representativo en cada escala de velocidad de viento con su respectivo valor de temperatura y velocidad de viento a la que el cartucho calefactor se encuentra sometido, por la cantidad de termogramas la tabla 26-3 se muestra en varias páginas a continuación.

Tabla 1-3: Termogramas

VELOCIDAD DE VIENTO APLICADO	TERMOGRAMA	TEMPERATURA DEL TERMOGRAMA
0km/h		113,3 °C
1,5km/h		97,7 °C
3,4 km/h		90,2 °C
4,3 km/h		82,4 °C



11,6 km/h		62,5 °C
12,9 km/h		61,1 °C
14,4 km/h		59,9 °C
15,6 km/h		58,2 °C
16 km/h		54,6 °C

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.3 Agrupación de los datos termográficos

Para el registro de medidas de temperatura se elaboró una tabla en donde indica una escala de frecuencia y una escala de velocidades de viento que previamente fueron obtenidos y registrados en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Mediciones de temperatura en °C a distintas velocidades de viento

Frecuencia (Hz)	0	11,44	15,24	19,5	22,86	26,62	30,48	34,29	38,1	41,9	45,62	49,53	53,34	54,7
T° flujo del Viento (°C)	24,5	24,4	24,1	24,1	23,9	23,6	23,6	23,5	23,1	23,1	23,1	22,7	22,7	22,7
Velocidad viento (km/h)	0 km/h	1,5 km/h	3,4 km/h	4,3 km/h	5,6 km/h	6,6 km/h	7,7k m/h	8,9 km/h	10,4 km/h	11,6 km/h	12,9 km/h	14,4 km/h	15,6 km/h	16 km/h
Temperatura Termograma (°C)														
1	113,3	97,6	90	83,2	74,9	71,7	70,7	70,8	66,7	62	61,1	59,8	57,8	56,7
2	112,8	97,7	90,2	82	74,6	71,1	70,2	70,6	66,8	62,9	61,5	59,7	57,6	56,5
3	112,3	96	90,1	83	74,6	71,9	70,1	70,4	66,7	62,8	61,3	59,5	57,8	56,8
4	111,6	97,3	89,8	82,4	73,7	71,7	70,6	70,1	66,9	62,5	61,6	60,1	58,5	55,8
5	112,8	96,8	90,8	83	75,1	71,1	70,4	68,9	66,3	62,7	61,4	60,2	57,6	56,1
6	111,5	96,5	90	82,9	73,6	71,3	70,2	69,6	65,5	62,1	61,7	59,8	57,9	56,2
7	113,3	96,6	90,3	83,1	73,6	72,2	70,4	70	65,9	62,5	61,3	59,2	58,6	55,7
8	112,2	96,1	89,8	83,4	72,8	71,1	69,8	69,7	66,2	62,1	60,1	59,5	58,2	55,9
9	113,2	96,2	90,5	82,2	74,9	70,9	70,9	69,5	65	62,5	61,2	59,9	58,3	56,0
10	112	97,3	90,4	83,5	73,8	71,7	70,7	69,5	66,1	62,5	61,4	59,8	57,8	55,6
11	113,4	97,1	90,3	83,1	73,9	71,7	70,3	69,1	66,1	62,6	60,8	59,8	58,6	55,0
12	112,3	97,4	89,9	82	75,1	70,9	70,8	68,9	65,6	62,7	60,9	59,7	58,2	55,6
13	111,4	96,2	90,1	83,2	74,6	71,5	70,6	68,9	64	62,7	61,6	59,9	58,3	56,6
14	112,1	96,3	89,8	83,9	72,8	72	70,4	68,7	64,3	62,5	60,7	59,9	58,4	56,5
15	111,8	96,2	90,9	83,1	75,3	72	70,9	68,2	64,9	62,3	61,8	59,8	58,2	56,7
16	112,6	97,2	90,8	83,3	73,2	71,9	70,8	68,3	64,5	62,2	61,7	59,9	58	56,4
17	112,8	96,7	89,7	82,8	73,2	72,1	70	68,3	64,1	62,6	61,5	59,7	58,3	56,7
18	113,8	95,7	90,2	82,8	72,9	71,5	70,8	69,7	65,3	62,5	60,9	60,1	58,4	56,9
19	112,1	96,8	90	82,9	74,4	71,9	70,9	69,8	65,7	62,5	60,4	60	58,2	56,5
20	113,2	97,2	90,1	82,5	74,9	71,4	69,6	68,3	65,8	62,4	61,5	59,9	58,3	56,2

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Una vez se hayan agrupado los valores de temperatura por escalas se debe realizar el cálculo del primer delta de temperatura, para el cual se utiliza la ecuación (28) y se llenan en la tabla 28-4.

$$\Delta T = \text{Temperatura termograma} - \text{Temperatura del viento} \quad (28)$$

Tabla 3-3: Primer delta de temperatura en °C a distintas velocidades de viento

Frecuencia (Hz)	0	11,44	15,24	19,5	22,86	26,62	30,48	34,29	38,1	41,9	45,62	49,53	53,34	54,7
-----------------	---	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	------	------	-------	-------	-------	------

