

**DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA  
INFORMÁTICA QUE SIMULA EL PROCESO RADIOGRÁFICO  
DE UNIONES SOLDADAS**

**RICARDO ANDRÉS SANTAMARÍA TORRES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2007**

**DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA  
INFORMÁTICA QUE SIMULA EL PROCESO RADIOGRÁFICO  
DE UNIONES SOLDADAS**

**RICARDO ANDRÉS SANTAMARÍA TORRES**

**Trabajo de grado presentado como requisito  
para optar al título de Ingeniero Metalúrgico**

**Director.**

**LUZ AMPARO QUINTERO  
Msc. Ingeniería Metalúrgica**

**Codirector.**

**Jorge Alberto Suarez Suarez  
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2007**

## DEDICATORIA

*A mi madre Ligia Torres, cuyo amor infinito ha sido y será siempre mi inagotable fuente de energía.  
A mi padre Ricardo Santamaría, quien a pesar de la distancia ha estado a sólo unos pasos de mí enseñándome que grandes sacrificios resultan en grandes recompensas.*

*A mi querida hermana Mary Andrea, por el apoyo que en todo momento he recibido de ella.*

*A mi tío Vidal Santamaría, a quien considero como un segundo padre.*

**RICARDO ANDRÉS SANTAMARÍA TORRES**

## **AGRADECIMIENTOS**

- A la maravillosa Universidad Industrial de Santander y su escuela de Ingeniería Metalúrgica. “Salve Atenas gloriosa y bendita que en el cielo te vimos nacer, de esa tierra que ardiente palpita con el alma del gran Santander”.
- A la profesora Luz Amparo Quintero, directora del proyecto, por su total y continua colaboración y orientación en la ejecución de este trabajo, quien fue también aquella persona que me brindó la oportunidad de realizarlo.
- A todos los profesores y técnicos de la escuela quienes me brindaron el conocimiento y me inculcaron el amor que le tengo a la Ingeniería Metalurgia.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	4
1.1 INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA CON RAYOS X	4
1.2 DEFECTOLOGÍA EN LA SOLDADURA	13
1.3 LAS HERRAMIENTAS INFORMATICAS	23
1.4 VISUALIZACION DE IMÁGENES CON MATLAB	31
1.5 LAS TIC's COMO HERRAMIENTA PARA LA EDUCACIÓN	37
2. METODOLOGÍA	41
3. DESARROLLO	45
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES RADIOGRÁFICAS Y SELECCIÓN DE ALGUNOS DEFECTOS BÁSICOS EN SOLDADURA	45
3.2 CREACIÓN DE UN BANCO DE DATOS PROPIO CON LAS RESPUESTAS RADIOGRÁFICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MANEJO DE ALGUNAS DE LAS VARIABLES IDENTIFICADAS	46

3.3	CAPACITACIÓN EN LA PROGRAMACIÓN, EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y CREACIÓN DE INTERFACES GRÁFICAS EMPLEANDO MATLAB 7.0	46
3.4	DISEÑO DEL SimPRI	46
3.5	IMPLEMENTACIÓN DE LAS CORRELACIONES ENTRE EL BANCO DE DATOS Y LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	47
3.6	ELABORACIÓN DE LOS ALGORITMOS PARA LA CREACIÓN DE LOS OBJETOS INTRODUCIDOS EN EL SimPRI	56
3.7	DESARROLLO DEL SimPRI	58
3.7.1	PRIMERA ETAPA	58
3.7.2	SEGUNDA ETAPA	68
3.8	IMPLEMENTACIÓN DEL SimPRI Y VERIFICACIÓN CON USUARIOS	70
3.9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
4.	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA SimPRI	72
5.	CONCLUSIONES	78
6.	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	80

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Imagen fotográfica de la estación espacial internacional	5
Figura 2. Imagen radiográfica de un componente de circuito electrónico	6
Figura 3. Diagrama esquemático del funcionamiento de un tubo de rayos X	7
Figura 4. Principales etapas de un proceso radiográfico	8
Figura 5. Montaje del sistema para llevar a cabo una exposición radiográfica	10
Figura 6. Representación esquemática de la absorción diferencial de radiación en una pieza de espesor variable	12
Figura 7. Esquema del funcionamiento de un densitómetro convencional	13
Figura 8. Diagrama esquemático de las zonas presentes en una unión soldada	14
Figura 9. Imagen fotográfica de la aplicación de una soldadura eléctrica	16
Figura 10. Línea automatizada de ensamblaje de automóviles	24
Figura 11. Imagen de una cabina para la simulación de vuelo	28
Figura 12. Termograma de un rostro humano	30
Figura 13. Imagen que revela la presencia de los píxeles	32
Figura 14. Representación del sistema de coordenadas por píxel de MATLAB	33
Figura 15. Correspondencia entre una imagen tipo Binaria y sus elementos	35
Figura 16. Correspondencia entre un imagen tipo índices y sus elementos	36
Figura 17. Correspondencia entre una imagen Gray Scale y sus elementos	37
Figura 18. Correspondencia entre una imagen tipo RGB y sus elementos	38
Figura 19. Diagrama esquemático de la metodología de trabajo	41

Figura 20.	Diagrama esquemático del comportamiento del SimPRI	48
Figura 21.	Etapas para la creación de los objetos pieza, película y defectos	58
Figura 22.	Vista frontal y superior de una escalerilla metálica	63
Figura 23.	Matriz que contiene los espesores de la escalerilla metálica	63
Figura 24.	Matriz que contiene las densidades radiográficas	64
Figura 25.	Correlación entre niveles de gris y densidad radiográfica	65
Figura 26.	Matrices que representan una imagen tipo escala de grises	66
Figura 27.	Etapas de transformación de las matrices empleando el SimPRI	67
Figura 28.	Consola principal de la herramienta informática SimPRI	69
Figura 29.	Consola del equipo ANDREX	70
Figura 30.	Selección de las condiciones de la pieza de análisis	72
Figura 31.	Selección de las condiciones de la película radiográfica	73
Figura 32.	Uso del Ábaco para seleccionar las condiciones de exposición	74
Figura 33.	SimPRI mientras irradia la pieza	75
Figura 34.	Respuesta radiográfica y medición de la densidad	76
Figura 35.	Reporte generado por el SimPRI	77

