



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Desarrollo de un método de detección de fisuras en
piezas de aluminio fundidas a alta presión mediante
termografía infrarroja**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:
Jesús López González

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. José Antonio Vázquez López

CO-DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Ismael López Juárez

CELAYA, GTO., MÉXICO, FEBRERO, 2019

Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.

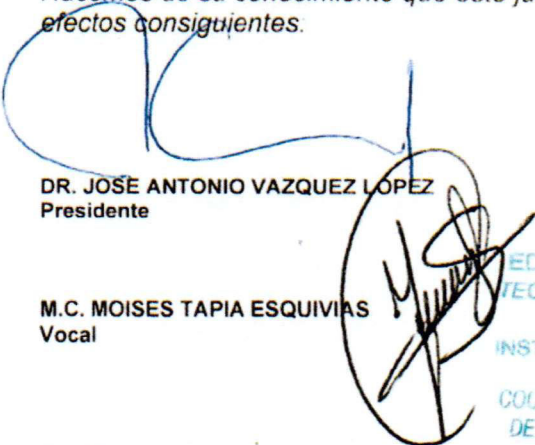
Celaya Gto., **20 de FEBRERO 2019**

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.
Presente.

De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:

“Desarrollo de un método para la detección de fisuras en piezas de aluminio fundidas a alta presión mediante termografía infrarroja”

*Presentado por el (a) pasante **C. ING. Jesús López González (M1603011)** alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto.
Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.*


DR. JOSÉ ANTONIO VAZQUEZ LOPEZ
Presidente


M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
Vocal

Ccp. Escolares
Archivo.
VFF*MTE*DMVP

ATENTAMENTE



SECRETARIA DE
EDUCACION PUBLICA
TECNOLOGICO NACIONAL
DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CELAYA
COORDINACION DE MAESTRIA
DE INGENIERIA INDUSTRIAL


M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA
Secretario


M.C. VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ
Vocal Suplente





Agradecimientos

A mis padres, Lea González Hernández y Fernando López Olivares por su apoyo, amor y ejemplo de superación durante mi formación profesional y personal.

A mí compañera de vida, MII. María Brisahlé Padilla Martínez por estar a mi lado durante este proceso de formación, además de recibir no solo apoyo moral, sino también profesional al ayudarme en las revisiones del formato de tesis.

A mi asesor de tesis, Dr. José Antonio Vázquez López, por sus enseñanzas, consejos, y constante apoyo durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

Al Dr. Clemente Ibarra-Castanedo, por su apoyo técnico, sugerencias y enseñanzas durante la etapa del desarrollo del método de la investigación.

A mis compañeros de las distintas generaciones con las que compartí clases, momentos de estudio, proyectos, etc. por su sentido del trabajo en equipo y apoyo incondicional.

A mis maestros, quienes compartieron sus conocimientos durante todo el proceso de la maestría. En especial al maestro Vicente Figueroa Fernández, por su apoyo, siempre brindando información oportuna y su agradable estilo frente a grupo.

Finalmente, a dios, por brindarme una vida saludable y la bendición de poder compartir esta etapa de mi vida con personas muy valiosas.



Resumen

En el presente trabajo de investigación se describe el desarrollo de un método para detección de fisuras en piezas de aluminio mediante técnicas de termografía activa en una empresa automotriz que fabrica transmisiones y lleva a cabo procesos de fundición a alta presión.

La empresa donde se está realizando la investigación ha aumentado su productividad, por lo que los procesos son más complejos y surgen nuevos problemas día con día. Las fisuras en piezas de aluminio no son un problema común en la empresa, por lo que no se tiene un método para detectarlas, así que cuando se da un problema de este tipo, los ingenieros de calidad tienen dificultad para implementar un método y se recurre al uso de líquidos penetrantes. Sin embargo, un método de END mediante termografía activa es una mejor opción, ya que puede detectar fisuras por debajo de la superficie.

La tesis se validó llevando a cabo el método descrito en el capítulo III, que consiste en cinco etapas, donde cada una de ellas se ejecutó en sitio para poder recrear lo más posible un ambiente de trabajo real. La etapa 3 del método, procesamiento de imágenes, en la que inicialmente se había considerado diseñar un algoritmo de detección de defectos tuvo un cambio, ya que se pudo confirmar que, para la aplicación de detección de fisuras, las cámaras térmicas tienen un filtro de procesamiento automático que facilita las implementaciones en sitio.

Finalmente, en la etapa 5 donde se analizan los datos obtenidos, se da una detallada explicación sobre qué técnica de evaluación no destructiva mediante termografía activa es más apropiada para la aplicación en la planta de transmisiones donde se llevó a cabo la investigación.



Abstract

The current Investigation describes the development of a crack detection method in aluminum pieces by active thermography techniques in an automotive company that manufactures transmissions and carries out high pressure die casting processes.

The company where the research is been carried out has increased its productivity, so the processes are more complex and new problems arise day by day. Cracks in aluminum parts are not a common problem in the company, so there is not a method to detect them, so when a problem of this kind occurs, quality engineers have difficulty implementing a method and use penetrating liquids. However, an NDT method using active thermography is a better option, since it can detect cracks below the surface.

The thesis was validated by carrying out the method described in chapter III, which consists of five stages, where each of them was executed on site to recreate as much as possible a real work environment. Stage 3 of the method, image processing, in which a defect detection algorithm had initially been considered had a change, since it could be confirmed that, for the crack detection application, the thermal cameras have a filter of automatic processing that facilitates on-site deployments.

Finally, in stage 5 where the data obtained is analyzed, a detailed explanation is given about which non-destructive evaluation technique by active thermography is more appropriate for the application in the transmission plant where the research was carried out.



CONTENIDO

CAPÍTULO I Planteamiento del problema

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1	Descripción del problema.....	1
1.1.1	Antecedentes	1
1.1.2	Descripción	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Hipótesis	4
1.4	Preguntas de investigación	4
1.5	Justificación.....	4
1.6	Alcances y limitaciones	5
1.7	Resultados esperados	5

CAPÍTULO II Marco teórico

2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Elementos de la percepción visual.....	8
2.1.1	Fundamentos sobre el ojo humano.....	8
2.1.1.1	Proceso de visión.....	9
2.1.2	Representación del color	10
2.1.2.1	Espectro electromagnético	11
2.2	Imágenes digitales	14
2.2.1	Tipos de imágenes digitales.....	15
2.2.1.1	Binarias.....	15
2.2.1.2	Escala de grises	15
2.2.1.3	Color verdadero, RGB	15
2.2.1.4	Indexadas	15
2.3	Procesamiento digital de imágenes.....	16
2.3.1	Etapas del procesamiento digital de imágenes	17



2.3.1.1	Adquisición de imágenes	18
2.3.1.2	Pre-procesamiento.....	18
2.3.1.3	Segmentación	18
2.3.1.4	Representación y descripción.....	19
2.3.1.5	Reconocimiento e interpretación	19
2.4	Procesamiento de imágenes termográficas.....	19
2.4.1	Procesamiento de señales avanzado	19
2.4.1.1	Métodos de contraste térmico.....	21
2.4.1.2	Método de contraste absoluto diferencial (DAC)	21
2.4.1.3	Normalización	22
2.4.1.4	Termografía de fase pulsada (PPT).....	22
2.4.1.5	Reconstrucción de señales termográficas (TSR).....	22
2.5	Evaluación no destructiva (END)	23
2.5.1	Importancia de la evaluación no destructiva	24
2.5.1.1	Métodos convencionales de END	24
2.6	Termografía infrarroja	26
2.6.1	Ventajas de la termografía infrarroja	27
2.6.2	Desventajas de la termografía infrarroja	28
2.6.3	Termografía pasiva	28
2.6.4	Termografía activa	29
2.6.4.1	Modos de transferencia de energía	31
2.6.4.2	Fuentes de estimulación.....	31
2.6.4.3	Inspección cualitativa versus cuantitativa	40
2.7	Fundición de metales.....	41
2.7.1	Ventajas y desventajas de los procesos de fundición	42
2.7.1.1	Ventajas.....	42
2.7.1.2	Desventajas	43
2.7.2	Procesos de fundición	43
2.7.2.1	Molde de fundición.....	43
2.7.2.2	Clasificación por tipo de molde	45
2.7.2.3	Calentamiento y vertido	46
2.7.2.4	Procesos básicos con moldes permanentes.....	47
2.7.3	Hornos de fundición	52
2.7.3.1	Cubilotes.....	52
2.7.3.2	Hornos de combustible directo.....	53
2.7.3.3	Crisoles.....	54
2.7.3.4	Hornos de arco eléctrico	55
2.7.3.5	Hornos de inducción	55
2.7.4	Defectos de fundición.....	56
2.7.5	Métodos de inspección en procesos de fundición.....	59



2.8 Estado del arte	59
2.8.1 Aportes del estado del arte a la presente tesis	60

CAPÍTULO III Método

3 MÉTODO	63
3.1 ETAPA 1: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	64
3.1.1 Definición y descripción de las piezas de prueba.....	65
3.1.2 Descripción de las técnicas de termografía a emplearse	65
3.1.3 Descripción de los equipos y materiales a utilizar	66
3.1.3.1 Cabezal de adquisición	66
3.1.3.2 Sujetador de partes.....	67
3.2 Etapa 2: Desarrollo de la experimentación	67
3.2.1 Técnica <i>Step heating</i>	67
3.2.2 Técnica <i>lock-in</i>	68
3.2.3 Técnica de vibrotermografía	68
3.3 Etapa 3: Procesamiento de imágenes	69
3.3.1 Algoritmos de detección de defectos	70
3.4 Etapa 4: Análisis de los datos obtenidos	70
3.5 Etapa 5: Validación del método	70

CAPÍTULO IV Resultados y conclusiones

4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	71
4.1 Etapa 1: Recolección de información	71
4.2 Etapa 2: Desarrollo de la experimentación	71
4.3 Etapa 3: Procesamiento de imágenes	74
4.4 Etapa 4: Análisis de los datos obtenidos	74
4.5 Etapa 5: Validación del método	75
4.6 Conclusiones	76
BIBLIOGRAFÍA	77



ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2-1. Estructura del marco teórico.	7
Figura 2-2. Anatomía del ojo humano.	9
Figura 2-3. Proceso de visión del ojo humano.	10
Figura 2-4. Descomposición de la luz blanca.	11
Figura 2-5. Espectro electromagnético.	12
Figura 2-6. Frecuencia de una onda sinusoidal.	13
Figura 2-7. Longitud de onda (λ).	13
Figura 2-8. Energía de una onda representada por cuerdas.	14
Figura 2-9. Etapas del procesamiento digital de imágenes.	18
Figura 2-10. Captura remota de una imagen térmica de un motor.	28
Figura 2-11. Captura de imagen térmica de un tablero eléctrico.	29
Figura 2-12. Esquema de una configuración de termografía activa.	30
Figura 2-13. Pistola de calor (izquierda) y manta térmica (derecha).	32
Figura 2-14. Lámparas de flash (izquierda) y halógenas (derecha).	33
Figura 2-15. Termografía pulsada.	34
Figura 2-16. Termografía lock-in.	35
Figura 2-17. Configuración básica de un experimento por vibrotermografía.	36
Figura 2-18. Configuraciones experimentales de VT burst (izquierda) y VT lock-in (derecha).	37
Figura 2-19. Acoplador de ultrasonido.	38
Figura 2-20. Configuración de un experimento de termografía por termo-inducción.	40
Figura 2-21. Lingotes de aluminio formados por un proceso de fundición.	41
Figura 2-22. Válvula de aluminio manufacturada por procesos de fundición de forma.	42
Figura 2-23. Molde para fundición de aluminio a alta presión.	43
Figura 2-24. Fundición con molde abierto.	44
Figura 2-25. Fundición con molde cerrado.	44



Figura 2-26. Pieza de aluminio maquinada después de ser fundida.	45
Figura 2-27. Fundición a baja presión.	48
Figura 2-28. Fundición al vacío con molde permanente.	49
Figura 2-29. Ciclo de fundición con cámara caliente.	50
Figura 2-30. Ciclo de fundición con cámara fría.	51
Figura 2-31. Proceso de fundición a alta presión.	52
Figura 2-32. Cubilote para fundir hierro colado.	53
Figura 2-33. a) Crisol móvil, b) Crisol estacionario y c) Crisol de volteo.	54
Figura 2-34. Horno de arco eléctrico.	55
Figura 2-35. Horno de inducción.	56
Figura 2-36. Defecto de vacío.	56
Figura 2-37. Defecto de cierres fríos.	57
Figura 2-38. Defecto de gránulos fríos.	57
Figura 2-39. Defecto de cavidad por contracción.	58
Figura 2-40. Defecto de microporosidad.	58
Figura 2-41. Defecto de desgarre caliente.	59
Figura 3-1. Diagrama de flujo del método.	64
Figura 3-2. a) Transmisión CVT, b) TC case, c) Sección del TC case bajo estudio. .	65
Figura 3-3. <i>Jig</i> de sujeción para partes de prueba.	67
Figura 3-4. Pistola de calor Milwaukee 8889-20 para método <i>step heating</i>	68
Figura 3-5. Lámpara de halógeno para método <i>lock-in</i>	68
Figura 3-6. Transductor de ultrasonido.	69
Figura 3-7. Configuración de vibrotermografía.	69
Figura 4-1. <i>Step heating</i> para pieza en buen estado.	72
Figura 4-2. <i>Lock-in</i> para pieza en buen estado.	72
Figura 4-3. <i>Step heating</i> para las muestras.	73
Figura 4-4. <i>Lock-in</i> para las muestras 1 (izquierda) y 2 (derecha) defectuosas.	73
Figura 4-5. Vibrotermografía de pieza defectuosa.	74



Tabla 2.1. Métodos de evaluación no destructiva	24
Tabla 2.2. Investigaciones con aporte a la presente tesis.....	60
Tabla 4.1. Comparación cualitativa de las técnicas de análisis utilizadas.....	75



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

En las secciones 1.1.1 y 1.1.2 se describen los antecedentes relacionados con la investigación, así como la descripción del problema.

1.1.1 Antecedentes

La creciente demanda en la industria metal mecánica obliga a sus ingenieros a que desarrollen métodos de inspección y evaluación más rápidos y eficientes con el propósito de no afectar la producción con paros de línea prolongados, y que se utilice la menor cantidad de recursos. Aunado a lo antes mencionado, en algunos procesos se requiere que la pieza sospechosa no sea destruida para su análisis, ya que el costo que genera la destrucción de la pieza puede llegar a ser alto si se tiene un lote grande a inspeccionar.

Shull (2002), menciona que las técnicas de evaluación no destructiva (END), permiten detectar anomalías, descubrir defectos térmicamente no conductores como fisuras, porosidad o delaminaciones, y detectar la presencia de objetos extraños sin afectar la integridad física del objeto bajo inspección.

La termografía es un método nuevo dentro de las técnicas de evaluación no destructiva, y tiene la ventaja de que es rápida, sin contacto y provee un campo amplio de información. Actualmente, es usada principalmente para detectar defectos que afectan la conductividad térmica del material en áreas perpendiculares a su superficie (Broberg, 2012), así como caracterizar la falla y predecir el comportamiento de determinado material donde la variable temperatura juega un papel importante.

Por consiguiente, la termografía infrarroja ha comenzado a adoptarse en la industria, no únicamente como una herramienta para el mantenimiento, sino también como una



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

herramienta de análisis en procesos de fundición, forjado, ensamble, maquinado y áreas de análisis de partes en calidad.

1.1.2 Descripción

En una planta de transmisiones que se encuentra en la región del bajo, se tiene un proceso en la línea de ensamble donde se inspecciona si la transmisión, ya ensamblada, tiene fugas de aceite. Dado que el funcionamiento de esta transmisión se basa en cambios en la presión de aceite, una fuga sería un problema grave; tomando en cuenta que pondría en peligro no solo el funcionamiento del automóvil donde sea montada, sino también la vida del usuario.

Durante una corrida normal de producción se encontró que al menos tres unidades presentaban una ligera fuga en una pieza fundida de aluminio que funge como tapa de uno de los costados de la transmisión. Para corroborar la fuga, la transmisión tiene que ser desmontada de la línea de ensamble, y se envía a uno de los departamentos de calidad que se encarga de hacer pruebas de funcionamiento. El proceso desde que se encuentra la falla en la línea de ensamble hasta que se monta en el dínamo de pruebas es largo, ya que al menos el montaje en el dínamo toma media hora, y las pruebas para determinar si existe fuga o no, pueden llegar a durar un día completo.

Para asegurar los demás lotes sospechosos no se puede realizar la inspección antes mencionada, ya que la velocidad de análisis es lenta. Por lo tanto, se ha tenido que recurrir a construir una línea adicional que se dedica únicamente a la inspección. El método de inspección que se está utilizando es el de líquidos penetrantes, por medio de una solución fluorescente. Sin embargo, no es algo sencillo debido a que los recursos a utilizar son demasiados. La siguiente lista describe brevemente algunos de los recursos materiales y humanos que requiere la actividad de inspección con líquidos penetrantes:

- Construcción de una línea adicional que, en condiciones normales de operación, no existe.



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- El paro de actividades normales de 8 asociados directos de producción, dos coordinadores (uno de calidad y otro de manufactura) y tres miembros del equipo de calidad.
- Creación de listas de verificación del producto.
- Creación de normas de operación estándar.
- Equipo de protección personal.
- Latas de líquido penetrante.
- Productos de limpieza para remover el líquido penetrante.
- Patines eléctricos para mover los contenedores, etc.

Cabe mencionar que el método de líquidos penetrantes es invasivo y únicamente funciona si la fisura se encuentra en la superficie, por lo que hablando de una falla más profunda, este método no garantiza al 100% el producto.

1.2 Objetivos

En la sección 1.2 se describen el objetivo general y específico para la presente investigación.

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un método para la detección de fallas en piezas de aluminio fundidas a alta presión tales como; fracturas, porosidad y fisuras mediante termografía infrarroja activa.

1.2.2 Objetivos específicos

- Utilizar, si es posible, tres técnicas de termografía activa para la evaluación no destructiva (vibrotermografía, *step heating* y *lock-in*).
- Definir las técnicas de procesamiento de las imágenes para cada una de las técnicas de termografía activa antes mencionadas.



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Hacer un análisis comparativo entre estas tres técnicas de termografía utilizadas con el fin de determinar cuál de ellas proporciona un mejor resultado en términos de detección.

1.3 Hipótesis

El desarrollo de un método de evaluación no destructiva mediante termografía infrarroja activa permitirá detectar las fisuras en piezas de aluminio fundidas a alta presión por medio del análisis del contraste térmico que existe entre un punto sano (o sin fallas) y un punto dañado cuando éstos son estimulados térmicamente por un agente externo.

1.4 Preguntas de investigación

- ¿Cuál será la configuración experimental a utilizar?
- ¿Cuáles son las características de las pruebas experimentales?
- ¿Para la captura de las imágenes se considerará una secuencia de imágenes o una grabación?
- Para la vibrotermografía; ¿qué tipo de ultrasonido es el más adecuado?
- ¿Qué técnica se utilizará para el procesamiento de las imágenes obtenidas?
- ¿El análisis de los datos se hará mediante modelo matemático, regresión lineal o prueba de hipótesis?

1.5 Justificación

Las piezas de aluminio fundidas a alta presión normalmente presentan fallas si en el proceso de fundido hay un punto de cambio en el molde. La planta de transmisiones donde se llevó a cabo la investigación recibe estas partes de un proveedor externo, por lo que anteriormente no tenían un método definido para evaluar estas piezas. El primer hallazgo obligó a sus ingenieros a idear un método que les permitiera evaluar



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

las piezas que tenían en el inventario, por lo que optaron por un método sencillo de líquidos penetrantes, sin embargo, este método requiere de un tiempo de preparación muy largo y no garantiza la detección de las fisuras si éstas no se encuentran en la superficie.

La termografía infrarroja está comenzando a usarse en una gran cantidad de aplicaciones en la que la variable temperatura juega un papel importante. Asimismo, es una herramienta de análisis, que, al ser del tipo no destructivo, se convierte en un instrumento de diagnóstico y prevención rápido y eficiente. Las diferentes técnicas de termografía infrarroja activa brindan mayor información a los analistas, y aunque los conocimientos necesarios para emplearla son más complejos, una vez que se tiene el algoritmo de análisis, permiten obtener mejores resultados en términos de detección de la falla.

1.6 Alcances y limitaciones

El alcance de esta investigación está delimitado desarrollo de un método de detección de fisuras en piezas de aluminio que son fundidas a alta presión por medio de termografía infrarroja activa.