Velocidad viento (km/h)	0 km/h	1,5 km/h	3,4 km/h	4,3 km/h	5,6 km/h	6,6 km/h	7,7k m/h	8,9 km/h	10,4 km/h	11,6 km/h	12,9 km/h	14,4 km/h	15,6 km/h	16 km/h
Temperatura Termograma (°C)														
1	92,8	75,6	67,7	61,1	52,8	49,4	48,3	48,3	44,2	39,5	38,7	37,2	35,2	34,1
2	92,3	75,7	67,9	59,9	52,5	48,8	47,8	48,1	44,3	40,4	39,1	37,1	35	33,9
3	91,8	74	67,8	60,9	52,5	49,6	47,7	47,9	44,2	40,3	38,9	36,9	35,2	34,2
4	91,1	75,3	67,5	60,3	51,6	49,4	48,2	47,6	44,4	40	39,2	37,5	35,9	33,2
5	92,3	74,8	68,5	60,9	53	48,8	48	46,4	43,8	40,2	39	37,6	35	33,5
6	91	74,5	67,7	60,8	51,5	49	47,8	47,1	43	39,6	39,3	37,2	35,3	33,6
7	92,8	74,6	68	61	51,5	49,9	48	47,5	43,4	40	38,9	36,6	36	33,1
8	91,7	74,1	67,5	61,3	50,7	48,8	47,4	47,2	43,7	39,6	37,7	36,9	35,6	33,3
9	92,7	74,2	68,2	60,1	52,8	48,6	48,5	47	42,5	40	38,8	37,3	35,7	33,4
10	91,5	75,3	68,1	61,4	51,7	49,4	48,3	47	43,6	40	39	37,2	35,2	33,0
11	92,9	75,1	68	61	51,8	49,4	47,9	46,6	43,6	40,1	38,4	37,2	36	32,4
12	91,8	75,4	67,6	59,9	53	48,6	48,4	46,4	43,1	40,2	38,5	37,1	35,6	33,0
13	90,9	74,2	67,8	61,1	52,5	49,2	48,2	46,4	41,5	40,2	39,2	37,3	35,7	34,0
14	91,6	74,3	67,5	61,8	50,7	49,7	48	46,2	41,8	40	38,3	37,3	35,8	33,9
15	91,3	74,2	68,6	61	53,2	49,7	48,5	45,7	42,4	39,8	39,4	37,2	35,6	34,1
16	92,1	75,2	68,5	61,2	51,1	49,6	48,4	45,8	42	39,7	39,3	37,3	35,4	33,8
17	92,3	74,7	67,4	60,7	51,1	49,8	47,6	45,8	41,6	40,1	39,1	37,1	35,7	34,1
18	93,3	73,7	67,9	60,7	50,8	49,2	48,4	47,2	42,8	40	38,5	37,5	35,8	34,3
19	91,6	74,8	67,7	60,8	52,3	49,6	48,5	47,3	43,2	40	38	37,4	35,6	33,9
20	92,7	75,2	67,8	60,4	52,8	49,1	47,2	45,8	43,3	39,9	39,1	37,3	35,7	33,6

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.4 Valores estadísticos de las mediciones

En la tabla 30-4 se indica la estadística descriptiva de las mediciones de temperatura del objeto de prueba obtenidas al aplicarle distintas velocidades de viento, los respectivos histogramas de frecuencia se ilustran más adelante.

Se puede apreciar que las mediciones de temperatura presentan poca dispersión ya que la máxima desviación estándar tiene un valor de 0,90878751 que corresponde a una velocidad de viento de 10,4 km/h, en tanto que la media de las temperaturas disminuye conforme incrementa la velocidad del viento.

Tabla 4-3: Valores estadísticos de las mediciones

Velocidad del viento	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
0km/h	111,4	113,8	112,525	0,69877713
1,5km/h	95,7	97,7	96,745	0,58352378
3,4km/h	89,7	90,9	90,185	0,34984959

4,3km/h	82	83,9	82,915	0,49340386
5,6km/h	72,8	75,3	74,095	0,84072337
6,6km/h	70,9	72,2	71,58	0,40470912
7,7km/h	69,6	70,9	70,455	0,38178942
8,9km/h	68,2	70,8	69,365	0,79556336
10,4km/h	64	66,9	65,62	0,90878751
11,6km/h	62	62,9	62,48	0,2397367
12,9km/h	60,1	61,8	61,22	0,45837241
14,4km/h	59,2	60,2	59,81	0,2291862
15,6km/h	57,6	58,6	58,15	0,3086473
16km/h	55	56,9	56,22	0,50115656

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.5 Ilustración de datos mediante histogramas

En las ilustraciones siguientes se indica los histogramas correspondientes a las temperaturas registradas por escala de velocidad del viento lo cual se indica en partes y se especifica el rango de temperatura y frecuencia en la que se encuentran los histogramas.

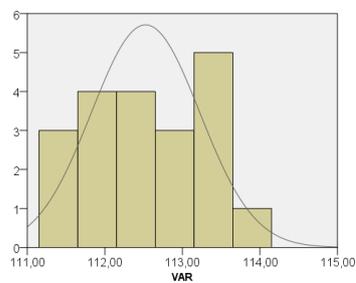


Gráfico 1-3. Histograma con velocidad de viento de 0 km/h

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

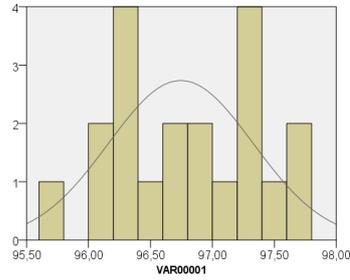


Gráfico 2-3. Histograma con velocidad de viento de 1,5 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

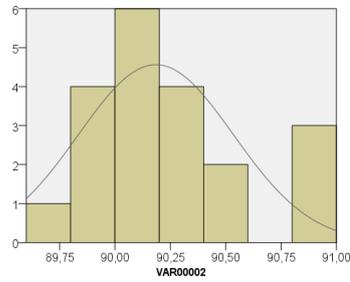


Gráfico 3-3. Histograma con velocidad de viento de 3,4 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

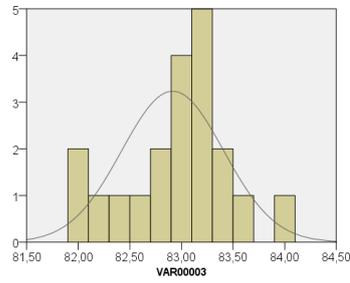


Gráfico 4-3. Histograma con velocidad de viento de 4,3 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

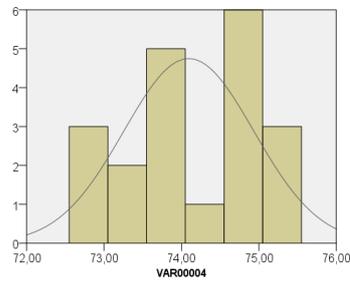


Gráfico 5-3. Histograma con velocidad de viento de 5,6 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

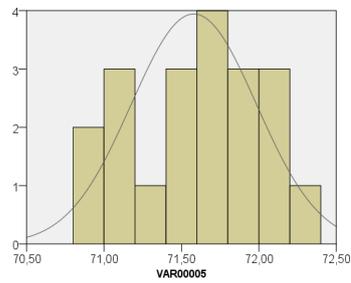


Gráfico 6-3. Histograma con velocidad de viento de 6,6 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

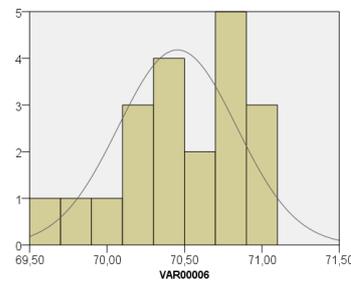


Gráfico 7-3. Histograma con velocidad de viento de 7,7 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