## LISTA DE CUADROS

		pág.
Cuadro 1.	Descripción y apariencia de algunos defectos de soldadura	17
Cuadro 2.	Características y usos de algunos lenguajes de programación	25
Cuadro 3.	Descripción de los objetos introducidos en el SimPRI	57

## LISTA DE TABLAS

		pág.
Tabla 1.	Valores del factor $Kp$	50
Tabla 2.	Valores del factor $Km$	50
Tabla 3.	Valores del factor $Ke$	50
Tabla 4.	Valores del coeficiente $d_o$ para el acero	51
Tabla 5.	Valores del coeficiente $b$ para el acero	52
Tabla 6.	Valores del coeficiente $d_o$ para el aluminio	53
Tabla 7.	Valores del coeficiente $b$ para el aluminio	54
Tabla 8.	Condiciones de operación del equipo ANDREX	55
Tabla 9.	Coeficientes $b_2, b_1$ y $d_0$ para el acero	60
Tabla 10.	Coeficientes $b_2, b_1$ y $d_0$ para el aluminio	60

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A.	<b>83</b>
ANEXO B.	84

**Título: DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA QUE SIMULA EL PROCESO RADIOGRÁFICO DE UNIONES SOLDADAS\***

Autor: RICARDO SANTAMARÍA.\*\*

**PALABRAS CLAVES**

Defectología en soldadura.

Inspección radiográfica.

Simulación computarizada.

MATLAB.

Procesamiento y visualización de imágenes.

**RESUMEN**

La radiografía Industrial con rayos X es una técnica de inspección no destructiva de gran aplicación que para una correcta ejecución requiere de personal altamente capacitado tanto práctica como teóricamente.

Algunos inconvenientes que presenta este entrenamiento son el costo de los materiales, la energía y el tiempo empleados, además del deterioro de algunos equipos y el riesgo radiológico inherente a su uso. Estos problemas también se presentan en la academia, mas concretamente en las instituciones que capacitan al estudiante para la aplicación de esta técnica.

Consientes de estas falencias se planteó y ejecutó un proyecto apoyado en la TIC's, que se basa en la creación de una herramienta informática que asiste al estudiante durante su proceso de capacitación en la determinación de la sanidad de uniones soldadas; esto se logra con la simulación del proceso de inspección radiográfica con rayos X de piezas de acero y aluminio, y con la interpretación de los resultados obtenidos en forma de imágenes radiográficas.

Para la realización de este trabajo se empleó el lenguaje de programación MATLAB (*MatrixLaboratory*) version 7.0, ya que contiene una gran cantidad de funciones que permiten el procesamiento de información gráfica a partir de información numérica.

Esta herramienta informática llamada SimPRI (Simulación del Proceso de Radiografía Industrial) no pretende eliminar el empleo de los equipos reales, en cambio ayudaría al estudiante a adquirir experiencia previa con el manejo de los equipos de rayos X y a interpretar imágenes radiográficas durante su curso de ensayos no destructivos, acelerando de esta manera su proceso de aprendizaje y aún así disminuyendo los costos.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Ingeniería Metalúrgica. Directores: Msc. Luz Amparo Quintero. Ing. Jorge Alberto Suárez.

Title: **DESIGN, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A COMPUTER TOOL FOR SIMULATING THE RADIOGRAPHIC PROCESS OF WELDED JOINTS\***

Author: RICARDO SANTAMARIA.\*\*

**KEY WORDS**

Welding flaws.

Radiographic inspection.

MATLAB.

Computed simulation.

Processing and visualization of Images.

**Abstract**

Industrial radiography with X rays is a technique for non destructive inspection with great application, but in order to a correct execution it requires of highly capacitated people even practical as theoretically.

Some problems that its training presents are cost of material, energy and time consuming, in addition to the damage in some equipments and the radiological risk by its implementation. These problems exist in the academy too, especially on institutions that teach students for the application of this technique.

Because of this problems, it was established and executed a project supported by the TIC's, that is based on the creation of a computed tool that aids the students during their learning process in determination of the soundness in welded joints; this is made with the simulation of the radiographic inspection with X rays on steel and aluminum specimens, and with the interpretation of the results as a radiographic image.

In order to make this computer tool, the programming language MATLAB version 7.0 (Matrix Laboratory) was implemented because of its huge quantity of functions that allows the graphic information processing from numeric information.

This computed tool called SimPRI (Simulation of Industrial Radiographic Process) does not pretend to eliminate the application of real equipments, but it will help students to get previous experience in X rays equipments handling and radiographic images interpreting during their non destructive testing course, speeding up their learning process and decreasing the costs of its implementation.

---

\* Dissertation.

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. Engineering Metallurgical. Directors: Msc. Luz Amparo Quintero O. Ing. Jorge Alberto Suárez.

## INTRODUCCIÓN

El mundo moderno en el que vivimos les exige constantemente a los ingenieros que lleven hasta el límite sus construcciones; ahora más que nunca se hace necesario lo más veloz, lo más alto, lo más extenso, lo más profundo, incluso lo más inteligente pero al menor costo posible. Para llevar a cabo senda tarea los ingenieros están comprometidos en optimizar las propiedades de los materiales que emplean y los procesos de producción y control de calidad que aplican.

La soldadura ha sido desde siempre un proceso industrial de gran relevancia que ha impulsado el mejoramiento técnico y tecnológico de nuestra civilización, ejemplo de ello es el alto desarrollo que han tenido algunas industrias tales como la petroquímica donde la soldadura es indispensable para la construcción, el mantenimiento y la reparación de, por ejemplo, tanques de almacenamiento, tanques a presión, oleoductos y gasoductos entre otros; en la industria del transporte la soldadura es empleada principalmente para el ensamblaje de automóviles, algunos tipos de aeronaves, barcos, y hoy por hoy la electrónica demanda cada vez más el empleo de este proceso de unión.

Debido al inmensurable volumen de uniones soldadas que son puestas en servicio diariamente, existe la gran posibilidad que algunas de estas piezas fallen a causa de una producción defectuosa; aquí surge la principal responsabilidad del ingeniero de procesos y del inspector, la cual se basa en asegurarle tanto a la empresa fabricante como al cliente que el producto final posee las propiedades necesarias para cumplir con el trabajo por el que fue construido.