1.7 Resultados esperados

1. Desarrollo de un método de detección de fisuras en piezas de aluminio fundidas a alta presión por medio de termografía infrarroja activa.
2. Implementación de una configuración experimental en un ambiente controlado del tipo *step heating*, *lock-in* o vibrotermografía.
3. Análisis comparativo para definir cuál de las tres técnicas utilizadas brindan un resultado más confiable en términos de detección.
4. Diseñar un laboratorio experimental de termografía infrarr



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2 Marco Teórico

El marco teórico se divide en ocho secciones principales: elementos de la percepción visual, imágenes digitales, procesamiento digital de imágenes, procesamiento de imágenes termográficas, evaluación no destructiva, termografía infrarroja, fundición de metales y el estado del arte. En la Figura 2-1 se muestran las principales secciones y subtemas que conforman el marco teórico. Posteriormente, se describe detalladamente cada tema y subtema.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

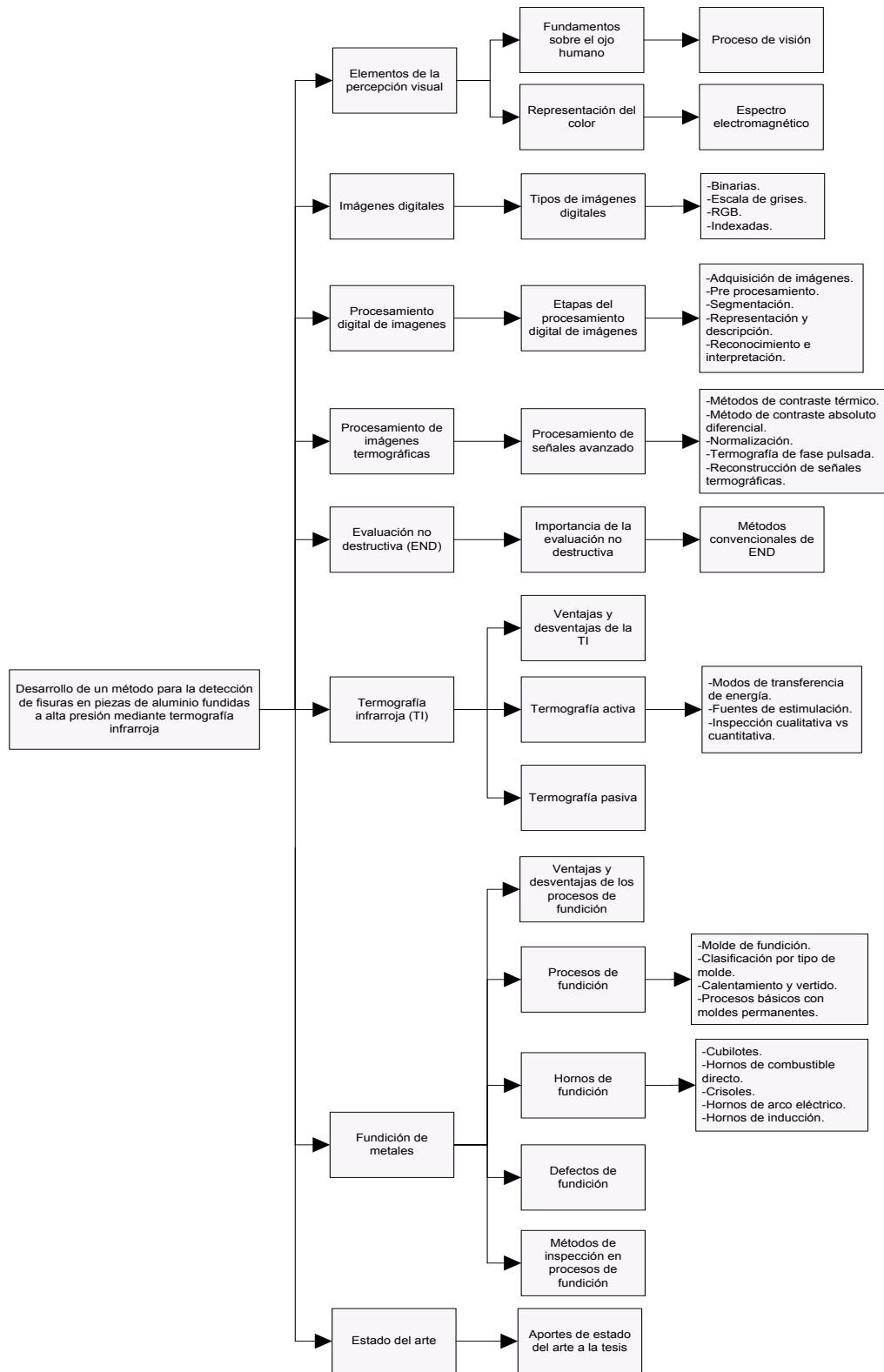


Figura 2-1. Estructura del marco teórico.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Elementos de la percepción visual

El campo del procesamiento de imágenes digitales es construido en fundamentos de formulaciones matemáticas y probabilísticas. El análisis y la intuición humana juegan un rol central en la elección de una técnica de procesamiento u otra, y esta elección regularmente está basada en juicios subjetivos. Por lo tanto, debemos desarrollar un entendimiento básico de la percepción visual humana. En particular, sólo interesa el mecanismo y los parámetros relacionados a cómo el ojo humano forma y percibe las imágenes. El interés se centra en aprender las limitaciones de la visión humana en términos de factores que también son usados en imágenes digitales (Gonzalez & Woods, 2007).

2.1.1 Fundamentos sobre el ojo humano

El ojo humano es el órgano que nos da el sentido de la percepción de la vista, permitiéndonos observar y aprender más acerca del mundo a nuestro alrededor que cualquier otro de los sentidos. Usamos nuestros ojos casi en todas las actividades que desarrollamos; al leer, trabajar, mirar televisión, escribir una carta y manejar un vehículo, por mencionar algunas. La mayoría de gente probablemente estaría de acuerdo con que la vista es el sentido que más valoran. El ojo nos permite ver e interpretar formas, colores y dimensiones de objetos en el mundo por medio del procesamiento de la luz que ellos reflejan o emiten. El ojo es capaz de detectar la luz brillante o la luz tenue, sin embargo, no puede percibir objetos cuando tienen ausencia de luz (Montgomery, 2016).

La visión depende principalmente de un órgano sensorial, el ojo. La construcción del ojo varía en complejidad dependiendo de las necesidades del organismo. El ojo humano es una de las estructuras más complicadas sobre la tierra, y requiere muchos componentes para permitir las avanzadas capacidades visuales (Boundless Psychology, 2016). El ojo tiene tres capas principales:



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

1. La esclerótica; que mantiene, protege, y soporta la forma del ojo e incluye la córnea.
2. La coroides; que proporcionan oxígeno y nutrientes e incluye la pupila, el iris y el cristalino.
3. La retina; que nos permite unir imágenes e incluye los conos y bastones.

Las partes que componen el ojo humano se muestran en la Figura 2-2.

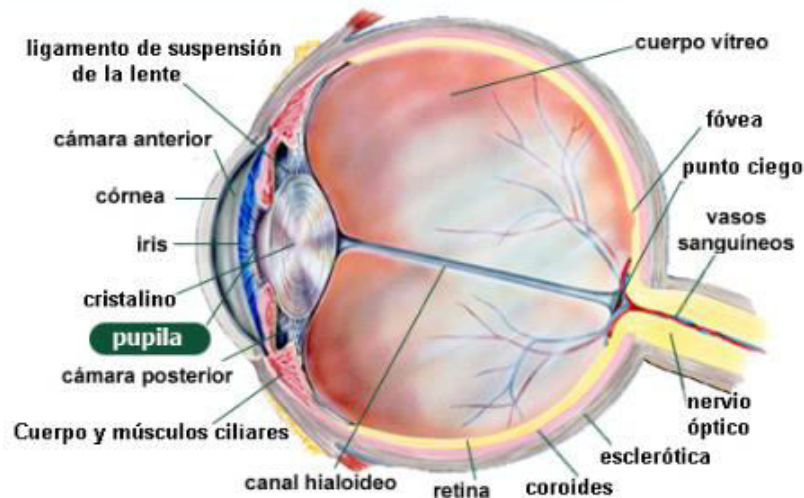


Figura 2-2. Anatomía del ojo humano.

2.1.1.1 Proceso de visión

La visión está basada en la percepción de ondas electromagnéticas. La Figura 2-3 describe el proceso donde estas ondas pasan a través de la córnea en forma de luz; la córnea enfoca las ondas cuando entran al ojo a través de la pupila, la apertura negra al frente del ojo. La pupila actúa como una barrera, permitiendo pasar tanta luz como sea necesaria para ver una imagen apropiadamente. El área pigmentada alrededor de la pupila es el iris, que es el responsable de actuar como una barrera de la pupila, o esfínter. Dos capas de músculo del iris contraen o dilatan la pupila para cambiar la cantidad de luz que entra en el ojo. Detrás de la pupila está la lente o cristalino, que es similar en forma y función a una lente de cámara. Junto con la córnea, la lente ajusta la longitud focal de la imagen que se ve en la parte posterior del ojo, la retina. La



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

recepción visual se produce en la retina donde las células foto receptoras llamadas conos y varillas dan una imagen de color y sombra. La imagen es transducida en impulsos neuronales y luego se transfiere a través del nervio óptico al resto del cerebro para su procesamiento, la corteza visual en el cerebro interpreta la imagen para extraer la forma, el significado, la memoria y el contexto (Boundless Psychology, 2016).

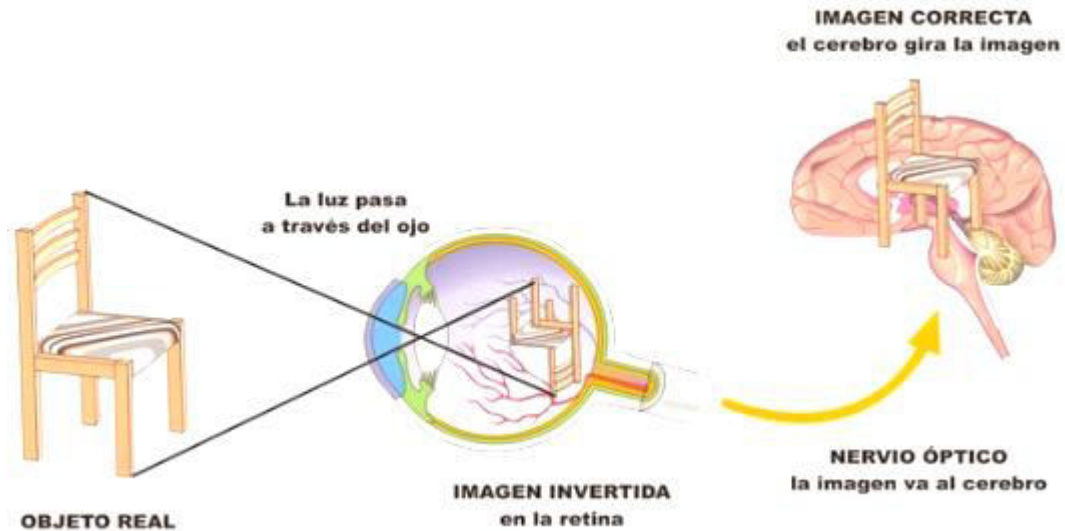


Figura 2-3. Proceso de visión del ojo humano.

2.1.2 Representación del color

El color es un fenómeno físico de percepción visual, relacionado con las diferentes longitudes de onda en la zona visible del espectro electromagnético, y como consecuencia de la combinación de tres factores; luz reflejada y transmitida, el objeto y el observador (Martínez & Celemin , 2012). La cantidad de luz que interactúa con los objetos antes de llegar al ojo humano es lo que hace que distintos objetos muestren distintos colores, debido a que la cantidad de luz que se refleja en cada objeto es diferente (Fairchild & Melgosa, 2012).

En todo nuestro entorno hay colores que podemos percibir mediante nuestro sentido de la vista, donde hay luz, hay colores asociados. Al descomponer la luz encontramos que está compuesta por seis colores perceptibles por el ojo humano: rojo, anaranjado,



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

amarillo, verde, azul y violeta, como se muestra en la Figura 2-4 (García Santillan, 2008).

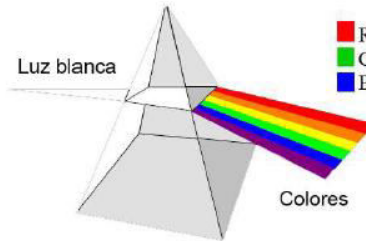


Figura 2-4. Descomposición de la luz blanca.

2.1.2.1 Espectro electromagnético

La energía electromagnética viaja a través de ondas y abarca un amplio espectro desde largas ondas de radio hasta pequeños rayos gamma. El ojo humano solo puede detectar una pequeña porción del espectro electromagnético, la luz visible. La luz está conformada por paquetes discretos de energía llamados fotones. Los fotones llevan impulso, no tienen masa y viajan a la velocidad de la luz (Butcher, 2016)

El color es un atributo que percibimos de los objetos cuando hay luz. La luz es una forma de energía que está constituida por ondas electromagnéticas que se propagan a unos 300 mil kilómetros por segundo (García Santillan, 2008). La longitud de onda es una característica importante de la onda electromagnética y varía desde fracciones de nanómetro ($1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ cm}$) hasta kilómetros como se muestra en la Figura 2-5. Todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes, las ondas reflejadas son captadas por el ojo e interpretadas como colores según las longitudes de onda correspondientes (Moreno, 2017).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

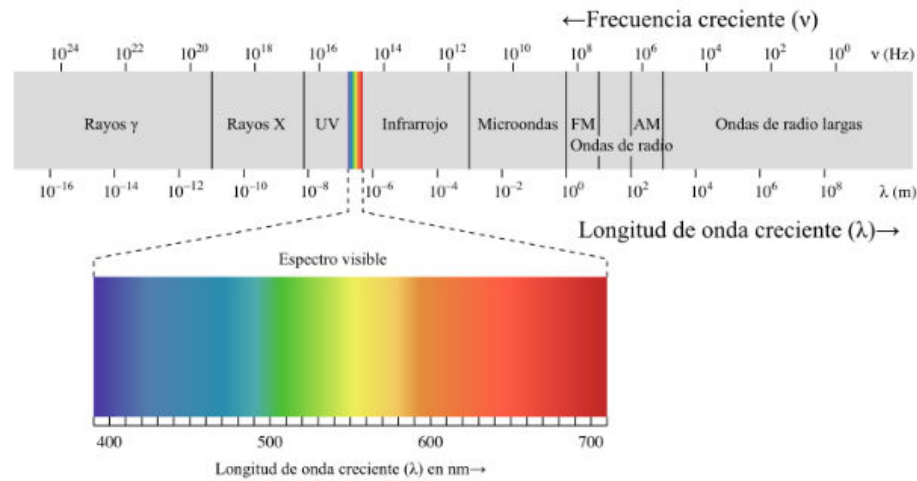


Figura 2-5. Espectro electromagnético.

- **Descripción de la energía electromagnética**

Los términos de luz, onda electromagnética y radiación se refieren al mismo fenómeno físico: energía electromagnética. Esta energía puede describirse por medio de la frecuencia, longitud de onda y potencial eléctrico. Estas tres características están relacionadas, de manera que, si se conoce una, las otras dos pueden ser calculadas. Las ondas de radio y microondas son usualmente descritas en términos de su frecuencia (Hertz), el infrarrojo y la luz visible en términos de su longitud de onda (metros), y los rayos X así como los gamma en términos de su potencial eléctrico (electrón-Volt) (Butcher, 2016).

a) Frecuencia

La frecuencia de una onda se puede describir como el número de crestas u oscilaciones que pasan un punto dado dentro de un segundo como se observa en la Figura 2-6. A un ciclo por segundo se le llama Hertz (Hz), que es la unidad de medida de la frecuencia.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

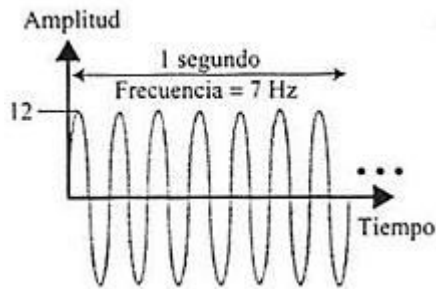


Figura 2-6. Frecuencia de una onda sinusoidal.

b) Longitud de onda

Las ondas electromagnéticas tienen crestas y valles similares a las olas del océano. La distancia entre las crestas es la longitud de onda como lo describe la Figura 2-7. Las longitudes de onda más cortas son apenas fracciones del tamaño de un átomo, mientras que las más largas que han sido estudiadas, pueden ser tan largas como el diámetro de nuestro planeta (Butcher, 2016).

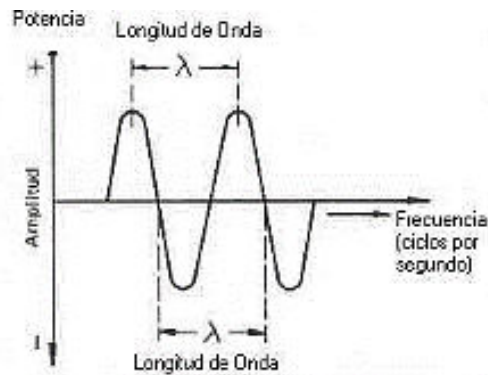


Figura 2-7. Longitud de onda (λ).

c) Potencial eléctrico (energía)

Una onda electromagnética puede ser descrita en términos de su energía, en unidades de medida llamadas electrón-Volt (eV). Un electrón-Volt es la energía cinética necesaria para mover un electrón a través de una diferencia de potencial o Volt. Moviéndose a lo largo de longitudes de onda largas a cortas, la energía aumenta a medida que la longitud de onda se acorta. Considere una cuerda de salto con sus extremos siendo tirados arriba y abajo como lo muestra la Figura 2-8. Se necesita más energía para hacer que la cuerda tenga más ondas (Butcher, 2016).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

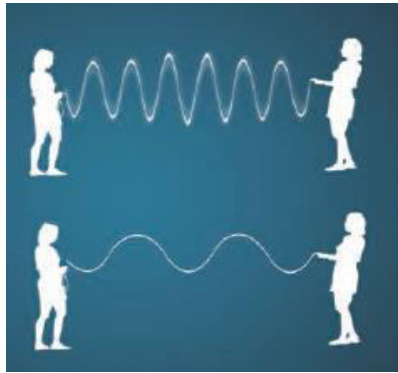


Figura 2-8. Energía de una onda representada por cuerdas.

2.2 Imágenes digitales

Para comenzar a hablar de imágenes digitales, primeramente, tenemos que definir qué es una imagen con el fin de no caer en ambigüedades ni utilizar la palabra de manera errónea. (Lengua, 2016) define la palabra imagen como la representación de algo, por otra parte, de acuerdo a la RAE (2016), una imagen es una figura, representación, semejanza y apariencia de algo, también la define como la reproducción de la figura de un objeto por la combinación de los rayos de luz que proceden de él. Para el propósito de esta tesis, una imagen será entonces una fotografía que representa un objeto.

Una imagen puede ser definida como una función bidimensional, $f(x,y)$, que representa el brillo, donde x e y son coordenadas espaciales (en un plano de dos dimensiones) y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas (x,y) es la intensidad o nivel de grises de la imagen en ese punto. Cuando los valores de f ; x , y y los niveles de grises son todos finitos, cantidades discretas, es decir, que se representan por medio de números enteros, se dice que es una imagen digital (Gonzalez & Woods, 2007).

Una imagen digital se compone de un número finito de elementos, cada uno con un lugar y valor específicos. Estos elementos son llamados *pe/s*, píxeles, elementos de la imagen o elementos de la foto (Vilet, 2004).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.2.1 Tipos de imágenes digitales

2.2.1.1 Binarias

Cada pixel es blanco o negro debido a que solo hay dos valores posibles para cada pixel. Solo se necesita un bit por pixel. Por lo tanto, tales imágenes pueden ser muy eficientes en términos de almacenamiento. Este tipo de imágenes pueden ser por ejemplo; texto impreso o a mano, huellas digitales o planes de arquitectura (McAndrew, 2004).

2.2.1.2 Escala de grises

Cada pixel es una forma de gris, normalmente de 0 (negro) a 255 (blanco). Este rango significa que cada pixel puede ser representado por ocho bits, o exactamente un bit. Este es un rango natural para el manejo de las imágenes de archivo. Otros rangos de escala de grises son usados en medicina (rayos x), imágenes de trabajos impresos. Y de hecho 256 niveles de gris son suficientes para el reconocimiento de la mayoría de objetos naturales (McAndrew, 2004).

2.2.1.3 Color verdadero, RGB

Cada pixel tiene un color en particular; ese color se puede describir por la cantidad de rojo, verde, y azul que tiene. Si cada uno de esos componentes tiene un rango de 0-255, da un total de $255^3 = 16,777,216$ posibles colores diferentes en la imagen. Debido a que el número total de bits requeridos para cada pixel es 24, tales imágenes son llamadas imágenes de color de 24-bits (McAndrew, 2004).

2.2.1.4 Indexadas

La mayoría de imágenes a color tienen un pequeño subconjunto de más de 16 millones posibles de colores. Para beneficio de almacenamiento y manejo de archivo, la imagen tiene un mapa de colores asociado, también llamada paleta de colores, la cual es simplemente una lista de todos los colores usados en la imagen. Cada pixel tiene un



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

valor, que no representa su color (como en la imagen RGB), sino un índice al color en el mapa (McAndrew, 2004).