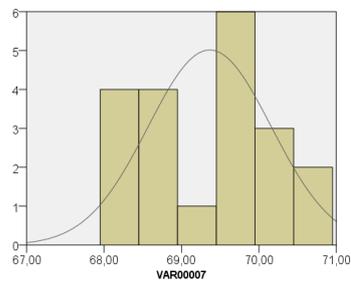


Gráfico 8-3. Histograma con velocidad de viento de 8,9 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

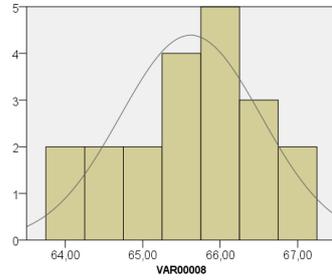


Gráfico 9-3. Histograma con velocidad de viento de 10,4 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

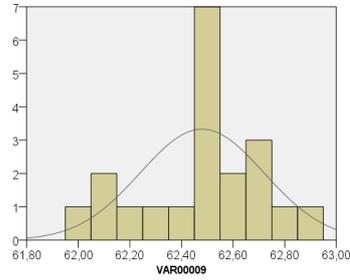


Gráfico 10-3. Histograma con velocidad de viento de 11,6 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

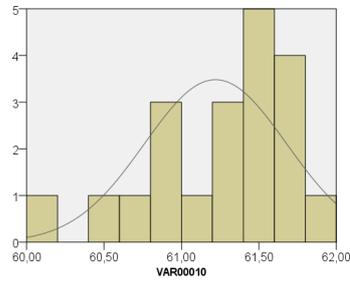


Gráfico 11-3. Histograma con velocidad de viento de 12,9 km/h
 Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

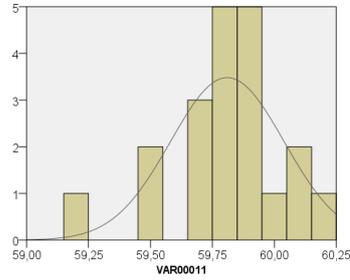


Gráfico 12-3. Histograma con velocidad de viento de 14,4 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

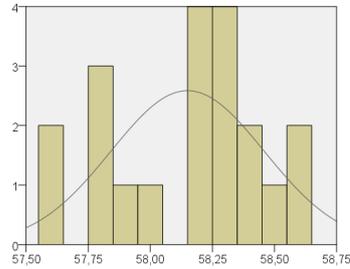


Gráfico 13-3. Histograma con velocidad de viento de 15,6 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

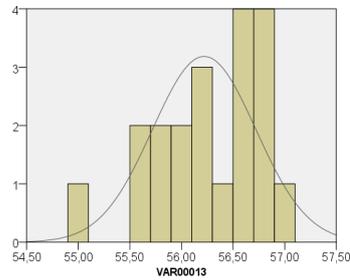


Gráfico 14-3. Histograma con velocidad de viento de 16 km/h
Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

4.3.6 Realización de una prueba de normalidad mediante el método Shapiro-Wilk

Para verificar que las condiciones en las cuales se desarrolló la toma de los datos termográficos son las mismas, se realiza la prueba de normalidad mediante del método de Shapiro Wilk cuyos datos están plasmados en la tabla 31-4.

Tabla 5-3: Resultados de la prueba de normalidad

Velocidad de viento km/h	W	p-valor
--------------------------	---	---------

0km/h	0,959	0,526
1,5km/h	0,955	0,455
3,4km/h	0,922	0,110
4,3km/h	0,954	0,436
5,6km/h	0,916	0,082
6,6km/h	0,937	0,210
7,7km/h	0,924	0,119
8,9km/h	0,951	0,380
10,4km/h	0,943	0,279
11,6km/h	0,940	0,239
12,9km/h	0,915	0,079
14,4km/h	0,932	0,166
15,6km/h	0,927	0,136
16km/h	0,937	0,214

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Al observar que para los casos analizados el p valor de la prueba de Shapiro Wilk son mayores a 0,05 se concluye que los datos se distribuyen normalmente con una confianza de 0,95, con lo cual se selecciona el estadístico paramétrico de t-Student para la contratación de hipótesis.

Al tener datos distribuidos normalmente, nos garantiza que las condiciones en las que se realizó la toma de los datos fueron las mismas para el conjunto de datos de cada escala de velocidad del viento.

3.3.6.1 Planteamiento de la hipótesis.

- **Hipótesis nula**

H_0 corresponde a la igualdad de las muestras, que indica que la velocidad del viento no afecta a la temperatura del elemento analizado.

- **Hipótesis alternativa**

H_1 corresponde a que las muestras no son iguales, lo que indica que la velocidad del viento si afecta a la temperatura del elemento analizado.

3.3.7 Prueba de datos T –Student

Tabla 6-3: Resultados de la prueba T-Student

Comparación entre escalas de velocidad de viento	T	DT	P-valor
0 - 1,5	84,886108	36,828917	7,58E-44
1,5 - 3,4	45,091844	31,09637	6,69E-30
3,4 - 4,3	52,274221	34,250075	2,96E-34
4,3 - 5,6	40,463332	30,700263	3,35E-28
5,6 - 6,6	13,012903	27,356937	3,10E-13
6,6 - 7,7	9,846544	37,871572	5,43E-12
7,7 - 8,9	6,030888	27,310694	2,00E-06
8,9 - 10,4	13,866492	37,346501	2,63E-16
10,4 - 11,6	14,940795	21,63166	7,07E-13
11,6 - 12,9	10,028755	28,671119	7,00E-11
12,9 - 14,4	14,049711	27,941176	3,44E-14
14,4 - 15,6	19,310848	35,067596	2,87E-20
15,6 - 16	14,664598	31,600472	1,19E-15

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Esta prueba se realizó comparando los valores de la tabla 27-4, el valor de temperatura en la escala de 0 km/h con los valores de temperatura de las escalas desde 1,5 km/h hasta los 16 km/h.

En la Tabla 32-4 se indican los resultados de la prueba de t-Student, en el que se observa que, para los datos de temperatura correspondientes a temperaturas consecutivas, el p-valor es menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la H_0 y se concluye que las muestras son diferentes con el 95% de confianza; por consecuencia, para cada velocidad del viento le corresponde un único valor de temperatura

Planteamiento de la hipótesis.