Para lograr lo anterior, los inspectores llevan a cabo un seguimiento de las piezas durante su fabricación, durante su proceso de producción o acople a otras piezas, y finalmente durante su periodo de servicio; de esta manera ellos aseguran que el

comportamiento del producto final se encuentra dentro de los límites de desempeño solicitados.

Según la **American Welding Society**, la evaluación de la sanidad en uniones soldadas debe llevarse a cabo por inspectores calificados que posean el conocimiento de varios factores dentro de los cuales se encuentran los métodos de ensayos destructivos y no destructivos, los procesos de soldadura, la metalurgia de la soldadura y los requerimientos para la calificación de los soldadores, teniendo siempre presente las especificaciones de las normas y los códigos para cumplir así con los estándares de aceptación empleados a nivel mundial.<sup>(1)</sup>

El conjunto de técnicas empleadas para la inspección y valoración de las condiciones en las que se encuentra una pieza sin llegar a dejarla fuera de servicio se conoce como los ensayos no destructivos o END; la complejidad de estos END puede ir desde la visión desnuda del inspector empleada para detectar aquellos defectos que se encuentran sobre la superficie del material, hasta el manejo de radiación penetrante altamente peligrosa la cual brinda la posibilidad de un análisis interno.

Este último END se caracteriza no solo por el elevado costo que conlleva su empleo, sino también como se acaba de mencionar, por el riesgo radiológico que se puede presentar en aquellos que la operan. Éstos y muchos otros inconvenientes que se presentan en las empresas les generan la necesidad de disminuir hasta el límite este tipo de contrariedades; una buena manera de lograr esto es con la implementación de las computadoras, y principalmente de paquetes de **software** especializados, ya que con la ayuda de éstos se pueden llegar a reducir costos aumentando a su vez la calidad de los procesos y los productos.

---

<sup>1</sup> AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding inspection. 2a ed. Miami: American Welding Society, 1980, p. vi

Desde el instante en que las computadoras fueron concebidas, el ingeniero se dio cuenta que al emplear un lenguaje adecuado se podían simular condiciones de trabajo y lograr en forma muy precisa los resultados obtenidos con pruebas y experimentos reales; ésto se debe principalmente a la gran capacidad que tienen las computadoras para realizar miles de cálculos en segundos, manipular fácilmente grandes cantidades de información, presentar resultados en una forma comprensible jamás antes vista y todo a una fracción del costo que resultaría si éstas no fuesen empleadas.

La principal ventaja que ofrece la simulación computarizada de procesos, es brindarle a la persona la posibilidad de interactuar con un entorno que es lo más parecido a la realidad, posibilitando de esta manera su capacitación y entrenamiento sin exponerlo a los peligros que ésta le pueda presentar, pero a su vez disminuyendo los costos de operación y los riesgos relacionados a la seguridad.

Para el desarrollo del siguiente trabajo se mencionarán algunas generalidades que corresponden a la inspección de soldaduras empleando los rayos X, y a las ventajas de la implementación de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC's) como soporte para el aprendizaje y una formación más íntegra de futuros ingenieros; seguidamente se describirá la metodología de cómo se desarrolló la herramienta SimPRI y se presentarán los resultados y las conclusiones obtenidos después de llevar a cabo pruebas con usuarios.

## **1. GENERALIDADES**

Para el desarrollo del presente trabajo se requirió fundamentación básica en lo que se refiere a la radiografía industrial, el proceso de soldadura, la simulación computarizada y el empleo de las TIC's en la educación.

Es importante revisar los conceptos sobre la radiografía industrial con rayos X y el proceso radiográfico, así como la defectología de las uniones soldadas y su respectiva inspección; en cuanto a la simulación se hacen indispensables también los conceptos de cómo se crean las herramientas informáticas empleando los lenguajes de programación, las ventajas que presenta la implementación de los simuladores en la industria, la importancia que tiene la visualización de resultados numéricos para mejorar su comprensión y así facilitar su análisis, y cómo se lleva a cabo la programación en MATLAB y los distintos tipos de imágenes que se pueden procesar y visualizar.

Por último se tiene la implementación de las TIC's como nuevo método alternativo de apoyo para la formación de futuros ingenieros, las cuales brinda la capacidad de recopilar todos los temas anteriormente mencionados y así generar nuevas formas de enseñanza y preparación de profesionales más competentes.

### **1.1 INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA CON RAYOS X**

La mayor parte de los grandes avances que han estado logrando los ingenieros y los científicos desde los últimos años en el desarrollo, la aplicación y el alto desempeño de nuevos materiales, se debe a la implementación de los ensayos no destructivos o END, los cuales emplean una serie de técnicas para determinar el estado externo e interno de piezas de maquinaria o estructuras sin llegar a interrumpir su funcionalidad, asegurando así un correcto rendimiento.

La instalación de oleoductos, la construcción de gigantescos puentes en las principales ciudades del mundo, el alto desempeño de los aviones de combate e incluso la posibilidad de lograr una estadía en el espacio gracias a la estación espacial internacional, la cual puede observarse en la figura 1, entre otras muchas proezas humanas, no hubiesen sido posibles sin el conocimiento de la sanidad interna de las partes que componen estas asombrosas estructuras.

Figura 1. Imagen fotográfica de la estación espacial internacional

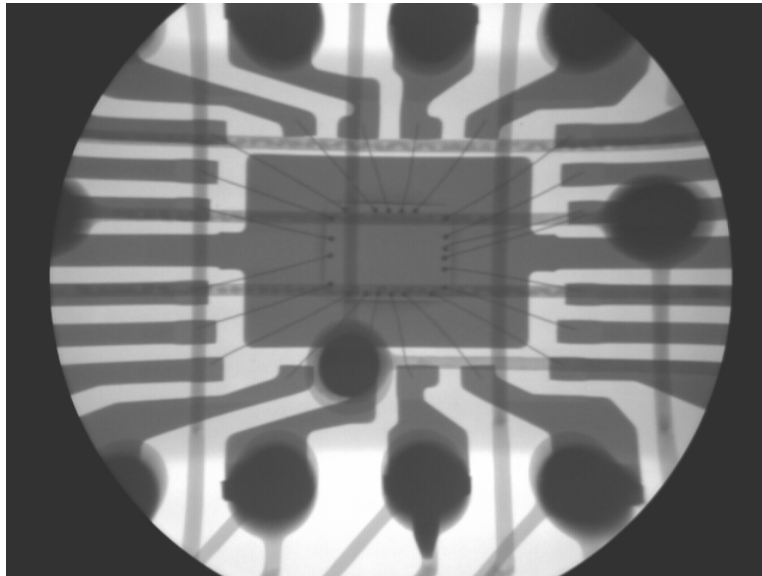


Una de las técnicas más importantes de entre todos los métodos de END implementados actualmente, es la radiografía industrial con rayos X. Gracias al empleo de esta radiación de alta penetración que no deteriora la pieza de análisis, la industria que la implementa logra conseguir un registro permanente de su estado interno.