2.3 Procesamiento digital de imágenes

Durante las últimas dos décadas, computadoras digitales de bajo costo y de gran alcance han llegado a ser ampliamente disponibles y se han utilizado para un gran número de tareas. Ahora, los detectores de imagen se empiezan a utilizar conjuntamente con las computadoras, por lo que se han comenzado a crear sistemas muy capaces para analizar y manipular imágenes que se utilizan en muchas áreas. Por ejemplo, se pueden utilizar para reconstruir imágenes de rayos X y resonancias magnéticas en medicina, para analizar imágenes satelitales para uso militar o medio ambientales, para leer códigos de productos y precios en tiendas departamentales, solo por nombrar algunos (Roger L. Easton, 2010).

El procesamiento de imágenes involucra el cambio de la naturaleza de una imagen con el propósito de:

- Mejorar su información gráfica para interpretación.
- Hacerla más adecuada para la percepción de una máquina autónoma.

El procesamiento de imágenes digitales implica el uso de una computadora para cambiar la naturaleza de una imagen digital. Es necesario darse cuenta de que estos dos aspectos representan dos aspectos separados, pero igualmente importantes en el procesamiento de imágenes (McAndrew, 2004).

Para propósitos de esta tesis se considerarán tres tipos de procesos que comienzan en el procesamiento digital de imágenes, pasan a través del análisis de imágenes y terminan en la visión por computadora. A continuación, se describen brevemente estos tres procesos que fueron extraídos de (Vilet, 2004):



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

- **Procesos de bajo nivel:** utilizan operaciones como el procesamiento de imagen para reducir ruido, mejora del contraste y filtros de enfoque. Se caracterizan porque sus entradas son imágenes y sus salidas también.
- **Procesos de nivel medio:** Operaciones como segmentación y clasificación de objetos individuales. Se caracterizan porque sus entradas son generalmente imágenes, pero sus salidas son atributos extraídos de esas imágenes (contornos, bordes, identidad de objetos individuales).
- **Procesos de alto nivel:** Implica el obtener algún significado de un conjunto de objetos reconocidos –análisis de imágenes- y, finalmente, realizar las funciones cognitivas asociadas con la vista.

2.3.1 Etapas del procesamiento digital de imágenes

Para llevar a cabo el procesamiento digital de imágenes hay que tener una base de conocimiento. Esta base de conocimientos mantiene todo lo que se conoce acerca del problema tratado. Este conocimiento puede ser simple, teniendo sólo las regiones de la imagen donde la información de interés se conoce que está localizada, con lo que se limita la búsqueda que conduce a esa información. La base de conocimientos puede ser compleja, tal como una lista interrelacionada de todos los defectos mayores posibles en un problema de inspección de materiales o una base de datos de imágenes conteniendo imágenes de satélite en alta resolución de una región en conexión con aplicaciones de detección de cambios. Además de guiar la operación de cada módulo del proceso. La base de conocimientos también controla la interacción entre módulos (Fraga, 2016). La Figura 2-9 muestra las etapas del procesamiento digital de imágenes.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

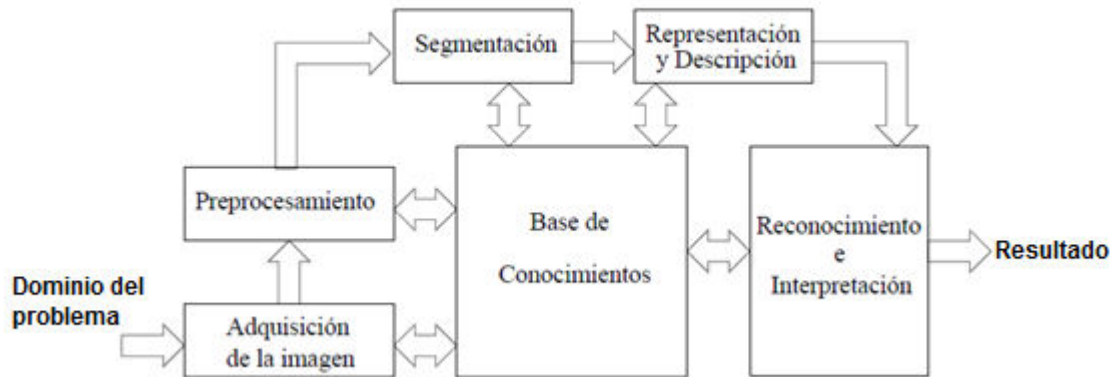


Figura 2-9. Etapas del procesamiento digital de imágenes.

2.3.1.1 Adquisición de imágenes

Este proceso consiste en digitalizar la imagen. Los tipos de imágenes que nos interesan se generan por una combinación de una fuente de iluminación y la reflexión o absorción de energía de esta fuente por parte de los elementos de la escena. Recordemos que esta iluminación puede ser también radar, infrarrojo, o alguna fuente que no es parte del espectro electromagnético, como ultrasonido (Vilet, 2004).

2.3.1.2 Pre-procesamiento

El pre-procesamiento consiste en mejorar la imagen. El principal propósito es procesar la imagen para que el resultado sea más conveniente que la imagen original para una aplicación específica. La mejora de la imagen se divide en dos categorías: métodos del dominio espacial y métodos del dominio de la frecuencia. En los primeros, se trabaja sobre el plano de la imagen y se manipulan directamente los píxeles. En los segundos, se modifica la transformada de Fourier de una imagen (Vilet, 2004).

2.3.1.3 Segmentación

La segmentación particiona una imagen de entrada en sus partes constituyentes u objetos. En términos del reconocimiento de caracteres, el rol de la segmentación es



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

extraer caracteres individuales y palabras del fondo de la imagen (Fraga, 2016). Dicho de otra manera, la segmentación particiona la imagen en regiones.

2.3.1.4 Representación y descripción

Estos términos se refieren a extraer características particulares que nos permiten diferenciar entre objetos. Aquí es donde se buscarán curvas, agujeros y esquinas que nos permiten distinguir los diferentes dígitos que constituyen un post-código (Vilet, 2004). La representación y descripción casi siempre sigue después de la salida de una etapa de segmentación, que usualmente son datos de píxeles, constituyendo ambas; los límites de una región o todos los puntos en la región misma (Gonzalez & Woods, 2007).

2.3.1.5 Reconocimiento e interpretación

En esta etapa se asignan etiquetas a objetos basados en sus descriptores y se asignan significados a esas etiquetas. De esta manera, se identifican dígitos particulares, y se interpreta una cadena de cuatro dígitos al final de la dirección del post-código (McAndrew, 2004).

2.4 Procesamiento de imágenes termográficas

El procesamiento de imágenes termográficas contiene las mismas etapas de procesamiento convencionales, sin embargo, la diferencia radica después de pre-procesado. Una vez que la señal infrarroja ha sido pre-procesada y transformada en temperatura, es posible realizar un tratamiento de imágenes, bien sea para fines de detección de defectos internos o bien, para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, talla y profundidad) (Ibarra Castanedo, 2005).

2.4.1 Procesamiento de señales avanzado

El término procesamiento de señales avanzado es empleado con la intención de distinguir este grupo de métodos de procesamiento de señales e imágenes básicos tales como promedio de imagen, substracción, división, filtrado, detección de bordes,



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

etc. que son aplicados principalmente como etapas de pre y post procesamiento. El procesamiento de señales avanzado puede ser categorizado en diferentes grupos de acuerdo a la manera en la que los datos serán manejados (Ibarra-Castanedo, Tarpani, & Maldague, 2013). En la siguiente lista se muestran la mayoría de las técnicas usadas para el procesamiento de imágenes termográficas:

- **Técnicas basadas en contraste térmico.**
 - Contraste térmico básico; absoluto, *running*, normalizado y estándar.
 - Tiempo anticipado.
 - Pendiente máxima.
 - Contraste máximo.
 - Contraste absoluto diferencial.
 - Tomografía térmica.
 - Reconstrucción de señales termográficas.
- **Técnicas estadísticas.**
 - Análisis estadístico usando parámetros informativos.
 - Momentos estadísticos.
 - Termografía de estadísticas de orden superior.
- **Técnicas de factorización de matrices.**
 - Termografía de componentes principales (PCT: *Principal Components thermography*).
 - Factorización de matriz no negativa.
 - Análisis arquetípico.
- **Transformadas de señales.**
 - Transformada de Fourier.
 - ✓ Termografía *lock-in* sensible a la fase.
 - ✓ Termografía de fase pulsada.
 - Transformada Wavelet.
 - ✓ Termografía de fase pulsada con transformada Wavelet.
 - Transformada Hough.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

- Transformada de Laplace.
- **Inteligencia artificial.**
 - Redes neuronales artificiales.
 - Cálculos evolutivos.

Los métodos térmicos, descritos a continuación se encuentran entre los más populares.

2.4.1.1 Métodos de contraste térmico

El contraste térmico en su modo más simple puede definirse como la diferencia entre la temperatura en una zona libre de defectos o “sana” y una región defectuosa (Ibarra Castanedo, 2005). Este método es el más empleado por su simplicidad, ya que consiste únicamente en el cálculo de diferencias de temperatura en zonas defectuosas respecto a una zona libre. Sin embargo, problemas tales como la no uniformidad de la estimulación térmica, diferencias de emisividad en la superficie y la geometría de la pieza afectan fuertemente a los resultados (Cañada & Royo, 2016).

2.4.1.2 Método de contraste absoluto diferencial (DAC)

Se desarrolló para solucionar los problemas que presentaba el método de contraste térmico. Se basa en la solución unidimensional de la ecuación de difusión de Fourier, asumiendo que la superficie de la pieza ha sido sometida a un pulso de Dirac. El DAC elimina la influencia de la no uniformidad en la excitación (Cañada & Royo, 2016). El DAC fue desarrollado para eliminar la necesidad de escoger un punto de referencia que defina el contraste térmico respecto a un área ideal (no defectuosa). A pesar de que la técnica DAC es muy útil para tiempos cortos, su precisión disminuye para tiempos largos cuando el frente de calor alcanza la cara opuesta de la muestra (Benítez, Ibarra-Castanedo, & Bendada, 2007).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.4.1.3 Normalización

Es una técnica de procesado donde el promedio del total de imágenes a ser procesadas se divide por la media del conjunto de imágenes donde se observa el mayor contraste térmico de la zona de interés. Esta técnica produce un importante realce del contraste y minimiza el impacto de la no uniformidad de la excitación térmica (Cañada & Royo, 2016).

2.4.1.4 Termografía de fase pulsada (PPT)

Permite pasar del dominio temporal al espectro de frecuencia con ayuda de la transformada de Fourier discreta (TFD). La idea es que cualquier función se puede descomponer en sinusoides, y en particular, la evolución temporal de la temperatura superficial de un objeto bajo excitación pulsada da lugar a una respuesta en amplitud y fase. A partir de estas respuestas se procesan secuencias de amplitud y fase para toda la superficie. La fase es particularmente interesante ya que está menos afectada por los problemas típicos de la termografía activa como: reflexiones del entorno, variaciones de emisividad, excitación o uniformidad, geometría de la superficie y orientación (Cañada & Royo, 2016).

Las ventajas que presenta la PPT se enuncian a continuación (Maldague & Marinetti, 1996):

- Menor sensibilidad a las perturbaciones ópticas en la superficie y las pruebas se pueden hacer a una mayor profundidad de la superficie.
- Menor sensibilidad a las perturbaciones infrarrojas en la superficie.
- Menor tiempo de adquisición para inspeccionar especímenes de mayor conductividad térmica.

2.4.1.5 Reconstrucción de señales termográficas (TSR)

La reconstrucción de señales termográficas es una técnica atractiva que permite incrementar la resolución espacial y temporal de una secuencia, reduciendo al mismo



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

tiempo la cantidad de datos a manipular. La TSR se basa en la suposición de que los perfiles de temperatura para pixeles no defectuosos deben de seguir la curva de decaimiento dada por la solución unidimensional de la ecuación de Fourier. Esta técnica tiene ventajas interesantes tales como: la reducción del ruido en la imagen, posibilidad de cálculos analíticos, requiere un menor almacenamiento de datos y el cálculo de las primera y segunda derivadas de los coeficientes es sencillo (Ibarra-Castaneda, 2007).

2.5 Evaluación no destructiva (END)

Se entiende por evaluación o ensayo no destructivo (END) la prueba que proporciona información acerca del objeto ensayado sin que este experimente ningún deterioro, tanto durante como al finalizar el ensayo (Cañada & Royo, 2016).

Los métodos de evaluación no destructiva son empleados en el campo técnico como precaución para evitar accidentes o situaciones de emergencia para el ser humano y el medio ambiente. Las aplicaciones de las técnicas de evaluación no destructiva son más profundas y amplias en enfoque que sólo la detección de defectos, por ejemplo, se pueden aplicar para la estimación de la integridad de los componentes y la oportuna iniciación de las medidas en la prevención de accidentes. El historial y la extensión de los defectos se debe conocer para una mayor evaluación de seguridad de los componentes (Erhard, 2013).

También, se puede definir como el proceso de inspección y análisis de un componente o elemento estructural para determinar su integridad. Así, la evaluación no destructiva no solo comprende todo el proceso de inspección no destructivo, sino también el análisis de los resultados de esta inspección para calificar la condición estructural del componente evaluado. Es fundamental distinguir entre los conceptos, evaluación no destructiva (END) e inspección no destructiva (IND), ya que el primero es un proceso más complejo que incluye al segundo (Carrion Viramontes, Lomelí Gonzalez, Quintana Rodríguez, & Martínez Madrid, 2003).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.5.1 Importancia de la evaluación no destructiva

La evaluación no destructiva es necesaria para asegurar la integridad de diversos productos sin importar el material. Y se usan mayormente para:

- Asegurar la integridad y fiabilidad del producto.
- Prevenir accidentes y salvar vidas humanas.
- Garantizar la satisfacción del cliente y mantener la reputación del fabricante.
- Mejora en el diseño del producto.
- Controlar los procesos de fabricación.
- Disminuir los costos de fabricación.

Todo esto obliga a realizar un proceso de interpretación de los resultados obtenidos a partir de las indicaciones suministradas, que para cada uno de los métodos está relacionado con:

- Los principios físicos y la instrumentación del método.
- El material ensayado.
- El proceso de fabricación.

2.5.1.1 Métodos convencionales de END

Existe una gran variedad de métodos de END. Cada uno de ellos se usa de acuerdo a las necesidades del analista. A continuación se describen los más comunes. Véase la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Métodos de evaluación no destructiva

Método	Fenómeno físico
Inspección visual (VT)	Luz Visible
Líquidos penetrantes (PT)	Capilaridad
Partículas magnéticas (MT)	Campo magnético
Corrientes inducidas (ET)	Corriente eléctrica
Radiografía industrial (RT)	Ondas electromagnéticas
Ultrasonido (UT)	Ondas elásticas
Termografía infrarroja (TI)	Ondas electromagnéticas



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

- a) **Inspección visual.** - Es el método más empleado, aunque en muchas ocasiones no se es consciente de ello. Se considera inspección visual al examen a simple vista de objetos con o sin ayuda de instrumentos ópticos sencillos (Cañada & Royo, 2016).
- b) **Líquidos penetrantes.** - Es una técnica basada en el fenómeno de capilaridad y se emplea generalmente para evidenciar discontinuidades abiertas a la superficiales sobre casi todos los materiales no porosos (o con excesiva rugosidad o escamado) como metales cerámicos, vidrios, plásticos, etc. (Echevarria, 2003).
- c) **Partículas magnéticas.** - En este ensayo se utiliza el efecto que produce un campo magnético al atravesar un material ferromagnético, es decir, si una pieza se coloca formando parte de un circuito electromagnético y se pulveriza con limaduras de hierro, se producen acumulaciones en algunas zonas que son precisamente en donde existen discontinuidades, como si formaran un puente metálico para suplir la falta de material (Cañada & Royo, 2016).
- d) **Corrientes inducidas.** - Cuando una corriente variable actúa en la proximidad de un material conductor, origina en este una corriente inducida que se distribuye según sea su naturaleza, espesor, homogeneidad, y será capaz de re-inducir en un conductor próximo una nueva corriente que es amplificada y se puede representar en un osciloscopio o en una pantalla digital (Cañada & Royo, 2016).
- e) **Radiografía.** - la radiografía se utiliza para la detección de defectos internos, como grietas, forjas, falta de fusión en productos soldados, fundiciones, etc. La ventaja de la radiografía es que se aplica a todo tipo de materiales y proporciona un registro visual del interior del material inspeccionado (González Velázquez, 1999).
- f) **Ultrasonido.** - Este método se basa en la medición de la propagación del sonido en el medio que constituye la pieza a analizar y tiene aplicación en todo



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

tipo de materiales. En el mantenimiento preventivo es muy utilizado para determinar pequeñas fisuras de fatiga. La manifestación de estas fallas es la interpretación, generalmente en un osciloscopio (Rimoldi & Mundo, 2016).

- g) **Emisión acústica.** - La emisión acústica regularmente es usada para detectar fallas en una etapa temprana, mucho antes de que la estructura del material falle. El monitoreo de emisiones acústicas continuas puede ser usado en el control de la operación de maquinaria, aunque sea difícil detectar la fuente de emisión (Grosse & Ohtsu, 2008).
- h) **Termografía infrarroja.** - Es un método que obtiene imágenes de la distribución de calor sobre la superficie del objeto ensayado. Utiliza la transmisión de calor por radiación como variable relacionada con la temperatura, por lo que no es necesario contacto físico con el objeto a analizar, ni un tiempo de estabilización de temperaturas, lo cual permite la realización de medidas en situaciones donde no sería posible realizarlas con termómetros convencionales (Cañada & Royo, 2016).

2.6 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja (TI) es una ciencia dedicada a la adquisición y procesamiento de información térmica de dispositivos de medición no invasivos (Maldague X. , 2001). Se basa en la radiación infrarroja, una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que aquellas de la luz visible. Cualquier objeto a una temperatura arriba del cero absoluto ($T > 0^{\circ}\text{K}$) emite radiación infrarroja (Modest, 2013).

La TI hace uso de cámaras para la detección de emisiones térmicas en el espectro infrarrojo (Ibarra Castanedo, 2005). Los sistemas de termografía están diseñados para captar las emisiones infrarrojas entre 3 y 13 μm de longitud de onda. Se apoya en que todos los cuerpos emiten radiación infrarroja a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (Cañada & Royo, 2016).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

El dispositivo infrarrojo más básico es el pirómetro, que produce una sola salida usando un solo sensor. Los dispositivos más avanzados incluyen un arreglo de sensores para producir una imagen infrarroja detallada de la escena. La diferencia entre una imagen visible y una imagen infrarroja es que la imagen visible es una representación de la luz reflejada en la escena, mientras que, en la imagen infrarroja, la escena es una fuente y puede ser observada mediante una cámara infrarroja sin luz (Usamantiega, y otros, 2014). El resultado es una imagen de falso color llamada termograma (Gaussorgues, 1994).

2.6.1 Ventajas de la termografía infrarroja

La Termografía infrarroja tiene muchas ventajas sobre otras tecnologías (Gade & Moeslund, 2014). En general, las principales ventajas son las siguientes:

- La TI es una tecnología sin contacto: los dispositivos usados no están en contacto con la fuente de calor. De esta manera, la temperatura de objetos extremadamente calientes o productos peligrosos, tal como los ácidos, pueden ser medidos con seguridad, manteniendo al usuario fuera de peligro.
- Provee imágenes térmicas bidimensionales, que hacen posible una comparación entre áreas con respecto al objetivo.
- La TI se ejecuta en tiempo real, que permite no solo el escaneado en tiempo real de los objetivos estacionarios, sino también la adquisición de objetivos que se mueven velozmente y de patrones térmicos que cambian rápidamente.
- No tiene ninguno de los efectos dañinos de la radiación de tecnologías tales como, rayos X. Por lo tanto, es adecuada para un uso prolongado y repetido.
- Es una técnica no invasiva. Por lo que no interfiere o afecta al objetivo de ninguna manera.

El hecho de que la TI sea una técnica de no contacto es de suma importancia debido a que el instrumento no afecta los resultados de la medición y puede ser llevada a cabo de manera remota como se puede observar en la Figura 2-10.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO



Figura 2-10. Captura remota de una imagen térmica de un motor.

2.6.2 Desventajas de la termografía infrarroja

La TI como toda tecnología tiene sus desventajas inherentes a la calidad del dispositivo usado (Usamantiega, y otros, 2014). Algunas desventajas son:

- El hardware se ha puesto a disposición recientemente, sin embargo, sigue siendo un dispositivo costoso. Algunos modelos muy accesibles con una resolución espacial suficientemente alta para la mayoría de las aplicaciones (640x512) han aparecido recientemente en el mercado. Sin embargo, estos modelos económicos con alta resolución espacial proporcionan una precisión menor, lo que los hace inutilizables para algunas aplicaciones
- Las imágenes infrarrojas pueden ser difíciles de interpretar; en general, se requiere un entrenamiento específico.
- La TI es altamente dependiente de las condiciones de trabajo tales como; la temperatura de los alrededores, flujo de aire y humedad. Por lo tanto, tiene que ser utilizada en ambientes controlados.