- **Hipótesis nula**

H_0 corresponde a la igualdad de las muestras, que indica que la velocidad del viento no afecta a la temperatura del elemento analizado.

- **Hipótesis alternativa**

H_1 corresponde a que las muestras no son iguales, lo que indica que la velocidad del viento sí afecta a la temperatura del elemento analizado.

3.3.8 Determinación de la ecuación

Para la determinación de la ecuación de corrección de temperatura se utilizan los valores de la tabla 30-4 donde se calcula el porcentaje de variación de la temperatura en función de la velocidad del viento, se realiza la regresión de dos diferentes tendencias las cuales son lineal y exponencial, se rechaza una tendencia polinómica ya que por la naturaleza de esta ecuación presenta puntos de convección en donde la curva de la ecuación pasara de ser creciente a decreciente, lo cual presentara un error al momento de aplicar la ecuación, así como también la tendencia logarítmica ya que no acepta valores menores a uno en el eje de las x, es decir velocidad de viento de 0km/h.

A continuación, se indica los datos para poder generar la regresión para cada tendencia

Tabla 7-3: Delta de temperatura en °C a distintas velocidades de viento

Velocidad viento km/h	0	1,5	3,4	4,3	5,6	6,6	7,7k	8,9	10,4	11,6	12,9	14,4	15,6	16
Delta Temperatura °C	90,28	74,50	67,94	60,67	51,85	49,34	48,21	47,12	43,38	40,24	38,98	37,57	35,91	33,98

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.8.1 Ecuación con tendencia lineal

La ecuación 25 muestra una función exponencial de donde se calcula los valores de a y b, y se llena la tabla 35-4 utilizando las ecuaciones 26 y 27.

$$a = \frac{14(5075,69) - (118,9 * 719,965)}{14 * 1361,57 - 118,9^2}$$

$$a = 76,058$$

$$b = \frac{719,965}{14} - 76,058 * \frac{118,9}{14}$$

$$b = -2,953$$

$$y = -2,953 x + 76,058$$

Tabla 8-3: Valores de la regresión de tendencia lineal

	X [km/h]	Y [°C]	X ²	X*Y	
1	0	90,2821429	0	0	
2	1,5	74,5021429	2,25	111,753214	
3	3,4	67,9421429	11,56	231,003286	
4	4,3	60,6721429	18,49	260,890214	
5	5,6	51,8521429	31,36	290,372	
6	6,6	49,3371429	43,56	325,625143	
7	7,7	48,2121429	59,29	371,2335	
8	8,9	47,1221429	79,21	419,387071	
9	10,4	43,3771429	108,16	451,122286	
10	11,6	40,2371429	134,56	466,750857	
11	12,9	38,9771429	166,41	502,805143	
12	14,4	37,5671429	207,36	540,966857	
13	15,6	35,9071429	243,36	560,151429	
14	16	33,9771429	256	543,634286	
	118,9	719,965	1361,57	5075,69529	Sumatoria

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

La gráfica y la ecuación con una tendencia lineal arrojan como resultado la ecuación:

$$y = -2,953x + 76,058(29)$$

Con un Valor de $R^2 = 0,8725$

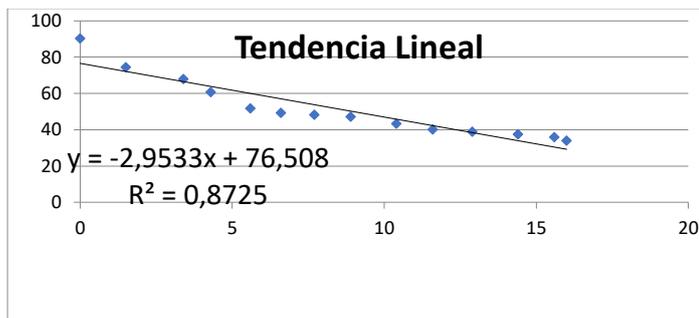


Gráfico 15-3. Ecuación con tendencia lineal

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

3.3.8.2 Ecuación con tendencia exponencial

La ecuación 17 muestra la ecuación de una función exponencial de donde calculamos los valores de A y B y llenamos la tabla 36-4 utilizando las ecuaciones 23 y 24.

$$A' = \frac{54,57}{14} - (-0,055) * \frac{118,9}{14}$$

$$A' = 4,3627$$

$$A = \ln(4,3627)$$

$$A = 78,466$$

$$y = 78,466e^{-0,055x}$$

Tabla 9-4: Valores de la regresión de tendencia exponencial.

	X [km/h]	Y [°C]	Y'= Ln(y)	XY'	X^2	
1	0	90,2821429	4,50293969	0	0	
2	1,5	74,5021429	4,31082789	6,46624183	2,25	
3	3,4	67,9421429	4,2186565	14,3434321	11,56	
4	4,3	60,6721429	4,10548466	17,653584	18,49	
5	5,6	51,8521429	3,94839626	22,1110191	31,36	
6	6,6	49,3371429	3,8986772	25,7312695	43,56	
7	7,7	48,2121429	3,87561092	29,8422041	59,29	
8	8,9	47,1221429	3,85274301	34,2894128	79,21	
9	10,4	43,3771429	3,76993264	39,2072995	108,16	
10	11,6	40,2371429	3,69479052	42,85957	134,56	
11	12,9	38,9771429	3,66297539	47,2523826	166,41	
12	14,4	37,5671429	3,62612981	52,2162692	207,36	
13	15,6	35,9071429	3,58093624	55,8626054	243,36	
14	16	33,9771429	3,52568803	56,4110085	256	
	118,9		54,5737888	444,246299	1361,57	Sumatoria

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

La gráfica y la ecuación con una tendencia lineal arrojan como resultado la ecuación:

$$y = 78,466e^{-0,055x} \quad (30)$$

Con un Valor de $R^2 = 0,9453$

Los resultados de las regresiones con los tres tipos de tendencias se detallan en la tabla 36-4.

Tabla 10-4: Resultados de la regresión de las tendencias lineal y exponencial.

Tipo de Tendencia	Ecuación	R ²
Lineal	$y = -2,953x + 76,058$	$R^2 = 0,8725$
Exponencial	$y = 78,466e^{-0,055x}$	$R^2 = 0,9453$

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Con esta tabla resumen se escoge la ecuación con valor R cuadrado más cercano a uno ya que este coeficiente de determinación, el cual es una medida estadística que refleja que tan cerca están los valores de la gráfica de una ecuación con la gráfica descrita, es decir que tan cercanos son los valores a la gráfica de una regresión.