Usando las condiciones adecuadas se pueden llegar a radiografiar cualquier tipo de material ya sea orgánico, inorgánico, sólido, líquido e incluso gases, al igual que objetos de tamaño microscópico como componentes de equipos electrónicos (ver figura 2), u objetos tan enormes como partes de misiles; sumado a todo esto, un hábil inspector de radiografías puede evaluar piezas de casi cualquier forma,

demostrando así la gran versatilidad que presenta esta técnica frente a los otros métodos de END.<sup>(2)</sup>

Figura 2. Imagen radiográfica de un componente de circuito electrónico



La información obtenida mediante el uso de la radiografía industrial con rayos X puede, por ejemplo, ayudar al ingeniero y al diseñador a mejorar sus productos y a su vez proteger la compañía al lograr mantener una uniformidad y un alto nivel de calidad en sus servicios; de esta manera la empresa brinda satisfacción al consumidor y logra una excelente reputación.

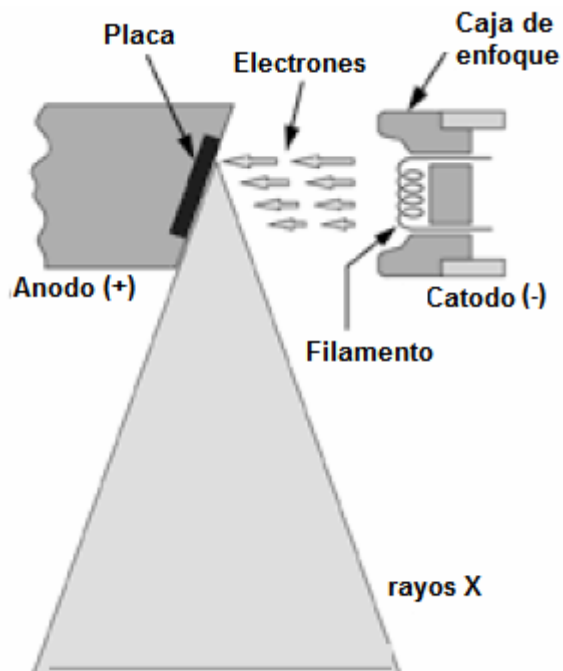
Para producir estos rayos X se deben hacer colisionar en forma controlada contra un objetivo, electrones que viajan a alta velocidad; este proceso se lleva a cabo al interior de un dispositivo electrónico conocido como tubo de rayos X.

Un esquema de las principales partes que constituyen un tubo de rayos X se presenta a continuación en la figura 3.

---

<sup>2</sup> EAST KODAK COMPANY. Radiography in modern industry. 4a ed. Rochester: East Kodak Company, 1980, p. 6

Figura 3. Diagrama esquemático del funcionamiento de un tubo de rayos X



Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4<sup>th</sup> ed

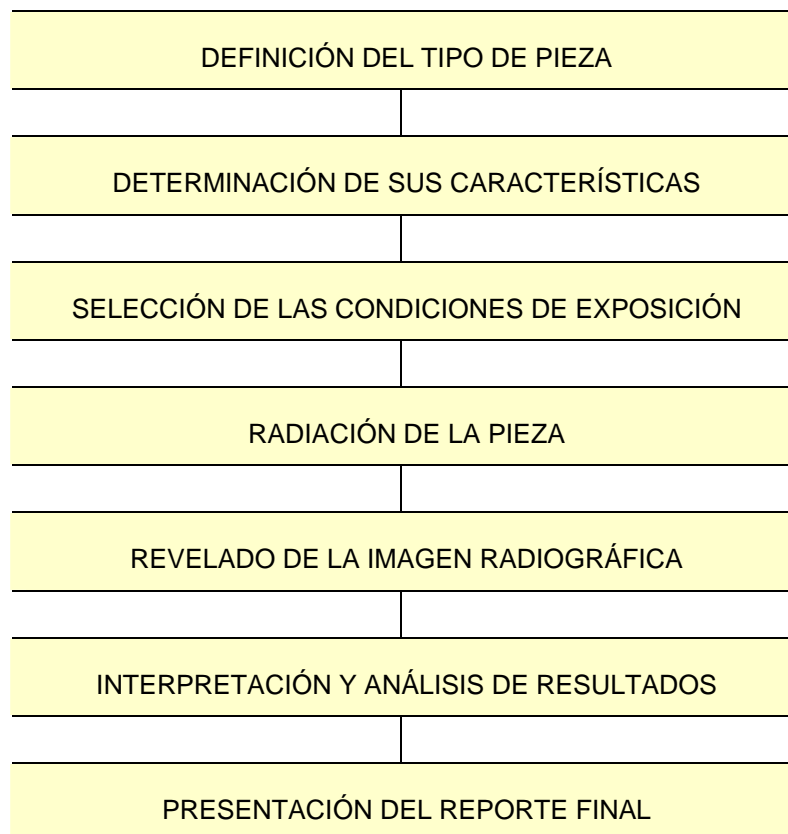
Un tubo de rayos X convencional consta de un filamento incandescente llamado cátodo, generalmente de tungsteno para resistir las altas temperaturas, encargado de proporcionar los electrones que luego serán dirigidos hacia el ánodo o placa al aplicar un alta diferencia de potencial; esta súbita detención del veloz movimiento de los electrones al colisionar contra la superficie del ánodo, hecho de un material de alta conductividad térmica como el cobre, es el efecto que genera los rayos X.