2.6.3 Termografía pasiva

En la termografía pasiva, la radiación proveniente del objetivo se mide sin ninguna estimulación de calor externa. Esta información puede ser utilizada para la medición



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

de temperatura de tableros eléctricos, motores y cableado como se puede observar en la Figura 2-11. La TI pasiva es usada para el control de calidad y aplicaciones de monitoreo de procesos. Por lo que, la medición de temperatura y monitoreo durante y después son críticos para alcanzar los resultados óptimos de los procesos industriales tales como; laminación de acero y sinterización. Sin embargo, el cálculo de la temperatura de las imágenes infrarrojas no solo se basa en la radiación medida; también depende de la calibración interna de la cámara, así como en la emisividad de la energía radiante del objeto. Así que, se requiere una configuración de calibración para obtener mediciones precisas (Usamantiega, y otros, 2014).



Figura 2-11. Captura de imagen térmica de un tablero eléctrico.

2.6.4 Termografía activa

La termografía activa es mayormente usada en aplicaciones de ensayos no destructivos donde se aplica una estimulación externa al espécimen con el propósito de inducir los contrastes térmicos relevantes entre las regiones de interés (Ibarra-Castaneda, y otros, 2003). Es aplicada en la inspección de materiales para la detección de defectos debajo de la superficie y también para detectar áreas del espécimen con diferentes propiedades debajo de la superficie. Algunas anomalías son muy sutiles. Por lo tanto, los niveles de señal asociados con estas anomalías se pueden perder en el ruido de los datos termográficos (Usamentiaga, García, & Molleda, 2008). En estos casos, se pueden usar diferentes métodos de post procesamiento para mejorar el contenido de la señal de ruido de los datos termográficos.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Se pueden aplicar muchos métodos diferentes de estimulación. La mayoría de ellos pueden ser clasificados como ópticos, mecánicos e inductivos. Los más comunes están basados en estimulación óptica, que usa luz para entregar energía térmica al espécimen. La estimulación aplicada genera calor, que se propaga en ondas térmicas desde la superficie a través del espécimen. Cuando las ondas térmicas alcanzan una anomalía, cambian su tasa de propagación, produciendo un contraste térmico en la superficie inmediatamente arriba de la anomalía (Meola & Carlomagno, 2010). Una posible configuración de una inspección mediante termografía activa se describe en la Figura 2-12 donde:

- 1) Son los dispositivos de estimulación térmica.
- 2) Es el espécimen a inspeccionar.
- 3) Es el dispositivo de captura de imágenes infrarrojas.
- 4) Es la etapa de procesamiento de las imágenes e interpretación de la información.

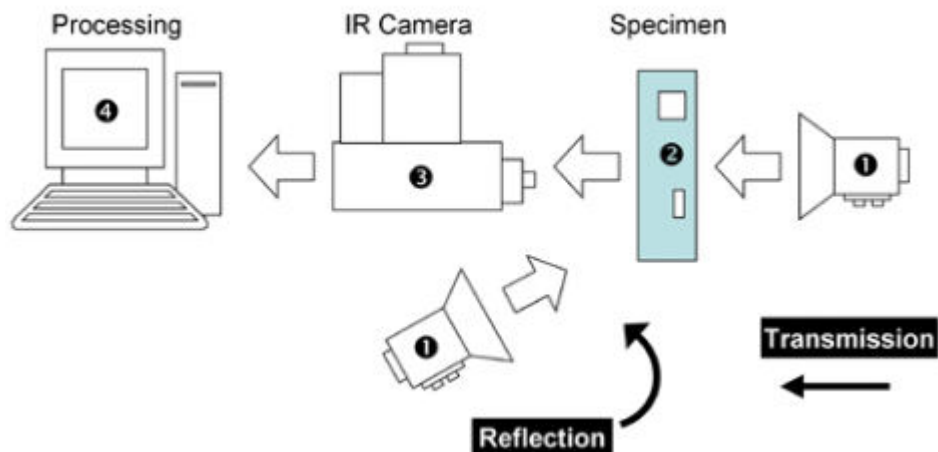


Figura 2-12. Esquema de una configuración de termografía activa.

En general, hay tres elementos involucrados en la evaluación no destructiva usando termografía infrarroja: una cámara infrarroja, una fuente de excitación térmica y un algoritmo de procesamiento de datos para mejorar la señal de ruido (Usamentiaga, Venegas, Guerediaga, Vega, & López, 2013).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.6.4.1 Modos de transferencia de energía

Existen tres formas en las que se puede transferir la energía al objeto inspeccionado con respecto a la posición de la cámara infrarroja:

- **Reflexión:** la energía es entregada a la muestra desde el mismo lado del cual las imágenes son capturadas.
- **Transmisión:** la energía es transmitida desde un lado de la muestra mientras que las imágenes se capturan del lado opuesto.
- **Interna:** en ésta, independientemente de la ubicación de la fuente de energía, se genera calor (o frío) internamente mientras que las imágenes son capturadas de cualquier lado de la muestra.

Las técnicas de reflexión y transmisión son usadas cuando se utilizan fuentes de estimulación tales como ópticas, conductivas y convectivas. Generalmente, el modo de reflexión se ajusta mejor a la detección de defectos localizados cerca de la superficie calentada, mientras que el enfoque de transmisión permite la detección de defectos más lejanos a la superficie. Las corrientes de *Eddy* y el ultrasonido son ejemplos de típicas fuentes de energía que generan calor internamente. En estos casos, el calor se produce en la cara interna del defecto desde donde viaja a la superficie de la muestra por medio de conducción (Ibarra-Castanedo, Tarpani, & Maldague, 2013).

2.6.4.2 Fuentes de estimulación

La aplicación de la TI como una técnica de evaluación no destructiva requiere un suministro extra de calor para inducir un cambio controlado en su temperatura. Los primeros sistemas de estimulación que fueron ampliamente usados para evaluación no destructiva usando TI fueron las mantas térmicas y pistolas de calor (Usamantiega, y otros, 2014). Estas fuentes de calor pueden verse en la Figura 2-13.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO



Figura 2-13. Pistola de calor (izquierda) y manta térmica (derecha).

Las mantas térmicas y las pistolas de calor son las técnicas más simples de estimulación térmica que fueron usadas inicialmente para la evaluación no destructiva mediante termografía infrarroja. Actualmente todavía se usan, proporcionando excelentes resultados para algunas aplicaciones. Sin embargo, para superar las desventajas de estas técnicas y para mejorar el porcentaje de detección de defectos, se han desarrollado nuevas técnicas.

Estimulación óptica

Las más populares son las técnicas ópticas (Busse, Wu, & Karpen, 1992). Las técnicas ópticas se aplican mediante lámparas de *flash* fotográficas o halógenas como las mostradas en la Figura 2-14, que emiten pulsos de energía; tanto para calentamiento continuo como modulado. Ambas tecnologías pueden ser usadas para estimular áreas grandes o pequeñas cambiando el número de lámparas, analizando no solo el enfriamiento, sino también la etapa de calentamiento, y proporcionando un alto porcentaje de repetitividad (Maldague & Marinetti, 1996).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO



Figura 2-14. Lámparas de flash (izquierda) y halógenas (derecha).

Existen dos técnicas que utilizan dispositivos ópticos como fuente de energía y su uso depende de cómo se introduce el calor en las estructuras o piezas:

- Termografía pulsada (calentamiento corto, pulsos de calor).
- *Lock-in* o termografía modulada (calentamiento modulado cíclico). En este caso es necesario sincronizar el calentamiento y la adquisición de las imágenes.

En la **termografía pulsada** (TP), la superficie de la muestra es sometida a un pulso de calor corto usando una fuente de alta potencia como lámparas de *flash* fotográficas; ver la Figura 2-15. Después de que el frente térmico entre en contacto con la superficie de la muestra, éste viajará a través de la pieza desde la superficie. A medida que el tiempo transcurra, la temperatura de la superficie disminuirá uniformemente para una pieza sin fallas internas. Por el contrario, las discontinuidades superficiales (porosidad, delaminaciones, fracturas, roturas en fibras, fisuras, etc.) pueden ser consideradas como resistencia al flujo de calor que producen patrones de temperatura en la superficie, y pueden ser detectadas por medio de una cámara infrarroja (Ibarra-Castaneda, y otros, 2007).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

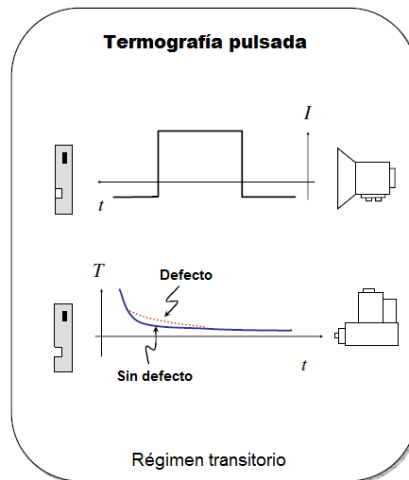


Figura 2-15. Termografía pulsada.

Usualmente se usan dos lámparas de *flash* fotográficas para calentar la superficie de la muestra, después de lo cual, los cambios térmicos se graban con una cámara infrarroja. Se necesita una unidad de sincronización para controlar el tiempo entre el lanzamiento del pulso térmico y la grabación con la cámara infrarroja. La termografía pulsada es el enfoque más investigado debido a su facilidad de aplicación, incluso aunque los datos son difíciles de manejar y analizar (Ibarra-Castanedo, y otros, 2007).

En la **termografía lock-in** (TL), también conocida como termografía modulada (Giorleo & Meola, 2002), la superficie de la muestra es iluminada periódicamente por una o varias fuentes de calor moduladas, por ejemplo lámparas halógenas, para inyectar ondas térmicas en la muestra. La Figura 2-16 describe un experimento de TL; se muestra una lámpara aunque es posible utilizar varias montadas en un marco para reducir el calentamiento no uniforme y para incrementar la cantidad de energía entregada a la superficie (Ibarra-Castanedo, y otros, 2007).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

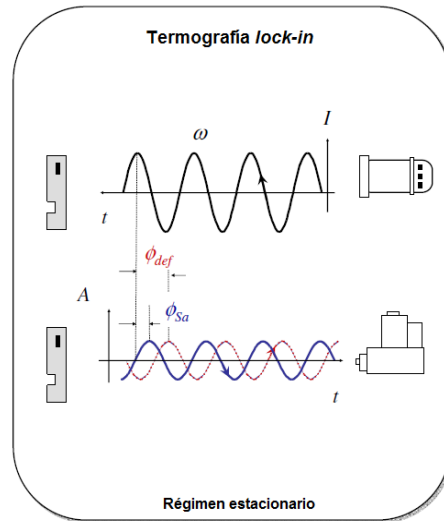


Figura 2-16. Termografía lock-in.

La onda periódica se propaga por radiación a través del aire hasta que alcanza la superficie de la muestra donde se produce calor y posteriormente se propaga a través del material. Los defectos internos actúan como barrera para la propagación del calor, lo que produce cambios en la amplitud y la fase de la señal de respuesta en la superficie. La respuesta térmica es grabada al mismo tiempo usando una cámara infrarroja capaz de monitorear la superficie completa (o una gran parte de ella), típicamente en una configuración de matriz de *pixeles* de 320x256 o 640x512. Las ondas sinusoidales se usan comúnmente, aunque también es posible usar otras formas de onda periódicas. El uso de ondas sinusoidales como señal de entrada tiene la ventaja de que se preservan la frecuencia y la forma de la respuesta; únicamente la amplitud y el retraso de la fase de la onda pueden cambiar (Ibarra-Castanedo, y otros, 2007).

En general, las técnicas de estimulación óptica proveen muy buenos resultados. Sin embargo, hay defectos específicos tales como fisuras en partes metálicas y algunos insertos en materiales de polímero de fibra de carbón reforzado (CFRP: *Carbon-fiber-reinforced polymer*), en los cuales las técnicas de estimulación óptica no proporcionan un contraste térmico suficiente. Para superar esta limitación, se han desarrollado técnicas de estimulación avanzada como la vibrotermografía (Zweschper, Dillenz,



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Riegert, Scherling, & Busse, 2003) y la termografía por termo-inducción (Netzelmann & Walle, 2008).

Estimulación mecánica

Vibrotermografía (termografía por ultrasonido)

La vibrotermografía (VT), también conocida como termografía por ultrasonido (Dillenz, Zweschper, & Busse, 2001) o pulsos de sonidos térmicos (Favro, y otros, 2000), hace uso de ondas mecánicas para estimular directamente los defectos sin calentar la superficie de la muestra como lo hacen los métodos ópticos, ver Figura 2-17. El calor generado por la fricción de las discontinuidades, fisuras o incluso delaminaciones es inducido mediante el efecto de la estimulación mecánica (20-50 Hz) aplicada externamente a la estructura. Estas discontinuidades son excitadas bajo resonancias mecánicas específicas. Dependiendo en la variación de la frecuencia de estimulación mecánica, los gradientes térmicos locales que indican la presencia del defecto pueden aparecer o desaparecer (Usamantiega, y otros, 2014).

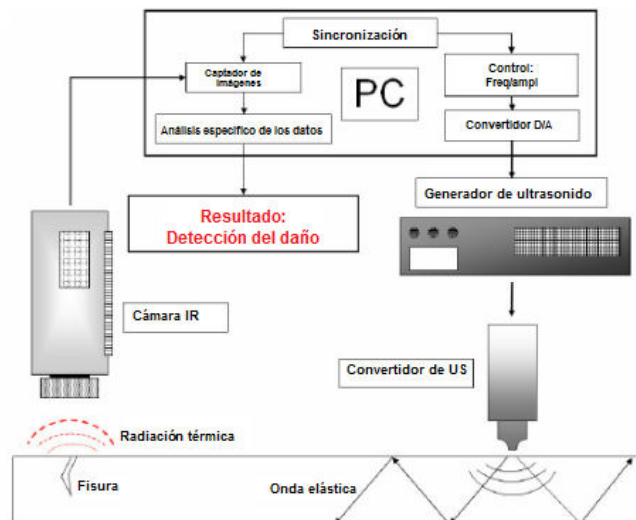


Figura 2-17. Configuración básica de un experimento por vibrotermografía.

Se genera una señal ultrasónica de alta frecuencia a 40 kHz y, adicionalmente, se modula con otra señal de baja frecuencia. La configuración de la prueba se describe



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

de la siguiente manera: una bocina (sonotrodo) inyecta ondas de ultrasonido en el material; las ondas de baja frecuencia hacen posible la propagación, mientras que la vibración de alta frecuencia produce calor por medio de la fricción de las partículas (Usamantiega, y otros, 2014).

Existen dos configuraciones para VT que pueden ser consideradas como análogas a los métodos ópticos descritos anteriormente. La primera es la vibrotermografía *burst* o de ráfaga, que es análoga a la termografía pulsada; y la segunda técnica es la vibrotermografía *lock-in* o de amplitud modulada, análoga a la termografía *lock-in*, Ver Figura 2-18. También es posible modular la frecuencia en ambas configuraciones, *lock-in* y *burst* (Zwescher, Riegert, Dillenz, & Busse, 2003).

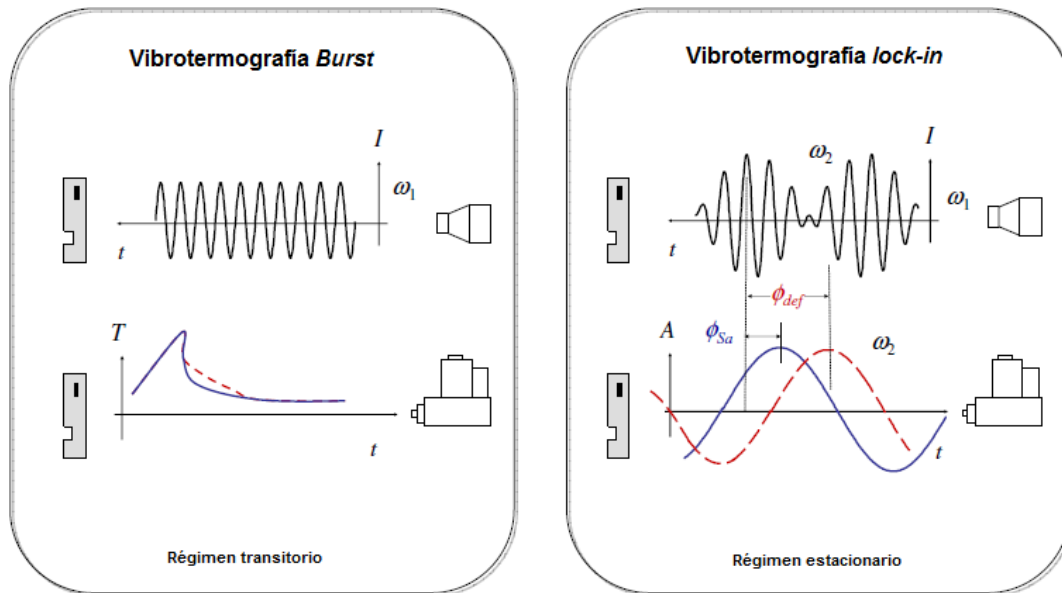


Figura 2-18. Configuraciones experimentales de VT burst (izquierda) y VT lock-in (derecha).

Este proceso es llamado en algunas ocasiones como *wobulation*. La idea es cubrir un rango de frecuencias de ultrasonido, en lugar de solo una, debido a que no siempre es posible predecir la frecuencia correcta para una aplicación en particular. La *wobulation* de ultrasonido puede ser comparada a un pulso de calor que está compuesto de ondas térmicas en varias frecuencias.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

La *wobulation* también es útil para prevenir la aparición de ondas estacionarias que se producen cuando se trabaja a la frecuencia de resonancia de armónicos naturales del material (Ibarra-Castanedo, y otros, 2007). En la práctica, sin embargo, algunas veces es preferible repetir la adquisición a diferentes frecuencias, puesto que los transductores comerciales usados comúnmente no son adecuados para modulaciones de frecuencia.

La onda de ultrasonido es producida por un transductor fabricado de una pila de elementos piezoeléctricos y concentrado en una bocina de titanio que actúa como un martillo, ver Figura 2-19. Por lo tanto, la pieza inspeccionada debe ser inmobilizada de manera firme (pero sin dañarla) para evitar palmadas o deslizamientos del transductor. La bocina del transductor tiene que ser presionada contra la muestra para mejorar la transmisión de acoplamiento del ultrasonido de la muestra.

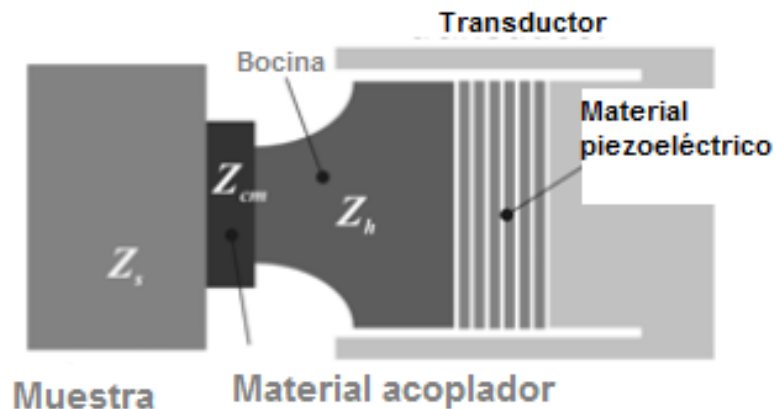


Figura 2-19. Acoplador de ultrasonido.

Es altamente recomendada la inserción de un material entre el transductor y la muestra, no solo como medio de acoplamiento, sino también para evitar daños en la muestra y desalineación (Ibarra-Castanedo, y otros, 2007). Un mal acoplamiento, implica una mala transmisión del ultrasonido, pero más gravemente, crea calor no deseado en las proximidades del punto de inyección del ultrasonido. Después de que las ondas elásticas se inyectan a la muestra, viajan a través del material y disipan su energía, sobre todo en los defectos, así que el calor se libera localmente. Las ondas



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

térmicas viajan entonces por conducción a la superficie, donde pueden ser detectadas con una cámara infrarroja.

Cuando se comparan las técnicas ópticas y externas, la onda térmica viaja la mitad de distancia en un experimento de vibrotermografía, ya que la propagación del calor se realiza desde el defecto hasta la superficie, mientras que en las técnicas ópticas el calor viaja desde la superficie hasta el defecto y de regreso a la superficie. Por lo consiguiente, la vibrotermografía es muy rápida, incluso más rápida que la termografía pulsada. Un experimento típico dura desde una fracción de segundo hasta varios segundos. Sin embargo, hay una gran cantidad de aspectos experimentales que tienen que ser abordados en cada experimento (Shepard, Ahmed, & Lhota, 2004).