Siendo la ecuación exponencial la seleccionada por su valor de R cuadrado de 0,9453.

Ya que esta es una ecuación experimental se debe realizar el cálculo de un error medio cuadrático para la constante k_1 de la ecuación exponencial, siendo el valor de 0,055. El cual permita obtener un ecuación más exacta, en donde los extremos de esta ecuación se contrasten con la realidad, para ello el primer valor de temperatura donde el valor de la velocidad es cero la gráfica de la ecuación debe formar parte de la gráfica en su valor de k_2 igual a los 90,2 °C y al tener un valor de velocidad con tendencia al infinito la temperatura del objeto debe tender a cero, ya que se realiza el análisis contemplando el primer delta de la temperatura calculado con la temperatura ambiente, ésta es la condición la cual la ecuación resultante de este experimento debe cumplir.

Tabla 11-3: Raíz media cuadrática

X [km/h]	0,0	1,5	3,4	4,3	5,6	6,6	7,7	8,9	10,4	11,6	12,9	14,4	15,6	16,0
Media	90,28	74,50	67,94	60,67	51,85	49,34	48,21	47,12	43,38	40,24	38,98	37,57	35,91	33,98
Media	90,28	81,06	70,72	66,29	60,38	56,19	51,92	47,63	42,77	39,23	35,74	32,08	29,43	28,60
Diferencia	0,00	-6,56	-2,77	-5,62	-8,52	-6,85	-3,71	-0,51	0,61	1,00	3,24	5,48	6,47	5,38
Cuadrado	0,00	42,99	7,69	31,54	72,67	46,98	13,76	0,26	0,37	1,01	10,51	30,06	41,90	28,91

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Con la utilización del complemento Solver del programa Microsoft Excel se obtiene el valor de k_1 para el cual el error medio cuadrático sea mínimo, entre los valores obtenidos con la

regresión especial y la ecuación con la corrección del extremo con valor inicial con velocidad de cero km/h que cumpla con la condición inicial.

Este resultado se representa en la tabla 12-3:

Tabla 12-3: Error medio cuadrático

Error medio cuadrático	4,84506732
K1	0,071845
K2	90,2821429

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

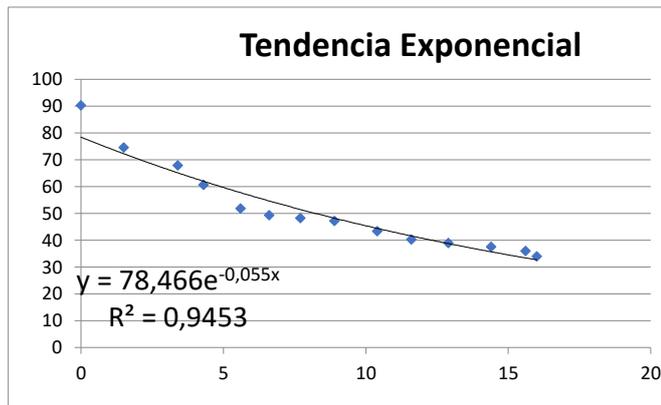


Gráfico 16-3. Ecuación con tendencia exponencial.

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

Con estos resultados se plantea un sistema de ecuaciones

Temperatura medida

$$T_m = T_o + T_c \quad (31)$$

Temperatura de corrección

$$T_c = k_2 - y \quad (32)$$

Temperatura de corrección

$$T_c = k_2 - k_2 * e^{-k_1 * v} \quad (33)$$

Se realiza factor común a la ecuación 33 y se obtiene la ecuación 34

$$T_c = k_2 * (1 - e^{-k_1 * v}) \quad (34)$$

Se reemplaza la ecuación obtenida en la ecuación

$$T_o = T_m * e^{-k_1 * v} + k_2 * (1 - e^{-k_1 * v}) \quad (35)$$

$$T_o = T_m * e^{-k_1 * v} + T_v * (1 - e^{-k_1 * v}) \quad (36)$$

Donde

T_o	Temperatura real estimada	[°C]
T_m	Temperatura medida en el termograma	[°C]
k_1	Coefficiente de disminución exponencial	[h/km]
T_v	Temperatura del viento	[°C]
v	Velocidad del viento	[km/h]

3.3.9 *Comprobación de la ecuación*

Para la comprobación de esta ecuación se realiza una prueba a escalas de viento diferentes a las realizadas para el cálculo de la ecuación, con ello se podrá calcular el error presente de estos datos.

Para esa comprobación se utilizará las escalas de velocidad de viento descritos en la tabla 33-4, llenando así también los valores de temperatura medidas, temperatura calculada y el error.

Tabla 13-3: Resultado de la aplicación de la ecuación.

Velocidad de viento (km/h)	0	1,5	3,4	4,3	5,6	6,6	7,7k	8,9	10,4	11,6	12,9	14,4	15,6	16
	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	km/h	m/h	km/h						
Temperatura medida °C	112,7	96,9	90,3	83,1	74,3	71,7	70,6	69,5	65,8	62,6	61,4	60,0	58,3	56,4
Temperatura calculada °C	112,53	105,22	108,98	104,88	99,78	101,51	106,08	111,56	113,81	114,83	120,72	127,95	132,38	129,50
Error medio cuadrático	4,84 °C													

Realizado por: Padilla J., Velarde A., 2020

CONCLUSIONES

Se construyó el módulo soplador con que simula corrientes de viento controladas a diferentes escalas de velocidad por medio de un variador de frecuencia y control y medición de temperatura.

Los datos termográficos obtenidos en este experimento se distribuyen normalmente con un valor de confianza del 0,95.

Los datos termográficos presentan que un valor de velocidad del viento a la cual le corresponde un único valor de temperatura que varían con una relación inversamente proporcional.

La gráfica con tendencia exponencial es la que mejor se acomoda al conjunto de valores resultantes de este experimento, la cual posee un valor de R cuadrado igual a 0,9453, la misma que es corregida por medio del método de raíz mínima cuadrada donde los valores de temperatura reflejen la realidad en el experimento.

Para la comprobación de la ecuación de la temperatura real estima teniendo se calculó el error medio cuadrático teniendo un valor de 4,84 °C

RECOMENDACIONES

Este experimento se debe ejecutar en un ambiente donde no existan factores externos como corrientes de viento externas que puedan afectar a las mediciones obtenidas.