El filamento del cátodo, en forma de serpentin, es calentado por una corriente de varios amperios desde una fuente de bajo voltaje que generalmente es un pequeño transformador; la caja de enfoque sirve para concentrar el flujo de estos electrones sobre una pequeña región del ánodo conocida como punto focal. Este flujo de electrones constituye la corriente que pasa por el filamento y es medida en mili amperios.

A mayor corriente en el tubo, mayor será la temperatura producida en el filamento y por lo tanto mayor será la emisión de electrones, por otro lado, a mayor diferencia de potencial empleada, mayor será la velocidad de estos electrones chocando contra el punto focal. El resultado de esto es una disminución en la longitud de onda de los rayos X emitidos y un incremento en su poder de penetración e intensidad; por lo tanto se tiene que los voltajes altos son usados en materiales muy densos y/o para irradiar piezas que de gran espesor.

Para la obtención de las imágenes radiográficas, las cuales serán analizadas posteriormente, se debe seguir una serie de pasos conocidos como el proceso radiográfico; uno de los posibles procesos es esquematizado en la figura 4.

Figura 4. Principales etapas de un proceso radiográfico



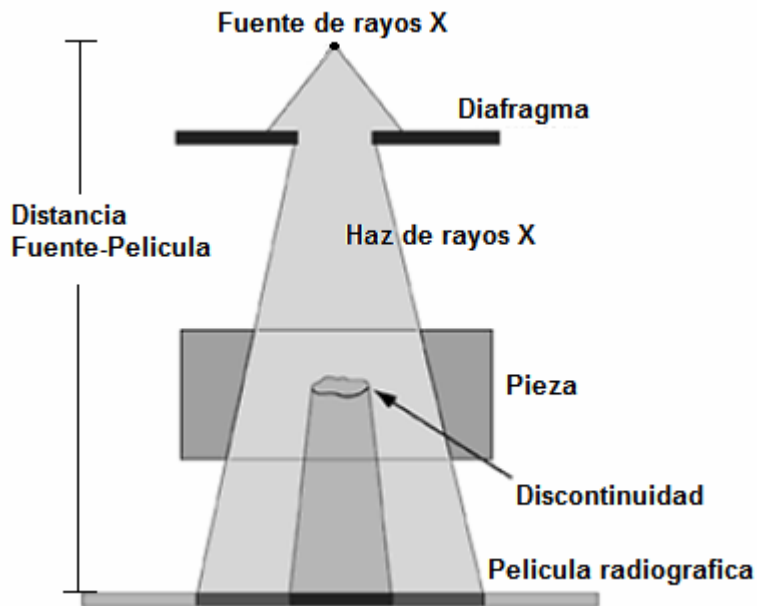
El primer paso en este proceso radiográfico consiste en registrar la naturaleza de aquella pieza que requiere ser evaluada, es decir, se define si se trata de una tubería, un recipiente a presión, una caldera, placas soldadas, un eje, un engranaje o cualquier otra parte de una máquina o estructura en general; ésto también hace que se defina la norma que se deberá emplear para su posterior inspección.

Una vez definido el tipo de pieza se determinan sus características físicas necesarias para continuar con el proceso, de las cuales dependerán las condiciones de exposición radiográfica; estas características básicamente son el tipo de material del que está hecho y el máximo espesor que presenta.

El tercer paso de este proceso radiográfico consiste en elegir las condiciones necesarias a las que deberá trabajar el equipo de rayos X para obtener los mejores resultados en densidad y calidad de imagen radiográfica; esto se puede lograr empleando el ábaco, el cual consiste en una gráfica que correlaciona las características de la pieza anteriormente determinadas junto con el Kilo voltaje, el mili Amperaje, el tiempo que tomará la exposición, la distancia entre la fuente de los rayos X y la película, el proceso de revelado, el uso o no de pantallas intensificadoras, el tipo de equipo y el tipo de película radiográfica, entre otras variables.

Después de establecidas las condiciones de trabajo y finalizado el correcto montaje del sistema, el cual se puede observar en la figura 5, se da inicio a la radiación de la pieza; durante esta etapa del proceso radiográfico se deben tener muy en cuenta todas las precauciones de seguridad necesarias para evitar cualquier riesgo radiológico inherente al uso de este tipo de radiación de alta energía.

Figura 5. Montaje del sistema para llevar a cabo una exposición radiográfica



Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4<sup>th</sup> ed

Cuando la radiación finaliza, la película radiográfica aún no puede ser analizada, ésta primero debe someterse a un proceso de revelado para que logre registrar efectivamente y de manera permanente las condiciones internas de la pieza en una imagen conocida como radiografía. Para más información, la Eastman Kodak Company en su capítulo 10 titulado **Fundamentals of Processing** presenta una completa revisión de este tema. <sup>(3)</sup>

Una vez obtenida la imagen radiográfica, un inspector calificado las analizará y determinará, usando su conocimiento y preparación, si las variaciones de espesor y características internas que presenta el material, llamadas discontinuidades, representarán o no algún tipo de riesgo para el correcto desempeño de la pieza dentro de la estructura o maquinaria de la que hace parte.

---

<sup>3</sup> Ibid., p 104 – 120.

La norma API\* 1104 de 1999 en su numeral 9 titulado **Acceptance Standards for Nondestructive Testing** presenta los criterios de aceptación y rechazo que se aplican a algunos defectos de soldadura, analizados por medio de técnicas de ensayos no destructivos.