Estimulación por inducción

Termografía por termo-inducción

La termografía por termo-inducción crea corrientes de *Eddy* dentro del material inspeccionado haciendo circular una corriente a ciertas frecuencias a lo largo de una bobina de inducción. La densidad de corriente donde los defectos están localizados es diferente, por lo que produce calor en la superficie. De este modo, se pueden detectar fisuras perpendiculares, así como grietas inclinadas. El calentamiento transitorio típico es de aproximadamente unos 10 grados por encima de la temperatura ambiente (Netzelmann & Walle, 2008). La Figura 2-20 muestra una configuración básica de termografía por termo-inducción.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

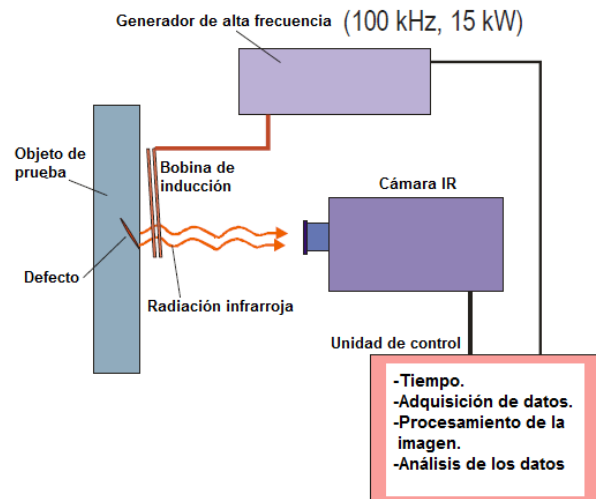


Figura 2-20. Configuración de un experimento de termografía por termo-inducción.

2.6.4.3 Inspección cualitativa versus cuantitativa

En muchas aplicaciones, los usuarios están interesados en detectar cualitativamente la presencia de anomalías con el propósito de definir si la muestra inspeccionada está defectuosa o no. Contrariamente, existen algunas aplicaciones para las cuales es importante ir un paso más allá para cuantificar o caracterizar los defectos detectados y poder determinar su tamaño, profundidad y propiedades térmicas (Ibarra-Castanedo, Tarpani, & Maldague, 2013). En resumen, la termografía cualitativa se encarga de detectar los defectos, por otra parte, la termografía cuantitativa caracteriza los defectos.

- Los **defectos de tamaño** determinan la longitud y la forma de las anomalías detectadas.
- La **recuperación en profundidad** calcula la profundidad a las que las anomalías están localizadas.
- Las **propiedades térmicas** estiman propiedades como difusividad y resistencia térmica de las anomalías.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

En cualquier caso, cualitativa o cuantitativa, regularmente es necesario aplicar algún tipo de procesamiento con la intención de mejorar el porcentaje de señal a ruido (SNR; *Signal-to-Noise Ratio*) para incrementar el contraste del defecto y caracterizarlo.

2.7 Fundición de metales

La fundición es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término fundición también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso (Groover, 2007). La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas, ver Figura 2-21. El término lingote por lo general se asocia con las industrias primarias de metales; describe un grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como maquinados, rolado o forjado.



Figura 2-21. Lingotes de aluminio formados por un proceso de fundición.

Una fundición de forma involucra la producción de formas más complejas que están mucho más cerca de la forma final que se desea que tenga la pieza o producto, ver Figura 2-22.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO



Figura 2-22. Válvula de aluminio manufacturada por procesos de fundición de forma.

2.7.1 Ventajas y desventajas de los procesos de fundición

2.7.1.1 Ventajas

Existe un gran número de métodos de fundición de formas, lo que la hace uno de los procesos de manufactura más versátiles. Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de forma neta. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de forma casi neta, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.7.1.2 Desventajas

Asociadas con la fundición también hay algunas desventajas, distintas para métodos diferentes. Entre estas se incluyen limitaciones de las propiedades mecánicas; porosidad, exactitud dimensional y acabado de la superficie defectuosa para ciertos procesos de fundición; peligros para la seguridad de los seres humanos cuando procesan metales fundidos y problemas ambientales.

2.7.2 Procesos de fundición

2.7.2.1 Molde de fundición

El estudio de la fundición comienza en forma lógica con el molde. El molde contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida, como el mostrado en la Figura 2-23. El tamaño y forma reales de la cavidad deben sobredimensionarse un poco para permitir la contracción de metal que ocurre durante la solidificación y enfriamiento. Los moldes están hechos de varios materiales, que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Es frecuente que los procesos de fundición se clasifiquen de acuerdo con estos tipos de moldes (Groover, 2007).

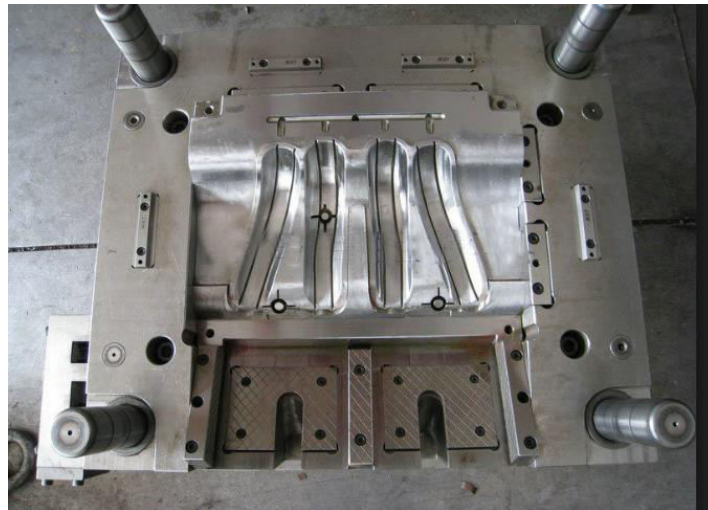


Figura 2-23. Molde para fundición de aluminio a alta presión.

Para llevar a cabo el proceso de fundición, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Después se vierte hacia la cavidad del molde. En un molde abierto, Figura 2-24, el metal líquido simplemente se vierte hasta que llena la cavidad abierta.

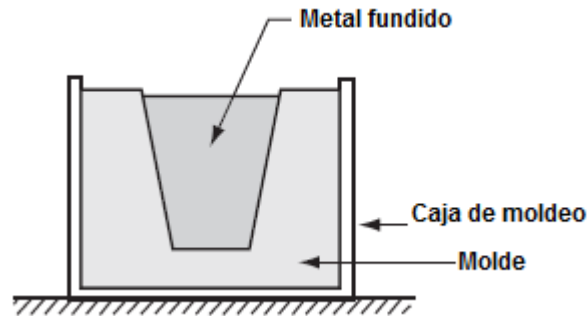


Figura 2-24. Fundición con molde abierto.

En un molde cerrado, Figura 2-25, se adapta un pasaje denominado sistema de paso, que permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es la categoría más importante de las operaciones productivas de fundición.

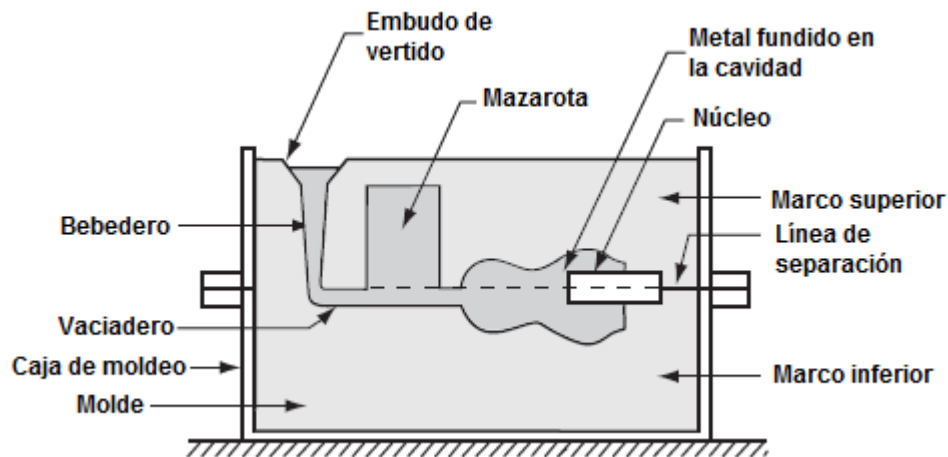


Figura 2-25. Fundición con molde cerrado.

Tan pronto como el metal fundido llega al molde, comienza a enfriarse. Cuando la temperatura baja lo suficiente, empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal. Se requiere de tiempo para completar el cambio de fase, y en el proceso se pierde una cantidad considerable de calor. Es durante esta etapa del



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

proceso que el metal adopta la forma sólida de la cavidad del molde, y también cuando se establecen muchas de las propiedades y características del fundido.

Una vez que el fundido se ha enfriado lo suficiente, se retira del molde. En función del método de fundido y el metal empleado, podría requerirse un proceso adicional. Esto incluye cortar el exceso de metal de la pieza fundida real, limpiar la superficie, inspeccionar el producto y dar tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, quizá se requiera maquinarse como la pieza mostrada en la Figura 2-26, con el objeto de dar tolerancias más estrechas para ciertas características de las piezas, y eliminar la superficie del fundido (Groover, 2007).



Figura 2-26. Pieza de aluminio maquinada después de ser fundida.

2.7.2.2 Clasificación por tipo de molde

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con molde permanente. **Molde desechable** significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirar el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables, se vierte metal derretido en un molde de arena. Una vez que el metal se endurece, debe destruirse el molde a fin de recuperar el fundido (Groover, 2007).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Un **molde permanente** es el que se utiliza una vez y otra para producir muchos fundidos. Está hecho de metal (o de un material refractario cerámico) que soporte las temperaturas elevadas de la operación de fundido. En la fundición con molde permanente, éste consiste en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada.

2.7.2.3 Calentamiento y vertido

Para llevar a cabo una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura algo más elevada que su punto de fusión y luego verterse en la cavidad del molde para que se solidifique. Para calentar el metal a una temperatura de fusión suficiente para la fundición se utilizan hornos de varias clases.

Después de calentamiento, el metal está listo para verterlo. La introducción del metal derretido en el molde, que incluye el flujo a través del sistema de paso y hacia la cavidad, es una etapa crítica en el proceso de fundición. Para que esta etapa tenga éxito, el metal debe fluir a través de todas regiones del molde antes de solidificarse. Los factores que afectan la operación de vertido incluyen los siguientes: temperatura a la que se vierte, velocidad de vertido y turbulencia (Groover, 2007).

La **temperatura de vertido** es aquella que tiene el metal derretido cuando se introduce al molde. Lo que importa aquí es la diferencia entre la temperatura de a la que se vierte y la que tiene al comenzar la solidificación. Esta diferencia de temperatura se conoce, en ocasiones, como la de **sobrecalentamiento**. Este término también se emplea para la cantidad de calor que debe retirarse del metal derretido entre el vertido y el inicio de la solidificación (Heine, Loper, & Rosenthal, 1967).

La **velocidad de vertido** se refiere a la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde. Si la tasa es demasiado baja, el metal se enfriará y se solidificará antes de llenar la cavidad. Si la tasa de vertido es excesiva, la turbulencia se vuelve un problema serio.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

La **turbulencia** en el flujo de un fluido se caracteriza por variaciones erráticas en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido. El flujo se agita y es irregular en vez de ser suave y seguir líneas de corriente. Debe evitarse el flujo turbulento durante el vertido, por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados durante la solidificación, lo que degrada la calidad del fundido. La turbulencia también agrava la erosión del molde, que es la pérdida gradual de superficies del molde debido al impacto del flujo de metal derretido.

2.7.2.4 Procesos básicos con moldes permanentes

La fundición con moldes permanentes usa un molde de metal construido con dos secciones diseñadas para tener facilidad de apertura y cierre. Es común que estos moldes estén hechos de acero o hierro fundido. La cavidad, con el sistema de paso incluido, se maquina en las dos mitades para proporcionar dimensiones exactas y buen acabado de la superficie. Los metales que es común fundir en moldes permanentes son aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre y hierro colado.

Variaciones de la fundición con moldes permanentes

Varios procesos de fundición son muy parecidos al método básico con molde permanente. Estos incluyen la fundición con molde permanente en hueco, a baja presión, al vacío y a alta presión (Groover, 2007).

La **fundición en hueco** es un proceso con molde permanente en el que un fundido hueco se forma por medio de la inversión del molde después de la solidificación parcial de la superficie a fin de drenar el metal líquido del centro. La solidificación comienza en las paredes del molde porque están relativamente frías, y con el paso del tiempo avanza hacia la mitad del fundido. La fundición en hueco se utiliza para hacer estatuas, pedestales de lámparas, y juguetes. En estos artículos es importante la apariencia exterior, pero la resistencia y la forma interior del fundido son consideraciones menores.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

En la **fundición a baja presión** el metal líquido se fuerza a pasar a la cavidad sujeto a baja presión, aproximadamente 0.1MPa, desde abajo, de modo que el flujo es hacia arriba, como se ilustra en la Figura 2-27. La ventaja de este enfoque sobre el vertido tradicional es que al molde se introduce metal derretido limpio desde el centro del recipiente, en vez de metal que ya se ha expuesto al aire. De ese modo se minimizan los defectos de porosidad y oxidación, y mejoran las propiedades mecánicas.

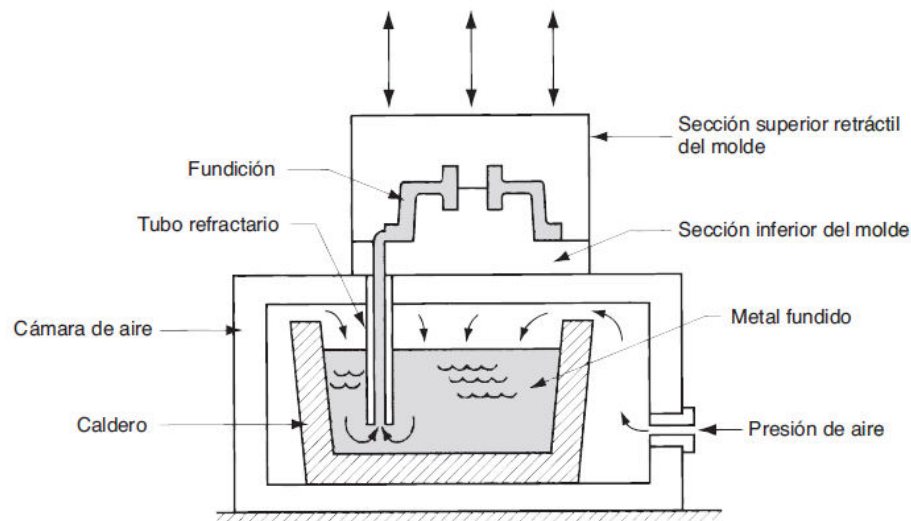


Figura 2-27. Fundición a baja presión.

La **fundición al vacío con molde permanente** es una variación de aquella a baja presión, en la cual se emplea un vacío para impulsar el metal derretido hacia la cavidad del molde. La diferencia con la fundición a baja presión está en que se utiliza la presión reducida del aire desde el vacío del molde para llevar metal líquido hacia la cavidad, en lugar de forzarlo con presión positiva de aire desde abajo, ver Figura 2-28. Los beneficios en esta técnica son que se reduce la posibilidad de porosidad por aire y los defectos relacionados con ésta, y se da mayor resistencia al producto fundido.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

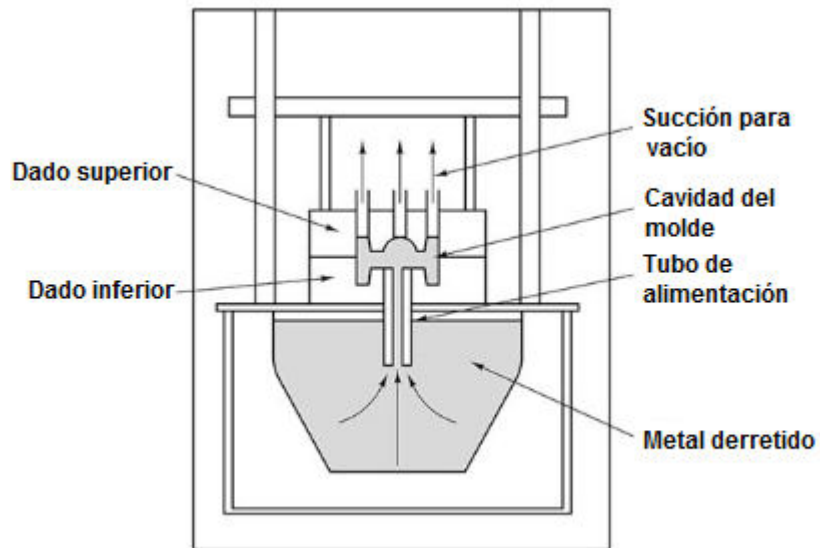


Figura 2-28. Fundición al vacío con molde permanente.

La **fundición con troquel** es un proceso de fundición con molde permanente en el que se inyecta a presión elevada metal fundido a la cavidad del molde. Las presiones comunes son de 7 a 350 MPa. La presión se mantiene durante la solidificación, después de la cual se abre el molde y se retira la pieza. Los moldes para esta operación de fundido reciben el nombre de troqueles, de donde deriva su nombre el proceso. La característica más notable que diferencia a este proceso de las demás de la categoría de moldes permanentes, es el uso de presión elevada para forzar el paso del metal a la cavidad del troquel.

Las operaciones de fundición con troquel se llevan a cabo en máquinas especiales. Éstas se diseñan para que las dos mitades del molde embonen y cierren con exactitud, y las mantengan cerradas mientras se fuerza el metal líquido a pasar a la cavidad. Hay dos tipos principales de máquinas para fundición con troquel: 1) cámara caliente y 2) cámara fría, que se diferencian en la manera en que el metal derretido se inyecta a la cavidad (Groover, 2007). En las máquinas de **cámara caliente** el metal se derrite en un contenedor adosado a la máquina, y se emplea un pistón para inyectar metal líquido a alta presión hacia el troquel. En la Figura 2-29 se describe el ciclo de fundición con cámara caliente donde 1) con troquel cerrado y pistón fuera, el metal derretido fluye a



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

la cámara; 2) el pistón fuerza al metal a fluir hacia la cámara para que pase al troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el pistón, se abre el troquel y se expulsa 4) la pieza solidificada.

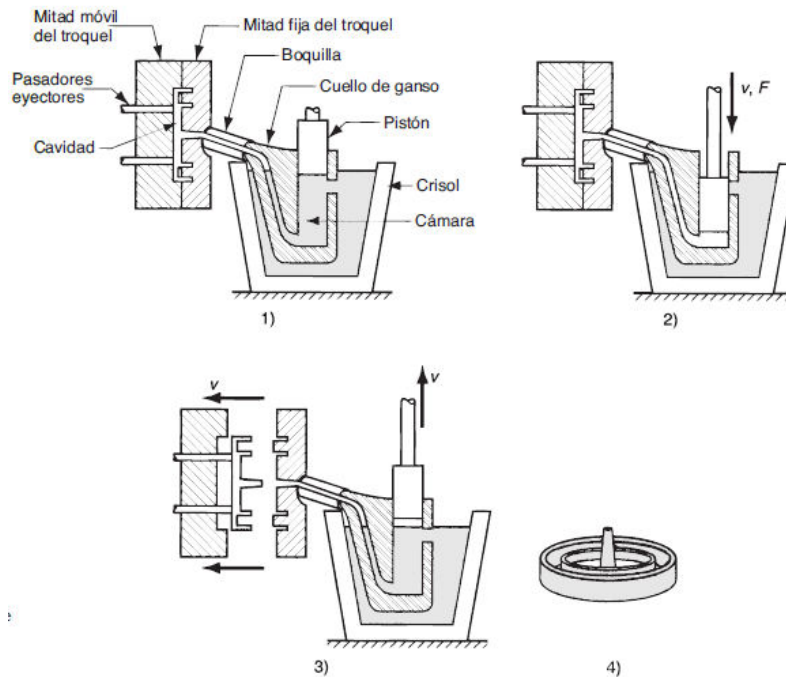


Figura 2-29. Ciclo de fundición con cámara caliente.