Se debe seguir el procedimiento detallado en este documento entre ello el encendido del módulo y la calibración de la cámara termográfica para evitar errores en las mediciones.

Se debe tener presente factores que pueden conllevar a errores en las mediciones como: emisividad, distancia, temperatura ambiental, temperatura del viento, temperaturas reflejadas.

BIBLIOGRAFÍA

AENOR UNE 13326. *Terminología del mantenimiento*

BOLES, Y & ÇENGEL, A. *Termodinámica*. [En línea] 6ta Edición. (2009). [Consulta: 22 de diciembre de 2020] Disponible en: <https://www.libros.me/termodinamica/termodinamica-6ta-edicion-yunus-a-cengel-y-michael-a-boles>

CENGEL, Y. *Transferencia de calor*. [En línea] (2004). [Consulta: 12 de diciembre de 2020] Disponible en: <http://librosysolucionarios.net/>

CERÓN, R; et al. Temperatura y Ley Cero de la Termodinámica. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*. [En línea], 2020, (México) volumen (14), pp. 70–73 [Consulta: 09 de diciembre de 2020] Disponible en :<https://doi.org/10.29057/estr.v7i14.5595>

DUARTE, L, & PEÑA, R. *Principios Básicos de la Termografía infrarroja y su utilización como técnica para Mantenimiento Predictivo* [En línea] (2011). [Consulta: 20 de diciembre de 2020] Disponible en: *Repositorio Institucional UPB*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1561>

ENKA, *Cámaras termográficas FLIR* [En línea] 2018 [Consulta: 17 de enero de 2021] Disponible en: <https://www.enka.com.uy/instrumentos/camaras-termograficas/industrial/6243-camara-termografica-industrial-flir-e60-detail.html>

FERNÁNDEZ, S. *Transferencia de Calor*. In *Transferencia de Calor*. [En línea] (2013). [Consulta: 10 de diciembre de 2020] Disponible en: <https://issuu.com/merlucin/docs/04ct>

HERNANDEZ, E. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo Mantenimiento Industrial, DIAGNÓSTICO TECNICO 226 [En línea] (2018). [Consulta: 23 de diciembre de 2020]

HERNÁNDEZ, E, & GUANANGA, A. *INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN LAS MEDIDAS DE TEMPERATURA MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA* [En línea] (2020). [Consulta: 3 de diciembre de 2020]. Disponible en: *Revista de Investigación Talentos*, 7 <https://doi.org/10.33789/talentos.7.1.119>

IGLESIAS, Vasco; & ABARCA, Sigcho. *Elaboración de un Plan de Mantenimiento Predictivo Mediante la Aplicación de Termografía Industrial en los Motores Eléctricos de la Planta de Eurolit en la Empresa Tubasec C.A.* (Trabajo de titulación). [En línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Mecánica. Escuela de Ingeniería de Mantenimiento. (Riobamba-Ecuador). 2012. [Consulta: 10 de diciembre de 2020] Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/3061>

LICHTBLAU, M; & GOBBI, A. “Las Leyes De La Termodinámica”. *Revista Iberoamericana*. [En línea] (1959). Volumen 24(48), pp. 375–377. [Consulta: 09 de diciembre de 2020]. Disponible en: *Revista Iberoamericana*.

LUQUE, J. *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. [En línea] (2012). [Consulta: 20 de diciembre de 2020] Disponible en: *Acta*, 17–31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5738106>

MINNAARD, C. “Modelos de regresión lineales y no lineales: Su aplicación en problemas de ingeniería”. *Revista Premisa*. [En línea] (2011). Volumen 13, pp. 20–29. [Consulta: 17 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-telesup/programacion/resumenes/modelos-de-regresion-logaritmica-lineales-y-no-lineales/9396091/view>

MISCELÁNEA CIENTÍFICA EN MÉXICO TOMO III: Valores estadísticos [En línea]. 2014. [Consulta: 17 de enero de 2021] Disponible en: <http://negro.iing.mx1.uabc.mx/~bflores/?p=1101>

PICAZO, M. *Diagnóstico de máquinas eléctricas mediante técnicas de termografía infrarroja*. [En línea] (2016). [Consulta: 26 de diciembre de 2020] Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/62317>

RAMÍREZ, Arbeláez; et al. *Protocolo de adquisición de imágenes diagnósticas por termografía infrarroja*. [En línea] (2015). [Consulta: 22 de diciembre de 2020] Disponible en: *Medicina y Laboratorio*, 21(3–4), 161–178. <https://doi.org/10.36384/01232576.118>

Romero Saldaña, M. Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. [En línea] (2016). [Consulta: 26 de diciembre de 2020] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>

SUGAWARA, E; & Nikaido, H. *Properties of AdeABC and AdelJK efflux systems of Acinetobacter baumannii compared with those of the AcrAB-TolC system of Escherichia coli.* [En línea]. (2014). [Consulta: 12 de diciembre de 2020]. Disponible en: *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 58(12), 7250–7257. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>

TALLEDO, R. *Desarrollo de Aportes y Pre-inversión.* [En línea] (2017). [Consulta: 19 de diciembre de 2020] Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/4525>

ANEXOS

Anexo A: Programación para la tarjeta Arduino

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

int Vo;
float R1 = 100000;          // resistencia fija
float logR2, R2, TEMPERATURA;
float c1 = 2.114990448e-03, c2 = 0.3832381228e-04, c3 = 5.228061052e-07;