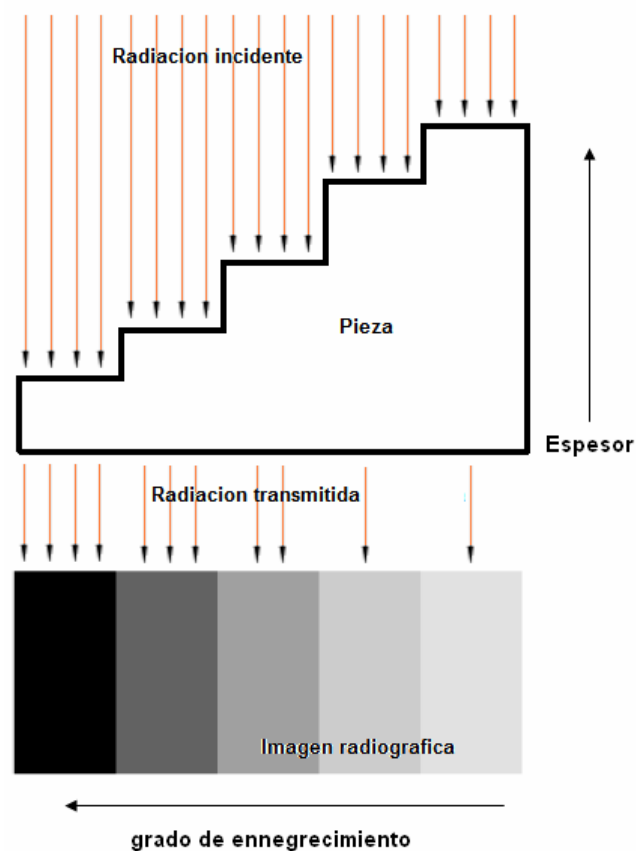
Las radiografías obtenidas mediante este proceso radiográfico consisten de una imagen que se compone de zonas claras y oscuras generadas por la interacción entre la radiación transmitida a través de la pieza y los componentes químicos de la película radiográfica. Las zonas claras representan una mayor absorción de radiación por parte de la pieza debido posiblemente a un mayor espesor o a la presencia de un material distinto de alta densidad, por otro lado, la presencia de las zonas oscuras se debe a que una cantidad mayor de radiación interactuó con la película debido a el mayor paso de ésta a través de la pieza de análisis; este concepto se puede visualizar en las figuras 5 y 6.

El grado de ennegrecimiento observado en la imagen radiográfica se conoce como densidad radiográfica o simplemente densidad; generalmente hablando, la densidad de cualquier imagen radiográfica depende de la cantidad de radiación absorbida por la película y ésta a su vez depende de varios factores, principalmente de la cantidad de radiación emitida por el tubo de rayos X, la cantidad de radiación que logra llegar hasta la pieza desde la fuente y la proporción de esta radiación que pasa a través de la pieza.

---

\* Acrónimo en inglés para American Petroleum Institute

Figura 6. Representación esquemática de la absorción diferencial de radiación en una pieza de espesor variable



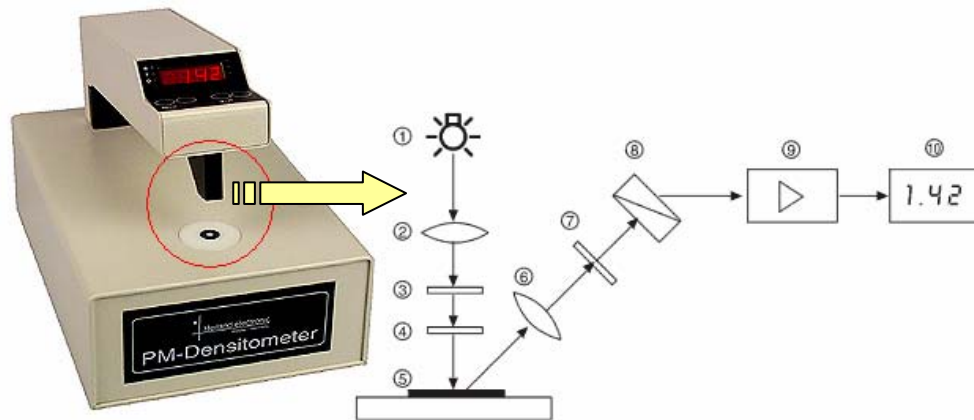
Fuente: EAST KODAK COMPANY. Radiography in Modern Industry 4<sup>th</sup> ed

La densidad radiográfica se representa cuantitativamente por un valor numérico que se mide empleando un dispositivo llamado densitómetro, el cual se puede observar en la figura 7; este dispositivo determina el grado de ennegrecimiento empleando la (Ec-1) presentada a continuación:

$$D = \log \left( \frac{I_0}{I_1} \right) \quad (\text{Ec-1})$$

Donde  $D$  es la densidad radiográfica,  $I_0$  e  $I_1$  son respectivamente la intensidad de luz incidente y transmitida sobre la película.

Figura 7. Esquema del funcionamiento de un densitómetro convencional



- |                           |                         |                           |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1. Fuente luminosa        | 2. Sistema de lentes    | 3. Filtro de polarización |
| 4. Filtro de color        | 5. Película expuesta    | 6. Sistema de lentes      |
| 7. Filtro de polarización | 8. Receptor (fotodiodo) | 9. Equipo electrónico     |
| 10. Pantalla              |                         |                           |

## 1.2 DEFECTOLOGÍA EN LA SOLDADURA

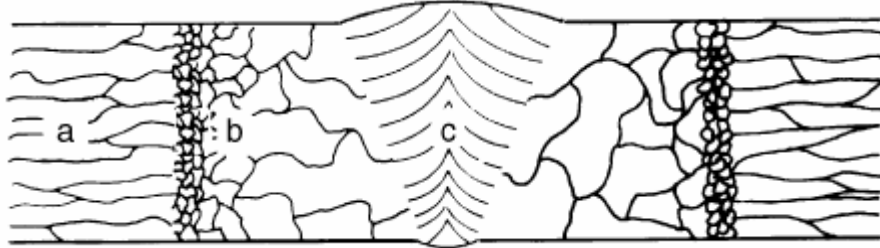
La soldadura es un proceso industrial que se emplea principalmente para la fabricación, reparación y mantenimiento de piezas y estructuras. Éste se basa en un principio muy sencillo que consiste en la unión de dos o más materiales; para lograr ésto generalmente se calientan los bordes de las piezas que serán acopladas hasta que lleguen a un estado líquido o fundido, posteriormente se aplica presión para así fusionar ambas partes en una sola.

En ocasiones este acople se logra fundiendo y depositando un nuevo material en ambos bordes de las piezas al mismo tiempo; el nuevo material depositado se conoce como metal de aporte si es el caso de piezas metálicas, y las partes originales que fueron unidas constituyen el metal base.