En las máquinas de fundición con troquel de **cámara fría** se vierte el metal derretido hacia una cámara que no está caliente, desde un contenedor externo, y se emplea un pistón para inyectarlo a alta presión hacia la cavidad del troquel. La Figura 2-30 describe el ciclo de fundición con cámara fría donde 1) con troquel cerrado y martinete retirado, el metal fundido se vierte a la cámara; 2) el martinete fuerza al metal a fluir en el troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el martinete, el troquel se abre y la pieza es expulsada.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

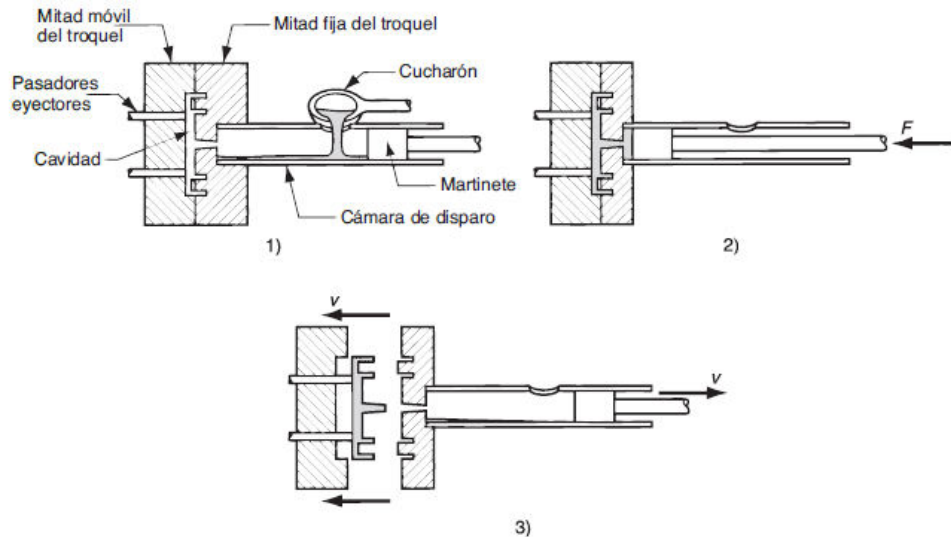


Figura 2-30. Ciclo de fundición con cámara fría.

La **fundición a alta presión** (HPDC: *High Pressure Die Casting*), es un proceso de manufactura para producir partes de metal con un dimensionado de precisión, bien definidas con superficies lisas o texturizadas. Se logra inyectando metal líquido a alta velocidad y bajo alta presión en matrices o dados de acero permanentes. Comparada con otros procesos de fundición, HPDC está en el extremo superior tanto de la velocidad como de la presión. La alta presión se traduce en una condición de flujo muy turbulento. El proceso se describe regularmente como la distancia más corta entre la materia prima y el producto terminado. El proceso de fundición a alta presión comienza con un molde de acero, que usualmente se conoce como dado, y contiene las cavidades que forman los fundidos, está formado por dos mitades que permiten la remoción de las piezas fundidas. El molde se monta en un horno de fundición con las mitades acomodadas individualmente, de manera que, uno es estacionario (dado cubierta) y el otro es removible (dado expulsor) (Andresen, 2005).

El ciclo de fundición comienza cuando las dos mitades del molde se sujetan firmemente unidos por el mecanismo de cierre de la máquina. El metal derretido se inyecta en el molde en un periodo de tiempo extremadamente corto a alta presión, donde se solidifica rápidamente. Las mitades del molde se separan cuando la máquina se abre para después expulsar las partes fundidas. La Figura 2-31 muestra una máquina de alta presión convencional.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

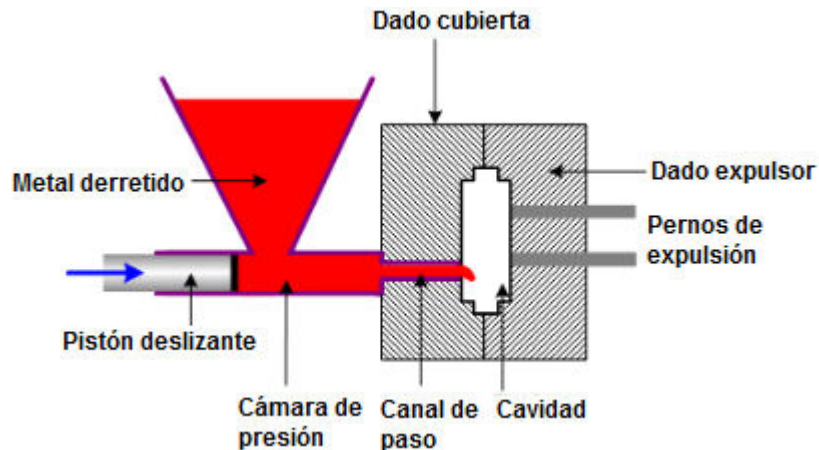


Figura 2-31. Proceso de fundición a alta presión.

2.7.3 Hornos de fundición

Los tipos de hornos más comunes que se emplean en las fundidoras son: cubilotes, hornos de combustible directo, crisoles, hornos de arco eléctrico y hornos de inducción. La selección del tipo más apropiado de horno depende de factores tales como: aleación por fundir; sus temperaturas de fusión y vertido; requerimientos de capacidad del horno; costos de la inversión, la operación y el mantenimiento; y las consideraciones sobre contaminación ambiental (Groover, 2007).

2.7.3.1 Cubilotes

Un cubilote es un horno cilíndrico vertical equipado con un canal de paso cerca de su base. Los cubilotes solo se usan para hierros colados, y aunque también se emplean otros hornos, el mayor peso en toneladas de hierro colado se obtiene en cubilotes. En la Figura 2-32 se ilustra la construcción general y características de operación.

Consiste en un cascaron grande de placa de acero recubierta con material refractario. La carga consiste en hierro, coque, fundente y algunos elementos de aleación, y se introduce a través de una puerta que se localiza a menos de la mitad de la altura del cubilote. Por lo general, el hierro es una mezcla del tipo de primera fundición y chatarra (procedente de fundidos anteriores). El coque es el combustible que se usa para calentar el horno. Se introduce aire forzado a través de las aberturas cerca de la base



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

del cascaron para la combustión del coque. El fundente es un compuesto básico como la caliza, que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas para formar la escoria. Esta sirve para cubrir el fundido e impide que reaccione con el ambiente dentro del cubilote, y también reduce la pérdida de calor. Conforme la mezcla se calienta y ocurre la fundición del hierro, se desaloja periódicamente el horno para verter metal líquido (Groover, 2007).

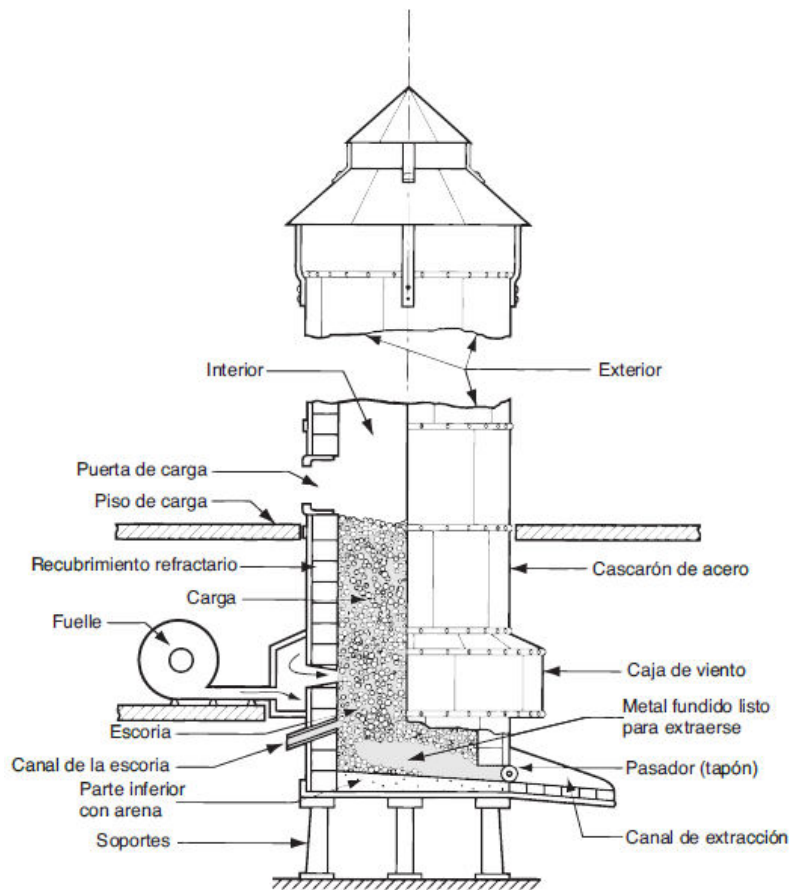


Figura 2-32. Cubilote para fundir hierro colado.

2.7.3.2 Hornos de combustible directo

Un horno de combustible directo contiene un hogar abierto pequeño en el que se calienta la carga de metal por medio de quemadores de combustible ubicados en uno de sus lados. El techo del horno ayuda a la acción de calentar por medio de reflejar la flama hacia abajo contra la carga. El combustible común es gas natural, y los productos



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

de la combustión salen del horno a través de un cañón. En la parte inferior del hogar hay un agujero de salida para extraer el metal fundido. Los hornos de combustible directo por lo general se emplean en el fundido de metales no ferrosos tales como aleaciones a base de cobre y aluminio (Groover, 2007).

2.7.3.3 Crisoles

Estos hornos funden el metal sin que tengan contacto directo con una mezcla combustible. Por esta razón, en ocasiones se les llama **hornos de combustible indirecto**. En las fundidoras se utilizan tres tipos de crisoles: móvil, estacionario y de volteo, los cuales se ilustran en Figura 2-33. Todos emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (por ejemplo, una mezcla de arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura, para contener la carga. En el **crisol móvil**, este se coloca en un horno y se calienta lo suficiente para derretir la carga de metal. Los combustibles comunes para estos hornos son petróleo, gas o carbón en polvo. Cuando el metal se derrite, el crisol se eleva fuera del horno y se usa como cuenco de vertido. Los otros dos tipos que en ocasiones reciben el nombre de **hornos de vasija**, tienen el horno para calentar y el contenedor como unidad integrada. En el horno de **crisol estacionario**, el horno es estacionario y el metal fundido se extrae del contenedor con un cucharón. En el **horno de crisol de volteo**, todo el conjunto se inclina para hacer el vertido. Los crisoles se emplean para metales no ferrosos tales como bronce, latón y aleaciones de zinc y aluminio (Groover, 2007).

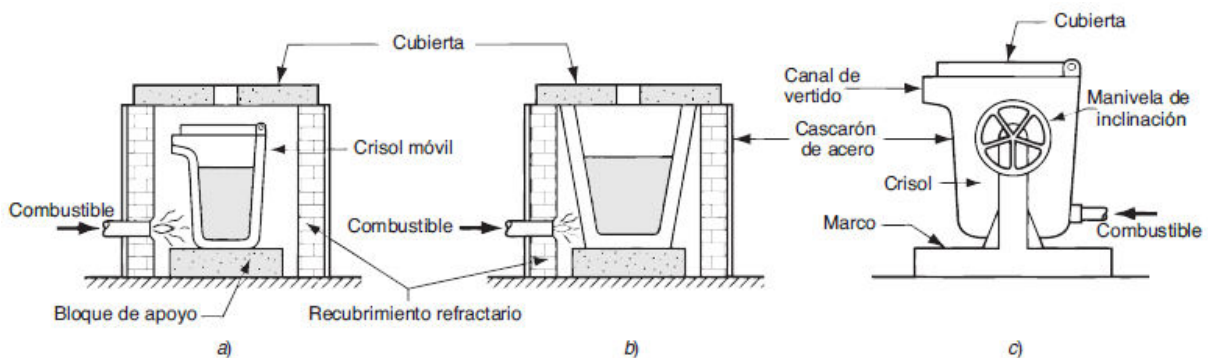


Figura 2-33. a) Crisol móvil, b) Crisol estacionario y c) Crisol de volteo.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.7.3.4 Hornos de arco eléctrico

En este tipo de horno, la carga se funde debido al calor generado por un arco eléctrico. Existen varias configuraciones, con dos o tres electrodos (véase la Figura 2-34). El consumo de energía es alto, pero los hornos eléctricos se diseñan para que tengan capacidad alta de fundición (25 a 50 ton/h), y se usan sobre todo para fundir acero.

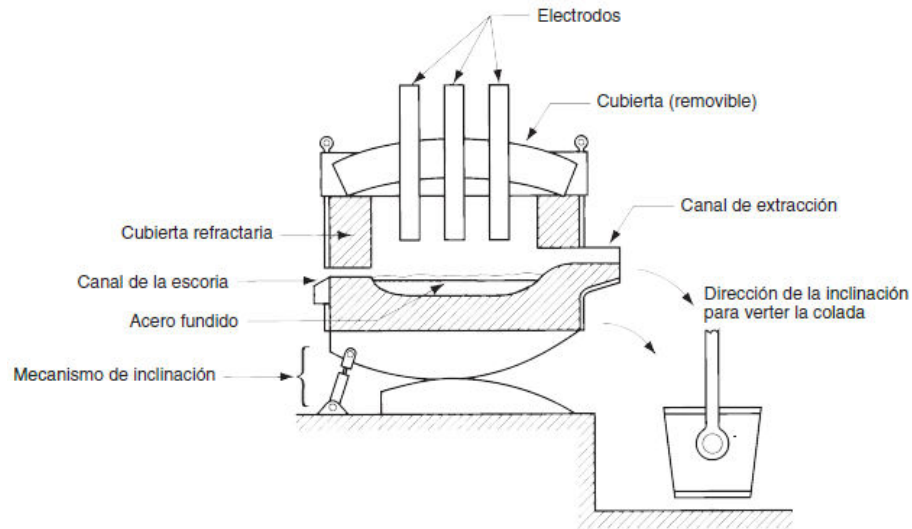


Figura 2-34. Horno de arco eléctrico.

2.7.3.5 Hornos de inducción

Un horno de inducción emplea corriente alterna que pasa a través de una bobina para desarrollar un campo magnético en el metal, y la corriente inducida que resulta ocasiona el calentamiento rápido y la fundición del metal. En la figura () se ilustran las características de un horno de inducción para las operaciones de fundición. El campo de fuerza electromagnética hace que ocurra una acción mezcladora en el metal líquido. Asimismo, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente en que toma lugar se puede controlar de cerca. Todo esto da como resultado metales fundidos de calidad y purezas altas, y los hornos de inducción se emplean para casi cualquier aleación cuando esos requerimientos son importantes. En el trabajo de fundición son comunes las aplicaciones de fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio (Groover, 2007).



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

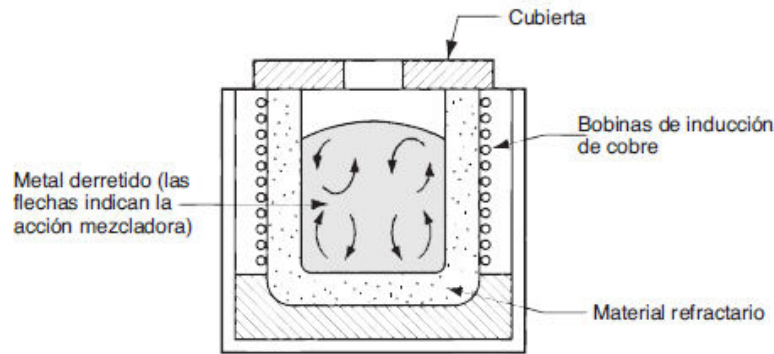


Figura 2-35. Horno de inducción.

2.7.4 Defectos de fundición

Hay muchas formas de que las cosas salgan mal en una operación de fundición, lo que da como resultado defectos de calidad del producto. Algunos defectos son comunes a todos los procesos de fundición. En los siguientes incisos se describen cada uno de ellos (Groover, 2007).

- a) **Vacíos:** son fundidos que se solidifican antes de llenar por completo la cavidad del molde, véase la Figura 2-36. Las causas comunes incluyen: insuficiente fluidez del metal derretido, temperatura de vertido muy baja, vertido muy despacio y sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

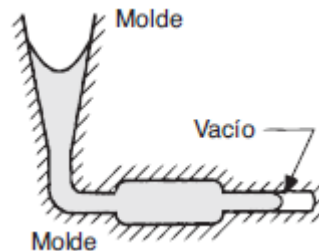


Figura 2-36. Defecto de vacío.

- b) **Cierres fríos:** ocurren cuando dos porciones de metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura, véase la Figura 2-37. Sus causas son similares a las de los vacíos.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

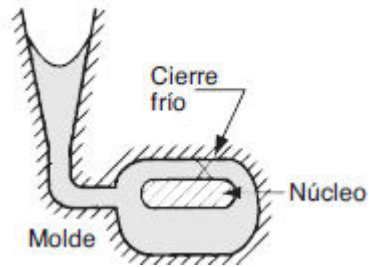


Figura 2-37. Defecto de cierres fríos.

- c) **Gránulos fríos:** resultan de las salpicaduras durante el vertido, lo que ocasiona la formación de glóbulos sólidos de metal que quedan atrapados en el fundido. Este defecto puede evitarse con procedimientos de vertido y diseños del sistema de paso que eviten salpicaduras.

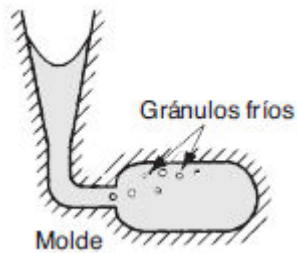


Figura 2-38. Defecto de gránulos fríos.

- d) **Cavidad por contracción:** es una depresión en la superficie o un vacío interno en el fundido, ocasionado por fugas en la solidificación que restringen la cantidad de metal derretido disponible en la última región que se solidifica, véase la Figura 2-39. Es frecuente que ocurra cerca de la parte superior del fundido, en cuyo caso se conoce como “rechupe”. Con frecuencia el problema se resuelve con el diseño adecuado de la mazarota.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

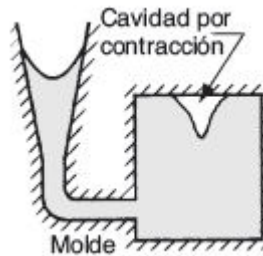


Figura 2-39. Defecto de cavidad por contracción.

- e) **Microporosidad:** consiste en una red de vacíos pequeños distribuidos en el fundido, ocasionados por la falta de solidificación localizada del metal derretido final en la estructura dendrítica, véase la Figura 2-40. Este defecto se asocia por lo general con aleaciones, debido a la manera fraccionada en que ocurre la solidificación en esos metales.

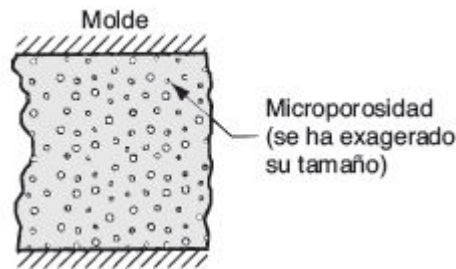


Figura 2-40. Defecto de microporosidad.

- f) **Desgarre caliente:** también llamado **agrietamiento caliente**, ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación, o en las primeras del enfriamiento después de solidificarse. El defecto se manifiesta como la separación del metal (de ahí los términos desgarre y agrietamiento) en un punto de esfuerzo grande a la tensión ocasionado por la incapacidad del metal de contraerse en forma natural, véase la Figura 2-41. En la fundición con arena y otros procesos con moldes desechables, se evita haciendo que el molde sea colapsable. En los procesos con molde permanente, el desgarre caliente disminuye si se retira la pieza del molde inmediatamente después de la solidificación.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

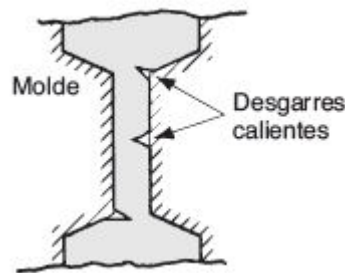


Figura 2-41. Defecto de desgarre caliente.

2.7.5 Métodos de inspección en procesos de fundición

Los procedimientos de inspección en una fundidora incluyen los siguientes:

- 1) Inspección visual para detectar defectos obvios tales como vacíos, cierres fríos y defectos superficiales severos.
- 2) Mediciones dimensionales para garantizar que se cumple con las tolerancias.
- 3) Pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y de otro tipo, relacionadas con la calidad inherente del metal que se funde (Heine, Loper, & Rosenthal, 1967).
 - Pruebas de presión para localizar fugas en el fundido.
 - Métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de penetradores fluorescentes y pruebas supersónicas, para detectar defectos superficiales o internos en el fundido.
 - Pruebas mecánicas para determinar propiedades tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si los defectos que se descubren no son demasiado serios, con frecuencia es posible salvar el fundido por medio de soldadura, esmerilado u otros métodos de rescate con los que el cliente está de acuerdo.

2.8 Estado del arte

En la sección del estado del arte se enlistan y describen los artículos científicos más recientes en el área de la termografía infrarroja aplicada a la evaluación no destructiva. Con un enfoque en la detección de fallas tales como fisuras, porosidades y



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

delaminaciones en procesos de fundición de metales, soldadura, etc., principalmente en aleaciones de aluminio. En la Tabla 2.2 se enlistan aquellos artículos que más influenciaron al desarrollo del marco teórico y el método.

Tabla 2.2. Investigaciones con aporte a la presente tesis.