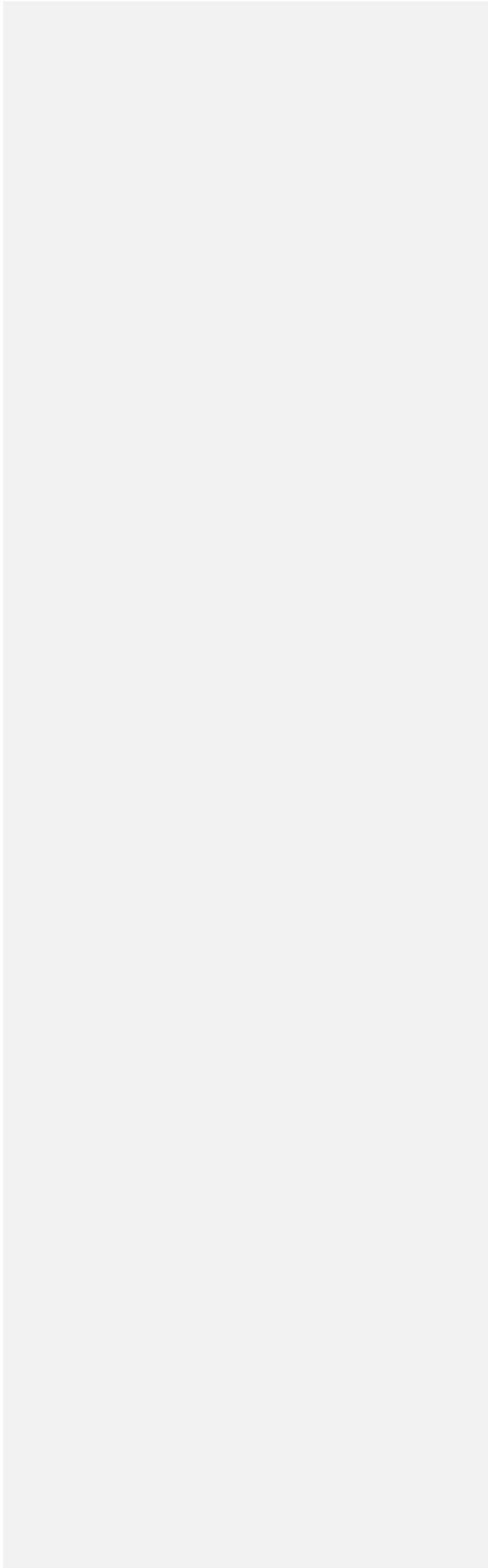
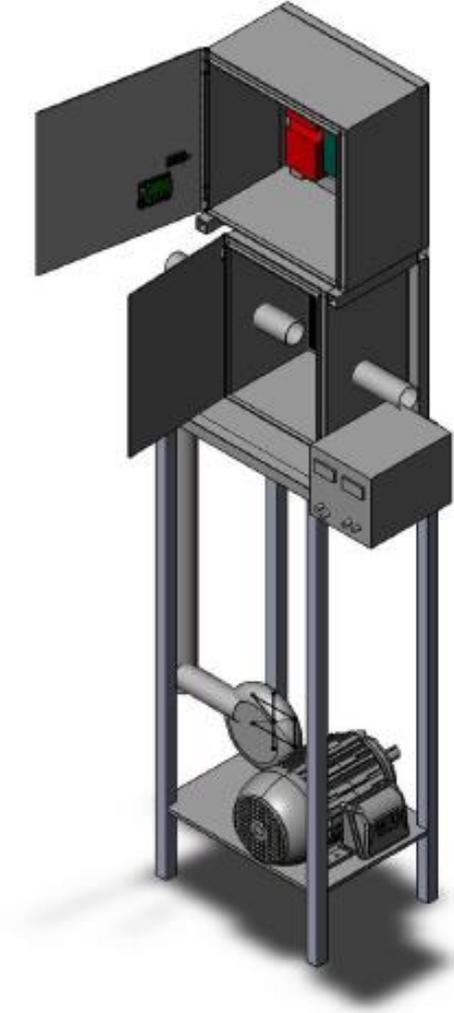
void setup() {

lcd.begin(16,2);// Medidas de LCD
}

void loop() {
  Vo = analogRead(A0);      // lectura de A0
  R2 = R1 * (1023.0 / (float)Vo - 1.0); // conversion de tension a resistencia
  logR2 = log(R2);         // logaritmo de R2 necesario para ecuacion
  TEMPERATURA = (1.0 / (c1 + c2*logR2 + c3*logR2*logR2*logR2)); // ecuacion S-H
  TEMPERATURA = TEMPERATURA - 273.15; // Kelvin a Centigrados (Celsius)