Esta introducción de calor a la pieza genera que en el interior de ésta se produzcan cambios los cuales se verán reflejados tanto micro como

macroscópicamente. Estos cambios en la estructura pueden observarse en la figura 8 la cual presenta un corte transversal que muestra las zonas obtenidas en una pieza metálica después de aplicado un proceso de soldadura.

Figura 8. Diagrama esquemático de las zonas presentes en una unión soldada



Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Metallurgy.

En la zona (c) se logra apreciar el cordón, el cual durante el proceso de soldadura llega a alcanzar temperaturas mucho mayores que la de fusión del metal base; aquí se observa un grano alargado hacia el interior debido a la alta velocidad y la dirección del enfriamiento a los que fue sometida la pieza. La ZAT \*, representada por (b), muestra un tamaño de grano mayor al del resto de la pieza ya que fue sometida a tiempos y temperaturas suficientemente altos como para hacer que los granos aumentaran su tamaño. La zona (a) corresponde al metal base, es decir, la parte original de la pieza final; aquí el grano no sufre ningún cambio aparente debido a que no alcanzó temperaturas suficientemente altas, y por lo tanto continúa con su forma original, que en este caso es alargado debido a un previo proceso de laminado. Entre el metal base y la ZAT se encuentra el límite de las zonas con un menor tamaño de grano, lo que significa que sus propiedades mecánicas serán diferentes.

---

\* Acrónimo para Zona Afectada Térmicamente

Actualmente es posible hallar en la industria el empleo de distintas clases de procesos para soldar piezas metálicas; de forma general estos se pueden clasificar según el tipo de energía que requieren para generar el calor suficiente y así lograr la unión solicitada. Algunos de estos procesos son los eléctricos, como aquellos que funden por resistencia al hacer pasar una corriente de gran magnitud a través de las piezas, o aquellos que funden gracias a un arco generado por la inducción de una diferencia de potencial; de igual manera están aquellos que emplean el calor generado por una llama que es producida gracias a las reacciones químicas controladas entre algunos gases volátiles, entre otros muchos otros tipos de procesos de soldadura.

Entre los procesos que emplean energía eléctrica se encuentra la soldadura por arco con electrodo revestido o SMAW (**Shield Metal Arc Welding**); en este tipo de soldadura el metal de aporte empleado consiste en una varilla metálica conocida como electrodo que se encuentra revestida por un material fundente.

Un electrodo del proceso SMAW se consume cuando su extremo metálico desnudo hace contacto con la pieza que será soldada formando así un arco eléctrico que genera una temperatura de fusión de hasta unos 5500°C <sup>(4)</sup>; al mismo tiempo el fundente se vaporiza formando un gas que rodea el baño metálico para protegerlo del contacto con el aire evitando de esta forma su oxidación y la introducción del hidrogeno a la unión soldada.

Después de unos segundos el fundente remanente se solidifica nuevamente sobre la unión metálica recién creada dando lugar a la formación de una capa externa y gruesa de un material de apariencia cerámica conocida como escoria, la cual será removida posteriormente.

---

<sup>4</sup> GOMEZ MORENO, Orlando José. Metalurgia de la soldadura. Universidad Industrial de Santander, 1989. p 8.

A continuación en la figura 9 se puede observar el momento en que se aplica una soldadura.

Figura 9. Imagen fotográfica de la aplicación de una soldadura eléctrica



Cuando este proceso de unión entre los dos materiales metálicos no se lleva a cabo correctamente, se generan interrupciones en su estructura típica, mejor conocidas como discontinuidades las cuales dependiendo de la severidad de sus condiciones llegarán a ser consideradas como defectos; puede decirse que si en una pieza se encuentra presente un cambio de sección, éste se considera como una discontinuidad que no representa ningún tipo de riesgo para la pieza ya que hace parte de su diseño original, por otro lado, la presencia de discontinuidades como las inclusiones de burbujas de gas o de material de distinta composición al metal base podrían ser catalogadas como defectos sí se considera que llegarán a colocar en riesgo el rendimiento de la pieza.

Durante los procesos de soldadura se pueden llegar a presentar una gran variedad de defectos debidos igualmente a una gran variedad de razones; para visualizar la apariencia de algunas de éstos, a continuación se presenta un breve resumen de los más comunes (ver cuadro 1).

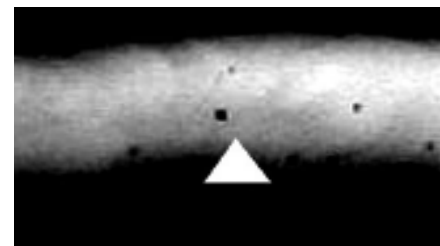
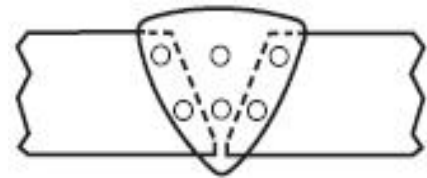
El conocimiento acerca de los distintos tipos de discontinuidades que se asocian a los procesos de soldadura y las habilidades de interpretar y discernir entre uno de mayor o menor relevancia en una pieza, son elementos necesarios que deben ser parte de los inspectores calificados.<sup>(5)</sup>

Cuadro 1. Descripción y apariencia de algunos defectos de soldadura

---

### **POROSIDADES**

Son gases que quedan atrapados durante la solidificación de la soldadura. Pueden deberse a la falta de limpieza o la presencia de óxidos y humedad sobre la superficie del metal base y/o los electrodos. Se observan como pequeñas burbujas o puntos muy oscuros ubicados al interior de la union soldada y distribuidos aleatoriamente a lo largo de ésta.