Año	Artículo	Fuente	Autores
2012	<i>Application of vibrothermography in nondestructive testing of structures</i>	<i>6th European Workshop on Structural Health Monitoring</i>	Szwedo, M., Pieczonka, L., & Uhl, T.
2012	<i>Comparison of nondestructive testing methods on detection of delaminations composites</i>	<i>Journal of sensors Volume (2012), 7 pages</i>	Cheng L. & Tian G. Y.
2013	<i>Nondestructive testing with thermography</i>	<i>European Journal of Physics 34(6), 91-109</i>	Ibarra-Castanedo C., Tarpani J. & Maldague X.
2014	<i>Infrared thermography for temperature measurement and nondestructive testing</i>	<i>Journal of sensors 14(7), 12305-12348</i>	Usamantiega R. et. al
2015	<i>Porosity characterization of aluminum castings by using particular non-destructive techniques.</i>	<i>Journal of Nondestructive Evaluation 34(3), 26</i>	Wilczek A., Dlugosz P., Hebda M.
2015	<i>Highly efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance.</i>	<i>Quantitative InfraRed Thermography Journal, 12(1), 98-111</i>	Solodov, I., Rahammer, M., Derusova, D., & Busse, G.

2.8.1 Aportes del estado del arte a la presente tesis

Vibrotermografía

En (Szwedo, Pieczonka, & Uhl, 2012) se comenta que la vibrotermografía puede ser utilizada para evaluar las condiciones saludables en estructuras, es decir, si existen fisuras o fracturas en estructuras metálicas. Se utilizan muestras de piezas soldadas y



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

láminas de fuselaje de aviones militares con defectos conocidos. Describen dos tipos de configuraciones experimentales diferentes; la primera con un sistema estacionario donde el equipo generador de ultrasonido es fijo y la segunda con un dispositivo generador de ultrasonido móvil para mediciones en campo. Esta investigación tiene un aporte de gran valor para la presente tesis que se está llevando a cabo debido a que brinda métodos experimentales detallados y fáciles de implementar, que se adecuan al tipo de piezas de aluminio bajo análisis. Adicionalmente, se hace mención de algunas técnicas de procesamiento de imágenes térmicas, que pueden funcionar para trazar el método.

Por otra parte, (Solodov, Rahammer, Derusova, & Busse, 2015) utilizan la vibrotermografía debido a que los defectos generan una alta resonancia cuando son estimulados con ondas elásticas de sonido, lo que resulta en un aumento de temperatura en la zona afectada. Este efecto proporciona información más eficiente sobre la falla en términos de detección dado que únicamente se calienta la zona de interés a diferencia de otros métodos de termografía donde se calienta la superficie de la muestra.

Equipo experimental

El equipo que se utiliza para experimentar es una parte que se detalla poco en el estado de arte. Sin embargo, (Cheng & Tiang, 2012) hacen una comparación entre varias técnicas de evaluación no destructiva aplicadas a la detección de delaminaciones en polímeros compuestos, donde la termografía es incluida en las variantes de corrientes inducidas y termografía pulsada. Se da una explicación detallada del equipo utilizado, dando orientación para saber qué tipo de cámara y lámparas fotográficas se utilizan. Aunado también a que se explican las bondades entre éstos métodos termográficos tales como brindar una buena visualización de los defectos, permitiendo conocer la forma y las dimensiones del defecto, así como un tiempo de detección en la escala de los segundos.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Evaluación no destructiva mediante termografía infrarroja

Para la construcción del marco teórico se necesitó conocer los conceptos generales tanto de evaluación no destructiva, como de termografía infrarroja. (Ibarra-Castanedo, Tarpani, & Maldague, 2013) Describe a detalle conceptos básicos de termografía infrarroja, desde su concepto inicial, hasta las etapas que conlleva utilizarla como medio de análisis. Se extrajeron conceptos como los de vibrotermografía, termografía pulsada, termografía *lock-in* y las etapas del procesamiento de imágenes térmicas. Su trabajo, ha servido como base principal para la construcción de esta tesis.

También, (Usamantiega, y otros, 2014) proporciona una gran cantidad de información concerniente a la teoría básica de termografía infrarroja como método de análisis donde la temperatura juega un papel importante. Su principal aporte es el de dar un panorama sobre la termografía infrarroja enfocada a dos principales aplicaciones; la medición de temperatura y la evaluación no destructiva. Describe procedimientos generales para los dos enfoques antes mencionados y lo más relevante es como clasifica el uso de la termografía dependiendo la aplicación.

Caracterización de fallas en piezas de aluminio

El análisis de piezas de aluminio fundidas será una parte importante en la experimentación, por tal motivo, (Wilczek, Dlugosz, & Hebda, 2015) aporta un análisis comparativo de varias técnicas de evaluación no destructiva: radiografía, ultrasonido, termografía inducida y termografía pulsada. Se utilizan piezas de aluminio que fueron fabricadas mediante un proceso de fundición y se realizan experimentaciones para detectar porosidad en zonas conocidas de la pieza. Las técnicas de termografía dan como resultado que no son útiles para detectar porosidad muy fina, sin embargo, estas deficiencias proceden principalmente de la configuración utilizada.



CAPÍTULO III MÉTODO

3 Método

El desarrollo del método de trabajo consta de cinco etapas que se ilustran en la Figura 3-1: Etapa 1. Recolección de información, Etapa 2. Desarrollo de la experimentación, Etapa 3. Procesamiento de imágenes, Etapa 4. Análisis de los datos obtenidos y Etapa 5. Validación del método.



CAPÍTULO III MÉTODO

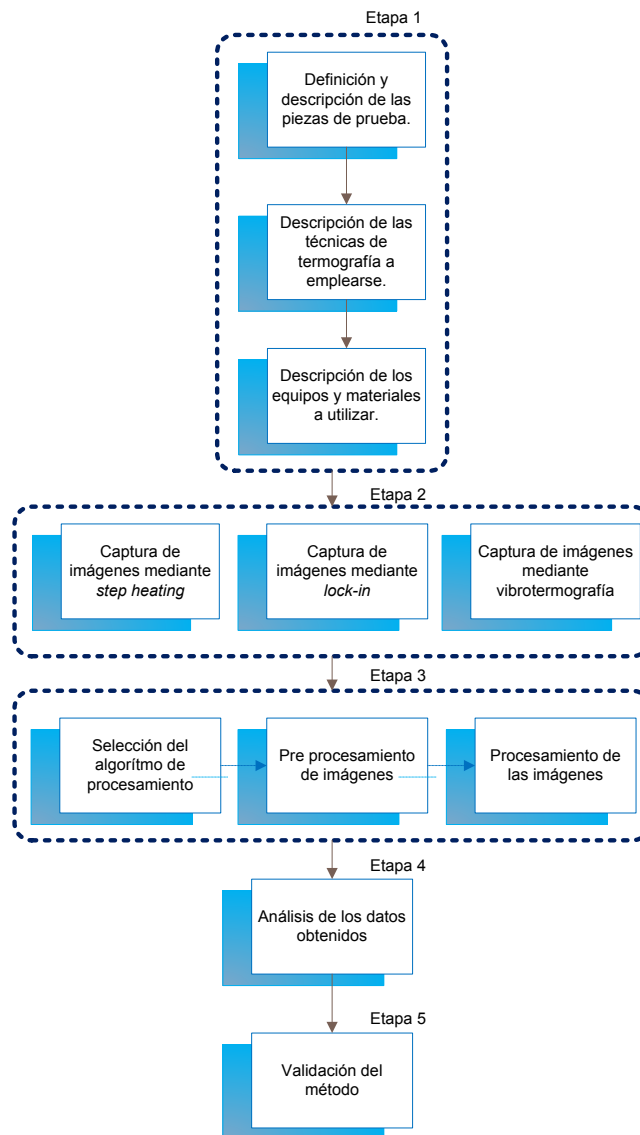


Figura 3-1. Diagrama de flujo del método.

3.1 Etapa 1: Recolección de información

El objetivo de esta etapa fue definir cada uno de los aspectos que tienen que ser preparados previamente a la experimentación. Detalles sobre las muestras sujetas a prueba, equipo a utilizar y sus características. Se mencionan aspectos sobre la cámara térmica, los estimuladores térmicos, software de procesamiento de imágenes, etc.



CAPÍTULO III MÉTODO

Esta etapa tiene tres actividades principales, las cuales son; definición y descripción de las piezas de prueba, descripción de las técnicas de termografía a emplearse y descripción de los equipos y materiales a utilizar.

3.1.1 Definición y descripción de las piezas de prueba

Debido a que la tesis surgió como una necesidad industrial específica, la aplicación se realizó en un componente que forma parte de una transmisión automotriz del tipo CVT. A este componente se le conoce como TC case y continuamente se encontraban fugas de aceite debidas a una fisura en la sección mostrada en la imagen c de la Figura 3-2.

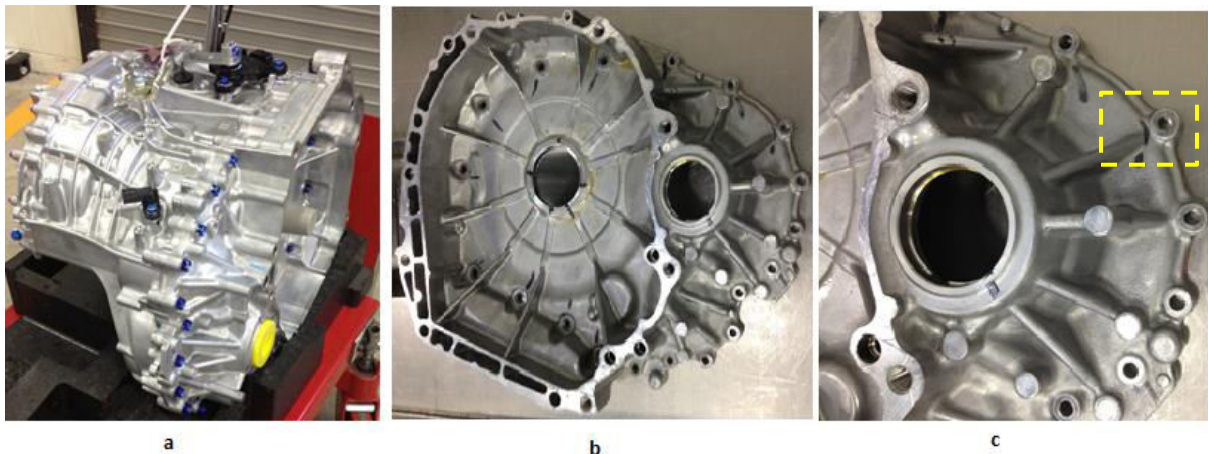


Figura 3-2. a) Transmisión CVT, b) TC case, c) Sección del TC case bajo estudio.

El TC case está fabricado de una aleación de aluminio lo que permite una buena conducción térmica.

3.1.2 Descripción de las técnicas de termografía a emplearse

Las técnicas que se emplearon para desarrollar el método de evaluación no destructiva fueron tres de los métodos de evaluación no destructiva mediante termografía activa; **step heating** que consiste en estimular térmicamente la pieza haciendo uso de una pistola de calor y capturando las imágenes con la cámara térmica en las etapas de calentamiento y enfriamiento. En segundo lugar, el método **Lock-in** el cual hace uso de una lámpara halógena como fuente de estimulación térmica para capturar la imagen en la etapa de enfriamiento. Por último, se utilizó el método de **vibrotermografía** en el



CAPÍTULO III MÉTODO

que se utiliza un actuador para estimular la pieza mediante vibraciones para calentar la fisura y capturar en video el cambio de temperatura en la zona de interés.

3.1.3 Descripción de los equipos y materiales a utilizar

Los materiales y equipos utilizados en el enfoque de termografía activa son muy similares en todas sus variantes. Básicamente se tienen tres componentes principales: el cabezal de adquisición, el sujetador de partes y el equipo de análisis.

3.1.3.1 Cabezal de adquisición

El cabezal de adquisición está compuesto de dos elementos, la cámara infrarroja y el dispositivo de estimulación térmica. El cabezal de adquisición puede ser estático (montado en un trípode) enfrente de la parte inspeccionada o móvil, por ejemplo, montado en un brazo robótico en la línea de producción. Para el caso de los enfoques de *step heating* y *lock-in* se utiliza una cámara térmica *Flir E5*, que es la utilizada por el equipo de mantenimiento de la planta donde se realiza la investigación, por otra parte, para el enfoque de vibrotermografía se utiliza una cámara Flir. Las fuentes de estimulación para los enfoques mencionados son una pistola de calor *Milwaukee 8889-20*, que cuenta con un variador de temperatura y una lámpara halógena a 1000 watts respectivamente.

A diferencia del enfoque pasivo, en las técnicas activas se requiere de un dispositivo de estimulación para generar respuestas térmicas de la parte. Para el caso bajo estudio, las fuentes de estimulación utilizadas para los enfoques mencionados son una pistola de calor *Milwaukee 8889-20*, que cuenta con un variador de temperatura y una lámpara halógena a 1000 Watts respectivamente. En el caso de la vibrotermografía, se utiliza un transductor de vibraciones con el que se aplicarán ondas elásticas que generan el calor en la fisura.



CAPÍTULO III MÉTODO

3.1.3.2 Sujetador de partes

Para sujetar las partes únicamente se utiliza un *jig*, que es una estructura metálica con soportes plásticos que no dañan las partes de prueba. Éste jig se puede ver en la Figura 3-3.



Figura 3-3. *Jig* de sujeción para partes de prueba.

3.2 Etapa 2: Desarrollo de la experimentación

En esta etapa se describen las pruebas térmicas, es decir, las configuraciones de aplicación de termografía infrarroja activa. Para la presente tesis se utilizarán los métodos de *step heating*, *lock-in* y vibrotermografía. También se mencionan los aspectos teóricos y cómo se relacionan con la aplicación en piezas de aluminio.

3.2.1 Técnica *Step heating*

La técnica *step heating* es la más básica de los métodos utilizados para evaluar la pieza a inspeccionar. Se estimula la pieza mediante una pistola de calor, como la que se observa en la Figura 3-4, con el propósito de incrementar la temperatura de la superficie, una vez que se deja de calentar, se captura la imagen en la etapa de enfriamiento. El propósito es detectar los contrastes térmicos que se generan por la



CAPÍTULO III MÉTODO

discontinuidad de la fisura. Sin embargo, se observa que el calor no se distribuye de manera uniforme.



Figura 3-4. Pistola de calor Milwaukee 8889-20 para método *step heating*.

3.2.2 Técnica *lock-in*

En la técnica *lock-in* se utiliza una lámpara halógena, ver Figura 3-5, que calentará la pieza durante un periodo de tiempo suficiente para distribuir calor a través de toda la superficie. Al igual que en la técnica de *step heating*, este método carece de uniformidad dado que el ruido térmico hace difícil la detección de la fisura.



Figura 3-5. Lámpara de halógeno para método *lock-in*.

3.2.3 Técnica de vibrotermografía

En la vibrotermografía se utilizó un transductor de ultrasonido con el propósito de estimular la pieza con ondas elásticas, ver la Figura 3-6. Las vibraciones calientan únicamente la fisura, lo que es una ventaja sobre las otras técnicas, ya que se evitan los problemas de falta de uniformidad térmica, así como ruido térmico que dificultan la detección de la fisura.



CAPÍTULO III MÉTODO

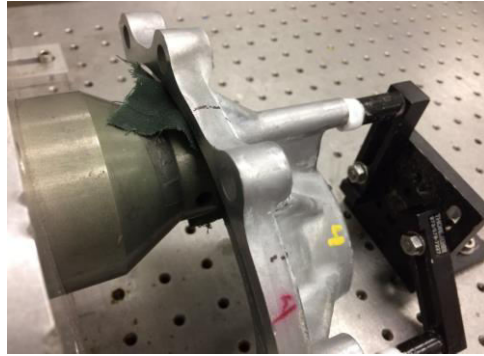


Figura 3-6. Transductor de ultrasonido.

Para este experimento se utilizó una cámara *Flir* de alta gama y se posicionó frente a la pieza, ver la Figura 3-7. Se grabó una secuencia de imágenes, ya que el efecto de las vibraciones ocurre en un periodo corto, difícil de ser capturado, solo con una imagen.

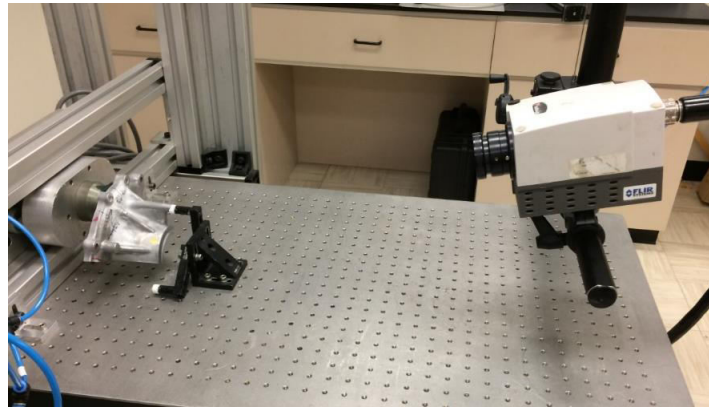


Figura 3-7. Configuración de vibrotermografía.

3.3 Etapa 3: Procesamiento de imágenes

La idea básica es identificar automáticamente la ubicación de defectos en un termograma representando el campo de visión inspeccionado. El objetivo es producir un mapa completo del componente inspeccionado donde se representan la ubicación de defectos como desgaste, fisuras, delaminaciones, etc.



CAPÍTULO III MÉTODO

3.3.1 Algoritmos de detección de defectos

Con respecto a los algoritmos de detección de defectos, existe una gran variedad de algoritmos cuyo propósito es realizar una segmentación de la imagen para separar regiones de interés. Existen varias técnicas, tales como aquellas basadas en detección de bordes, crecimiento alrededor de puntos clave, análisis de histograma y modelado simbólico. Todas estas técnicas utilizan discontinuidad o semejanza de atributos característicos (intensidad de los píxeles, gradientes, etc.). Para las técnicas de *step heating* y *lock-in* es necesario ejecutar este tipo de algoritmos, solo si se requiere obtener la mayor cantidad de información posible del defecto, dado que el nivel de ruido térmico en el termograma es alto. Por el contrario, la vibrotermografía no lo necesita ya que es una técnica en la que la fisura se devela debido a la fricción generada por las ondas elásticas.

3.4 Etapa 4: Análisis de los datos obtenidos

La forma en que se analizan los datos obtenidos en la etapa de procesamiento es mediante los algoritmos que se usan en la etapa de procesamiento. Como se mencionó anteriormente, los algoritmos que se utilicen, nos darán mayor información acerca de la falla en cuestión, el interés de esta tesis se centra en las fisuras. Por otra parte, existe el análisis por contraste térmico, esta técnica es de las más sencillas de utilizar debido a que el análisis se hace mediante la diferencia de temperatura entre una zona sana y una con defecto, en donde se puede observar el incremento y disminución en la temperatura.

3.5 Etapa 5: Validación del método

La validación se llevó a cabo en un problema industrial real. Se utilizaron 4 partes de prueba donde tres de ellas tenían fisuras en zonas conocidas y una pieza sin fisuras. Cada una de estas piezas fue sometida a pruebas de termografía activa y se les dio el mismo tratamiento a todas. Se buscó hacer las pruebas en las mismas condiciones, sin embargo, la prueba por vibrotermografía solo se le hizo a una pieza, principalmente porque esta técnica se llevó a cabo en un laboratorio



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4 Resultados y conclusiones

Los resultados serán descritos por etapas de acuerdo al orden establecido en el método.

4.1 Etapa 1: Recolección de información

Como se mencionó en el método, esta etapa constó de tres actividades principales donde se describían el tipo de piezas de prueba, las técnicas de termografía empleadas y los equipos utilizados. Se usaron 4 piezas de las cuales tres tenían la fisura en una zona conocida y una era una muestra sana. Se logró proponer las técnicas a emplearse; *step heating*, *lock-in* y vibrotermografía. Los equipos fueron dos cámaras; una *flir* de alta gama y una *Flir E5*. Los estimuladores térmicos fueron una pistola de calor *Milwaukee 8889-20* y una lámpara de halógeno a 1000 watts. Por último, un transductor de ultrasonido para la técnica de vibrotermografía.

4.2 Etapa 2: Desarrollo de la experimentación

Para las técnicas de *step heating* y *lock-in* se hicieron pruebas en tres piezas. Una pieza en buen estado y las otras dos con defectos conocidos. Para el caso de la pieza sin defectos se tomó como referencia para confirmar si la técnica de termografía activa puede detectar los defectos. La Figura 4-1 muestra a la pieza en buen estado estimulada bajo la técnica de *step heating*, donde se utilizó una pistola de calor y se estimuló durante 20 segundos. Se pudo observar que el calor se distribuye de forma uniforme en la pieza. De la misma manera, la técnica *lock-in* que se observa en la Figura 4-2 muestra una buena uniformidad en la distribución del calor sobre la superficie de la pieza.