  lcd.clear();//Elimina todos los simbolos del LCD
  lcd.setCursor(2,0);//Posiciona la primera letra despues del segmento 5 en linea 1
  lcd.print("Temperatura:");
  lcd.setCursor(4,1);
  lcd.print(TEMPERATURA);//Escribe la temperatura
  lcd.print(" C");
  delay (1000);//Espera 1 segundo y vuelve a escribir
}
```

Anexo B: Modelado del módulo soplador experimental



Anexo C: Especificaciones de la cámara termográfica utilizada

Cámara Infrarroja de alto rendimiento con cámara digital integrada

HotFind VR

Las cámaras de la serie HotFind han sido optimizadas para trabajar en ambientes de alta exigencia industrial. Puede trabajar en ambientes de alta vibración, polvo y agua, totalmente certificadas para cumplir con los requerimientos de encapsulación (IP54).



LCD Inclinable de 3.5"

Los inspectores Termográficos pueden ajustar la inclinación de la pantalla para obtener un mejor ángulo de visualización. La opción de LCD Inclinable permite proteger la pantalla mientras la cámara no está en uso.



Registro de videos Termográficos completamente radiométricos en tiempo real a través del cable USB a PC, para análisis y elaboración de reportes.

Registro de videos Termográficos en tiempo real a través del cable USB



Rango de Temperatura Expandible

Las series HotFind tienen 4 rangos de temperatura. Pueden ser expandido del rango estándar -20°C a 250°C, hasta +1500°C, lo cual implica que las series HotFind puede también ser ampliamente utilizada en aplicaciones de alta temperatura.



Alta velocidad de procesamiento de imágenes en tiempo real.

HotFind serie adopta NTSC (60Hz) o PAL (50Hz) salida de video. Las imágenes térmicas son indicadas en tiempo real lo cual garantiza imágenes totalmente nítidas sin efecto de imágenes fantasma.



Bluetooth

Los inspectores pueden agregar anotaciones de voz a las imágenes térmicas a través de los auriculares Bluetooth. Las grabaciones serán guardadas con las imágenes térmicas y pueden ser reproducidas en la PC.

ESPECIFICACIONES

Almacenamiento de imagen	
Tipo	Memoria RAM inhibida. 2 GB tarjeta renovable SDHC
Almacenamiento de la Imagen IR	Imagen sencilla, almacenamiento periódico configurable en intervalos de tiempo, IR, Digital, simultaneo fusión de imagen, imágenes asociadas a voz y texto.
Imagen Digital	Imágenes automáticas asociadas a las imágenes térmicas, asociación de voz y texto Bluetooth.
Batería del Sistema	
Alimentación Externa	90V – 240V AC, 50Hz/60Hz
Voltaje de Trabajo	2DC 8v- 11V
Tiempo de operación de la Batería	4 horas trabajo intermitente, 3 horas trabajo continuo (video), 2 baterías recargable en la cámara o en cargador externo.
Especificaciones Ambientales	
Rango temperatura de Operación	-30°C a +60°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-40°C a +70°C
Humedad Operación y Almacenada	IEC 68-2-30/24 h 95% de humedad relativa, +25°C a 40°C
Protección	IP55 (IEC 60529)
Choque (Shock)	25G, IEC 60068-2-29
Vibración	2G, IEC 60068-2-6
Automatización de Rutas de Inspección	
Grabación de Voz asociada a Imágenes	60 seg.
Interfaces de Conexión	
Tarjeta SD	1 abertura 2 GB hasta 16GB.
Grabación de Voz	Conexión audífono estándar o por vía Bluetooth
Salida de Video	NTSC(60Hz) o PAL(50Hz) video compuesto,
Conexión PC	Bluetooth, cable USB, registro de imágenes y video.
Software para Análisis y administración de información	Visualización de video térmicos, imágenes térmicas y digitales. Compatible con Windows XP, Windows 7, Windows Vista y Sistema Mac. Permite crear reportes profesionales en Microsoft Word, PDF y permite realizar su respectivo análisis.

ESPECIFICACIONES

TIPO	HotFind VR
Característica de Imagen	
Distancia de enfoque FOV/Min.	20°x15°/ Enfoque mínimo 0,1 m
Resolución Espacial	2,2 mrad.
Sensibilidad Térmica	±0,08°C@30°C 100mk
Tipo de Detector	Microrolómetro (FPA)
Resolución	160X120 Píxeles
Rango Espectral	8 - 14 µm
Enfoque	Manual
Puntero Laser	Identificación automatiza del puntero laser en la pantalla, alineación automática.
Presentación de Imagen	
Modos de Imagen	IR/CCD/Visión doble/Digital. Imagen IR, Imagen Digital, fusión térmica, Picture in Picture
	Fusión térmica IR, umbral superior, inferior ajuste automático de un intervalo de temperatura, en la imagen visual.
	Picture in Picture (Superposición de la imagen térmica en la imagen visual), Imagen IR móvil y ajustable dentro al imagen digital.
Pantalla LCD	LCD 3.5" pantalla LCD brillante,
	Resolución 160X120
Cámara Vídeo Digital	Full color 2 mega-píxeles.
	Incluye lámpara de iluminación para ambientes oscuros.
Frecuencia Escaneo de Imagen	60 Hz o 50 Hz.
Salida de Vídeo	NTSC(60Hz) o PAL(50Hz) video compuesto, IR, digital, .AVI, MPEG.
Brújula Electrónica	Incorporada
Medición de la Temperatura	
Rangos de Medida	-20°C~ +250°C (opcional hasta 1500°C)
Exactitud	±2°C, ±2% de lecturas
Modos de Medición	4 Puntos móviles, seteo de límites de temperatura auto caliente/frío, línea de perfil, 5 áreas cuadrados, círculos (Temp. Max, Min, Promedio), 3 isotermas.
	Diagnóstico automático entre temperaturas de referencia y temperaturas en función de medición. Valor y posición de temperatura por cada píxel en tiempo real o en imagen guardada, pantalla de la cámara o PC.
	Fecha, hora, nivel de batería, estado de conectividad Bluetooth, Idioma español.
Delta T	Si

ESPECIFICACIONES

Características Físicas	
Peso	Menor a 600g
Dimensiones	327 mm x 143 mm x 170 mm
Montaje en trípode	1/4"-20
Transporte	Muñequera, para derechos o zurdos y correa para transporte al hombro (bolsa blanda)
Maleta	Industrial rígida.
OTROS	
Lámpara	SI
Puntero laser	SI
USB 2.0 Transferencia de datos térmicos en tiempo real	SI
Bluetooth	SI
Manuales	Impresos en español y CD.
Lentes	
Lentes Intercambiables	7°, 12°, 48°, Telescopio, Estándar, Gran Angular y 100 µm.
Garantía	
Garantía defectos de fábrica	2 años

Anexo D: Datos técnicos del Anemómetro usado en el experimento

Especificaciones

Especificaciones de escala

Medición	Escala	Resolución	Precisión
MPH (millas por hora)	0.9 a 67.0 MPH	0.1 MPH	≤ 3937 ft/min: $\pm 3\%$ F.S. > 3937 ft/min: $\pm 4\%$ F.S.
km/hr (kilómetros por hora)	1.4 a 108.0 km/h	0.1 km/h	
Nudos (millas náuticas por hora)	0.8 a 58.3 nudos	0.1 nudos	
m/seg (metros por segundo)	0.4 a 30.0 m/s	0.1 m/s	
ft/min (pies por minuto)	80 a 5910 ft/min	1ft/min	
Temperatura/Termistor	0 a 50°C (32 a 122°F)	0.1°F/°C	$\pm 1.2^\circ\text{C}$ ($\pm 2.5^\circ\text{F}$)
Temperatura/Temper	-148 a 2372 °F	0.1°F	$\pm (1\% + 2^\circ\text{F})$
	-100 a 1300°C	0.1°C	$\pm (1\% + 1^\circ\text{C})$
Humedad relativa	10.0 a 95.0%	0.1%	$\pm 4\%$ HR (de 10% a 70%HR) $\pm 4\%$ Lect. + 1.2% HR (> 70% HR)
Luz(Escala automática)	0 a 2,200 Lux	1 Lux	$\pm 5\%$ lectura + 8 dígitos
	1,800 a 20,000 Lux	10 Lux	
	0 a 204.0 Fc	0.1 Fc	
	170 a 1,860 Fc	1 Fc	

Especificaciones generales

Pantalla	Pantalla LCD de 4 dígitos (9999 cuentas)
Sensores	Sensor condensador de película delgada para humedad
Min/Max	MIN/MAX recuperación de lectura máxima /mínima
Retención de datos	Retención de datos congela la pantalla
Condiciones de operación	0 a 50°C (32 a 122°F) / < 80% HR
Fuente de energía	9 Voltios Batería
Dimensiones / Peso	Instrumento 156 x 60 x 33mm (6.14 x 2.36 x 1.29") Valeto: 24mm (1" diámetro) / 160 g (5.7 oz.)