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

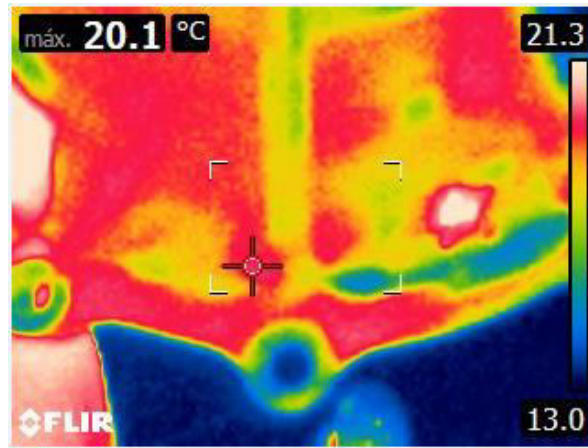


Figura 4-1. *Step heating* para pieza en buen estado.

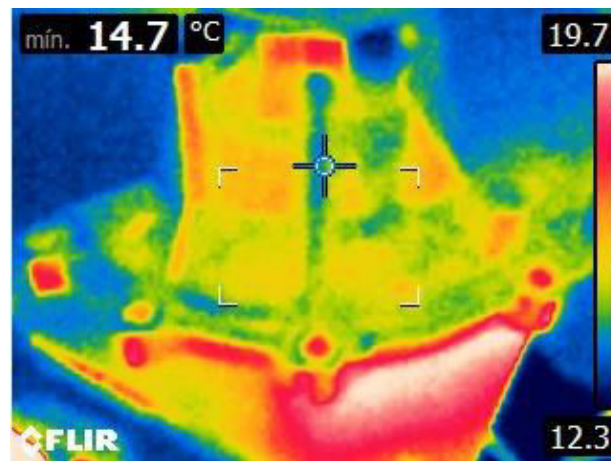


Figura 4-2. *Lock-in* para pieza en buen estado.

Para las piezas en mal estado se puede observar en la Figura 4-3 que la distribución de calor no es uniforme en los puntos fríos indicados por el puntero de la cámara. Es justo en esos puntos donde se encuentra el defecto y las imágenes muestran un azul intenso dado que cuando el calor se distribuía por las piezas, se encontró con una fisura perpendicular a la superficie.



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

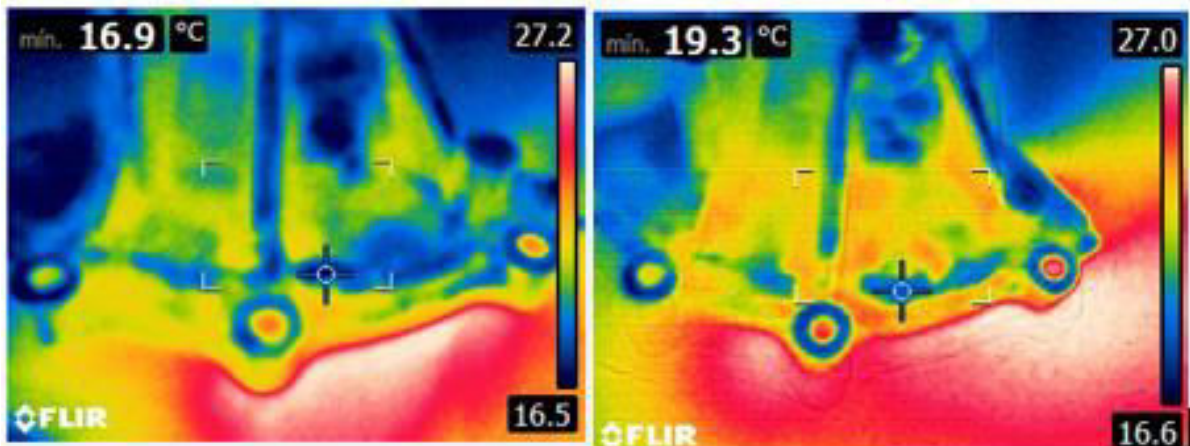


Figura 4-3. *Step heating* para las muestras 1 (izquierda) y 2 (derecha) defectuosas.

En el caso del método *lock-in*, los resultados fueron similares a los obtenidos con la técnica de *step-heating*. La Figura 4-4 ilustra que la detección es del mismo nivel.

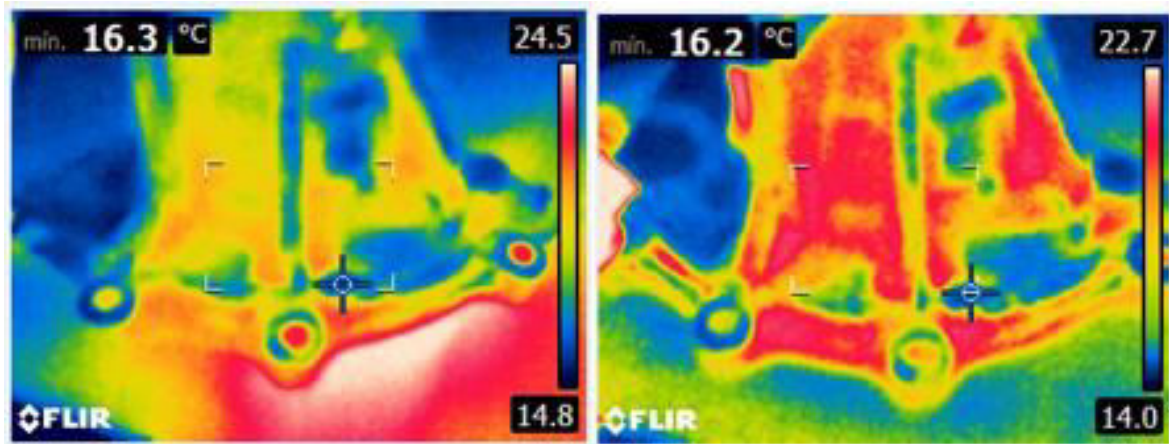


Figura 4-4. *Lock-in* para las muestras 1 (izquierda) y 2 (derecha) defectuosas.

Por otra parte, se realizó también la prueba por vibrotermografía. Se grabó un video para capturar una secuencia de imágenes que permitió detectar el efecto generado por las ondas elásticas que fueron transmitidas por el transductor de ultrasonido. Este efecto se traduce en como un cambio en la temperatura de la pieza en zonas con fisuras. En la técnica de vibrotermografía se obtuvo un termograma (imagen térmica) donde se observa a simple vista la zona de interés. El resultado es positivo ya que se logró la detección de la fisura, como se muestra en la Figura 4-5 (crack). Los otros dos puntos de alta temperatura corresponden al punto de soporte, donde hay fugas de



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

calor (no está perfectamente aislado); y el calor transmitido por el transductor de ultrasonido (que se apoya en la parte posterior de la pieza).

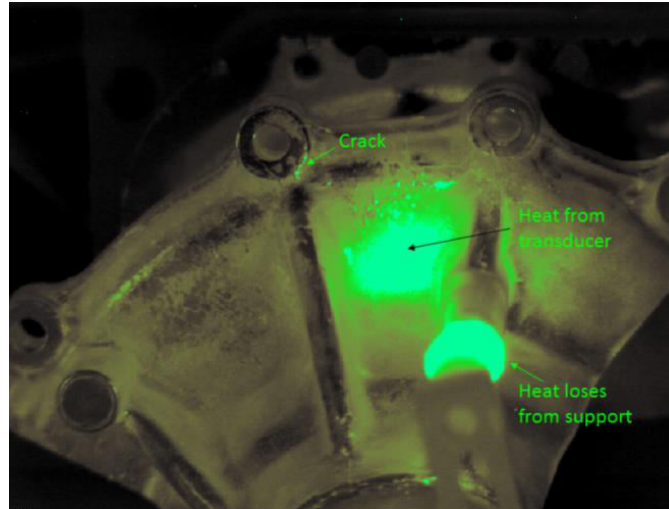


Figura 4-5. Vibrotermografía de pieza defectuosa.

4.3 Etapa 3: Procesamiento de imágenes

Dado que el procesamiento de imágenes solo se haría para los experimentos *step heating* y *lock-in*. Se utilizó una cámara térmica Flir E5 que tiene una función de procesamiento de imagen MSX automático que agrega detalles clave de la cámara de luz visible integrada a toda la imagen de infrarrojos en tiempo real. Así, el resultado es una imagen térmica integral sin diluir con características de visión normal que le permite detectar instantáneamente dónde se encuentra el patrón de calor problemático. MSX es en tiempo real, para que pueda ver los resultados de inmediato en la pantalla.

4.4 Etapa 4: Análisis de los datos obtenidos

El criterio para utilizar cualquiera de las técnicas tiene que ser definido por el usuario, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar. Probablemente, a un investigador que se enfoque en el procesamiento de imágenes, pueda desarrollar un mayor aprendizaje de una técnica que proporcione mucho ruido en su termograma como lo



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

pueden ser *step heating* y *lock-in*. Por otra parte, si se requiere de un método que permita caracterizar la falla, la vibrotermografía es una mejor opción debido a que el termograma que se obtiene no presenta ruidos térmicos generados por la reflexión. Finalmente, para el caso específico de la planta donde se desarrolló la tesis, la vibrotermografía es una mejor opción, aunque más cara, ya que las fisuras en ocasiones son profundas y una técnica que proporciona mucho ruido térmico en la superficie, no es deseable, si lo que se necesita es un análisis rápido.

La Tabla 4.1 muestra de manera simple una comparación cualitativa de las técnicas que se utilizaron en la presente tesis. Dado que el método desarrollado tiene como objetivo detectar fisuras en una planta automotriz, la alta gerencia requiere de un método donde no se tenga que invertir mucho tiempo y la relación costo beneficio se ajuste al presupuesto asignado, tomando en cuenta esto, la vibrotermografía es la mejor técnica para la planta donde se desarrolló el método.

Tabla 4.1. Comparación cualitativa de las técnicas de análisis utilizadas.

Técnica	Detección	Dificultad de implementación	Costo de implementación	Complejidad de análisis
Step heating	Baja	Baja	Medio	Alta
Lock-in	Baja	Baja	Medio	Alta
Vibrotermografía	Alta	Media	Alto	Baja

4.5 Etapa 5: Validación del método

Después de haber ejecutado el experimento por vibrotermografía en una pieza industrial con una fisura, se pudo detectar la zona con el defecto lo que hace que el método haya quedado validado de manera positiva.



CAPÍTULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.6 Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que la hipótesis planteada donde se aseveraba que “el desarrollo de un método de evaluación no destructiva mediante termografía infrarroja activa permitiría detectar las fisuras en piezas de aluminio fundidas a alta presión por medio del análisis del contraste térmico que existe entre un punto sano (o sin fallas) y un punto dañado cuando éstos son estimulados térmicamente por un agente externo”, queda aceptada por medio de la demostración donde el método de termografía activa propuesto ha sido validado.

Además, se sugiere utilizar cámaras de alta gama enfocadas a la investigación, debido a que las cámaras que se distribuyen actualmente, solo se enfocan en aplicaciones de mantenimiento industrial para observar puntos calientes y no en aplicaciones de análisis de materiales o defectos. También, si se pretende utilizar una técnica de termografía activa, es mejor capturar las imágenes mediante video, ya que el fenómeno de contraste térmico en una pieza, puede darse en un tiempo muy corto que podría no ser captado adecuadamente mediante una fotografía.

Finalmente, este tipo de métodos de análisis haciendo uso de termografía activa, se presta a investigaciones académicas en laboratorio y puede ser utilizado en una gran cantidad de aplicaciones no solamente industriales, sino también en construcción, medicina, entre otras.



Bibliografía

- Albatici, R. (2010). Infrared thermovision technic for the assesment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and buildings*, 2177-2183.
- Andresen, B. (2005). *Die Casting Engineering: A Hidraulic, Thermal and Mechanical Process*. New York: Marcel Dekker.
- Benítez Restrepo, H. D. (2007). Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales. *Tecnura: Tecnología y cultura afirmando el conocimiento*, 40-51.
- Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., & Bendada, A. (2007). Nuevo contraste térmico para el ensayo termográfico no destructivo de materiales. *Ingeniería y competitividad*, 31-44.
- Boundless Psychology. (21 de Septiembre de 2016). *Boundless Psychology*. Obtenido de Vision: The Visual System, the Eye, and Color Vision: <https://www.boundless.com/psychology/textbooks/boundless-psychology-textbook/sensation-and-perception-5/sensory-processes-38/vision-the-visual-system-the-eye-and-color-vision-161-12696/>
- Broberg, P. (2012). Surface crack detection in welds using thermography. *NDT&E International*.
- Burrows, S., Dixon, S., Pickering, S., Li, T., & Almond , D. (2011). Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source. *NDT&E*, 589-596.
- Busse, G., Wu, D., & Karpen, W. (1992). Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. *Journal of Applied Physics*, 3962-3965.
- Butcher, G. (2016). *Tour of the electromagnetic spectrum*. Washington, DC.: NASA.
- Cañada, M. S., & Royo, R. P. (2016). *Termografía infrarroja nivel 2: END ensayos no destructivos*. España: CIMS.
- Carrion Viramontes, F. J., Lomelí Gonzalez, M. G., Quintana Rodríguez, J. A., & Martínez Madrid, M. (2003). La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. *Instituto Mexicano del transporte*, 6-7.



- Cheng, L., & Tiang, G. (2012). Comparison of nondestructive testing methods on detection of delamination composites. *Journal of sensors, Volume (2012),, 7*.
- Crupi, V. (2009). Fatigue analysis of butt welded AH36 steel joints: Thermographic Method and design S–N curve. *Elsevier: Marine structures*.
- Dillenz, A., Zweschper, T., & Busse, G. (2001). Progress in ultrasound phase thermography. In *Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls* (págs. 574-579). Orlando, FL: International Society for Optics and Photonics.
- Echevarria, R. (2003). *Líquidos Penetrantes*. Comahue: Universidad Nacional de Comahue, Facultad de ingeniería: Laboratorio de ensayos no destructivos.
- Erhard, A. (2013). Non-Destructive Evaluation. En H. Czichos, *handbook Of Technical Diagnostics* (págs. 161-174). Berlin: Springer Berlin heidelberg.
- Española, R. A. (05 de Septiembre de 2016). *Diccionario de la Real Academia Española*. Obtenido de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/?id=KzwDY4y>
- Fairchild, M. D., & Melgosa, M. (2012). *La tienda de las curiosidades sobre el color*. New York: MDF publications.
- Favro, L., Han, X., Ouyang, Z., Sun, G., Sui, H., & Thomas, L. (2000). Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse. *Review of scientific instruments, 71(6)*, 2418-2421.
- Fraga, L. G. (28 de Noviembre de 2016). *CINVESTAV*. Obtenido de CINVESTAV Cursos: Procesamiento digital de imágenes: <http://cs.cinvestav.mx/~fraga/Cursos/Reconocimiento3D/2004/cap1.pdf>
- Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications, 245-262*.
- García Santillan, I. D. (2008). *Visión artificial y procesamiento digital de imágenes usando Matlab*. Ibarra-Ecuador.
- Gaussorgues, G. (1994). *Infrared thermography*. Berlin: Springer.
- Giorleo, G., & Meola, C. (2002). Comparison between pulsed and modulated thermography in glass–epoxy laminates. *NDT & E International, 35(5)*, 287-292.
- González Velázquez, J. (1999). *Metalurgia Mecánica*. México, DF.: Limusa.



- Gonzalez, R., & Woods, R. (2007). *Digital Image Processing 3rd ed.* Tennessee: Pearson.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna.* Pennsylvania: McGraw-Hill Interamericana.
- Grosse, C., & Ohtsu, M. (2008). *Acoustic Emission Testing: Basic for Research-Applications in Civil Engineering.* Berlin: Springer Science & Business Media .
- Heine, R., Loper, J., & Rosenthal, C. (1967). *Principles of metal casting 2a. ed.* New York: McGraw-Hill Book Co.
- Ibarra Castanedo, C. (2005). Análisis de imágenes en termografía infrarroja. *Proc.X Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial* . Cali, Colombia.
- Ibarra-Castanedo. (2007). ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY TECHNIQUES FOR THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS. En C. H. Chen, *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization* (págs. 325-348). Massachusetts Dartmouth: World Scientific.
- Ibarra-Castanedo, C., Galmiche, F., Darabi, A., Pilla, M., Klein, M., Ziadi, A., & Maldague, X. (2003). Thermographic nondestructive evaluation: overview of recent progress. *Proceedings in SPIE, Thermosense XXV* (págs. 450-459). Orlando, FL: SPIE.
- Ibarra-Castanedo, C., Genest, M., Guibert, S., Piau, J., Maldague, X., & Bendada, A. (2007). Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography, and vibrothermography: a comparative study. *In Defense and Security Symposium* (págs. 654116-654116). International Society for Optics and Photonics.
- Ibarra-Castanedo, C., Tarpani, J., & Maldague, X. (2013). Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics* 34(6), 91-109.
- Lengua, A. M. (05 de Septiembre de 2016). *Diccionario de la Academia Mexicana de la Lengua.* Obtenido de Academia Mexicana de la Lengua: <http://www.academia.org.mx/imagen>
- Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing.* New York: Wiley.
- Maldague, X., & Marinetti, S. (1996). Pulse Phase Infrared Thermography. *Journal of applied physics*, 79(5), 2694-2698.



- Martínez, S. M., & Celemin, A. V. (2012). *Estudio sobre la fiabilidad de medición del espectrofotómetro delta Vita Easyshade compact*. Madrid.
- McAndrew, A. (2004). *An Introduction to Digital Image Processing with MATLAB*. Melbourne, Victoria, Australia.
- Meola, C., & Carlomagno, G. (2010). *Recent Advances in Non Destructive Inspection*. NY, USA: Nova Science Publisher Inc.
- Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2006). Application of infrared thermography to adhesion science. *Journal in Adhesion Science and Technology*, 589-632.
- Modest, M. F. (2013). *Radiative heat transfer*. Amsterdam: Academic Press.
- Montgomery, D. T. (9 de Septiembre de 2016). *Anatomy, physiology and pathology of the human eye*. Obtenido de http://www.tedmontgomery.com/the_eye/
- Moreno, A. G. (2017). *Tesis de posgrado "Desarrollo de un sistema de visión artificial para la medición del color en muestras de colores de pinturas mediante redes neuronales artificiales"*. Celaya, Guanajuato: Instituto Tecnológico de Celaya.
- Netzelmann, U., & Walle, G. (2008). Induction thermography as a tool for reliable detection of surface defects in forged components. *In 17th World Conference on Nondestructive Testing* (págs. 25-28). Shanghai, China: World Conference on Nondestructive Testing.
- Netzelmann, U., & Walle, G. (2008). Induction thermography as a tool for reliable detection of surface defects in forged components. *In 17th World Conference on Nondestructive Testing*, (págs. 25-28). Shanghai, China.
- Rimoldi, C., & Mundo, L. (30 de Noviembre de 2016). *Departamento de aeronáutica-Universidad Nacional de la Plata*. Obtenido de Facultad de Ingeniería-Cátedra: Ensayos no destructivos: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>
- Roger L. Easton, J. (22 de Noviembre de 2010). *Fundamentals of Digital Image Processing*. Obtenido de Chester F. Carlson Center for Imaging Science: <https://www.cis.rit.edu>
- Shepard, S., Ahmed, T., & Lhota, J. (2004). Experimental considerations in vibrothermography. *In Defense and Security* (págs. 332-335). International Society for Optics and Photonics.



- Shull, P. (2002). *Nondestructive evaluation: Theory, techniques and applications*.
- Solodov, I., Rahammer, M., Derusova, D., & Busse, G. (2015). Highly efficient and noncontact vibrothermography via local defect resonance. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 12(1), 98-111.
- Szwedo, M., Pieczonka, L., & Uhl, T. (2012). Application of vibrothermography in nondestructive testing of structures. *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*.
- Usamantiega, R., Venegas, p., Guerediaga, J., Vega, L., Mollega, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors* 14(7), 12305-12348.
- Usamentiaga, R., García, D., & Molleda, J. (2008). Real-time adaptive method for noise filtering of a stream of thermographic line scans based on spatial overlapping and edge detection. *Journal of Electronic Imaging*, 033012-033012.
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., & López, I. (2013). A quantitative comparison of stimulation and post-processing thermographic inspection methods applied to aeronautical carbon fibre reinforced polymer. *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 55-73.
- Vilet, J. R. (Agosto de 2004). *Apuntes de procesamiento digital de imágenes*. San Luís Potosí, San Luís Potosí, México.
- Wilczek, A., Dlugosz, P., & Hebda, M. (2015). Porosity characterization of aluminum castings by using particular non-destructive techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation* 34(3), 26.
- Zweschper, T., Dillenz, A., Riegert, G., Scherling, D., & Busse, G. (2003). Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45(3), 178-182.
- Zweschper, T., Riegert, G., Dillenz, A., & Busse, G. (2003). Frequency-modulated elastic wave thermography. *In AeroSense 2003* (págs. 386-391). International Society for Optics and Photonics.