---

I

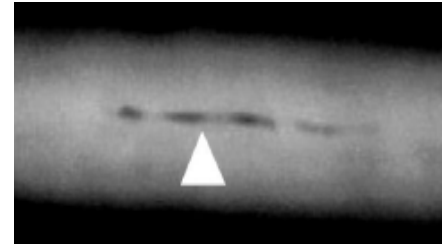
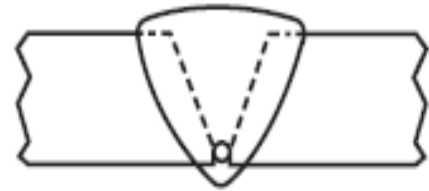
---

<sup>5</sup> AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding inspection. Op. cit., p. vi

---

### INCLUSIONES DE ESCORIA

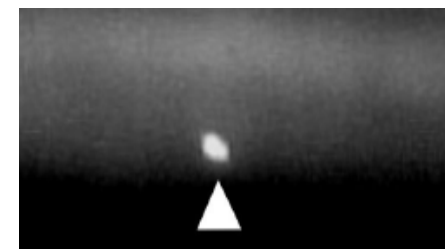
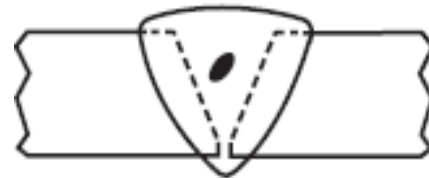
Son óxidos o cualquier otro tipo de sólido no metálico atrapado en la soldadura. Usualmente se forman por la escoria presente de una soldadura anterior que no se logró fundir y eliminar nuevamente. Se observan como indicaciones oscuras debido a su menor densidad, con formas irregulares que en ocasiones pueden seguir la línea central de la soldadura.



---

### INCLUSIONES DE TUNGSTENO

Son pequeñas gotas de tungsteno, metal de gran densidad y por lo tanto de una alta capacidad de absorción de radiación, depositadas accidentalmente en el baño metálico debido al contacto con el electrodo durante los procesos de soldadura conocidos como **Tungsten Inert Gas**. Se observa como un punto blanco muy brillante en la soldadura, el cual puede tener cualquier forma.

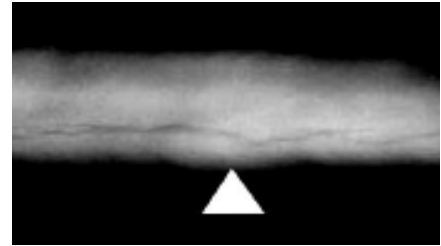
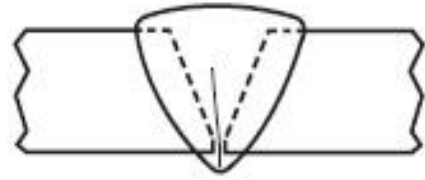


---

## GRIETAS LONGITUDINALES

Se encuentran en la unión soldada a lo largo de la línea central de ésta.

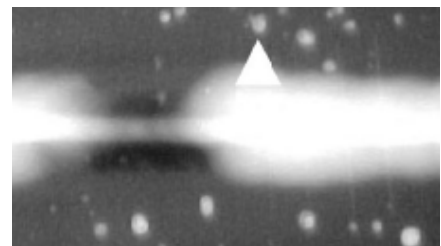
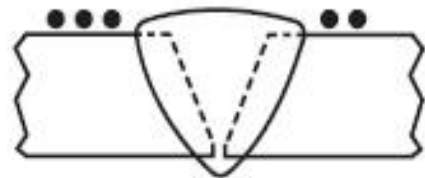
Se deben a la aplicación de esfuerzos que superan la resistencia del material, como deformaciones durante cambios bruscos de temperatura o por hidrogeno atómico atrapado al interior de la estructura. Se observan como líneas ondulantes oscuras y ramificadas, paralelas al eje central de la unión soldada.



---

## CHISPORROTEO

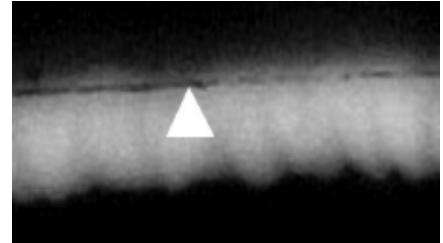
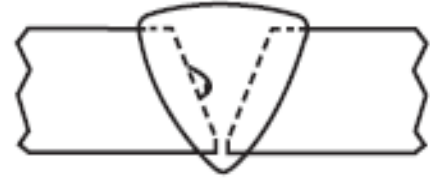
Son pequeñas gotas de metal fundido que saltan y se solidifican sobre la superficie del metal base y/o sobre la soldadura. Se pueden producir por una mala selección de las condiciones de operación como la corriente, el voltaje y/o el electrodo de trabajo. Se observa como pequeños puntos blancos dispersos irregularmente sobre la pieza soldada.



---

### **FALTA DE FUSIÓN**

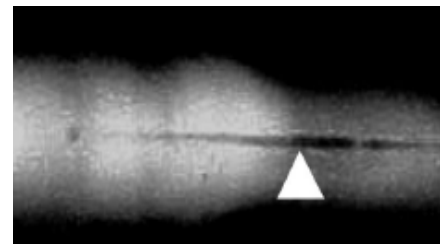
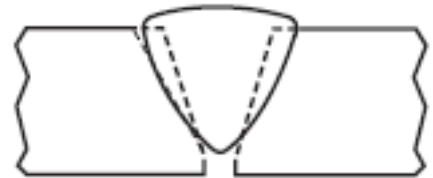
Es la falla al momento de unir la soldadura con las paredes del metal base, y puede deberse a una junta incorrecta o a la presencia de escorias en la superficie causada por una mala disolución de éstas. Se manifiesta como una línea oscura alargada que a diferencia de las líneas de escoria que pueden ser curvas, la de falta de fusión es recta y alineada longitudinalmente.



---

### **FALTA DE PENETRACIÓN**

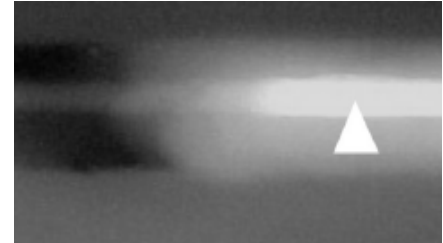
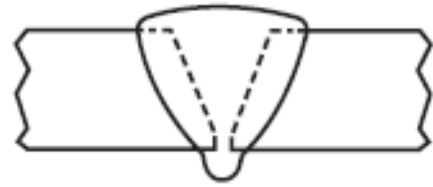
Describe la falla del metal de aporte y el metal base para rellenar correctamente la raíz de la junta. Puede deberse a una mala preparación de ésta lo que no permite que el cordón penetre correctamente. Este defecto se manifiesta en forma de líneas rectas oscuras continuas o intermitentes a lo largo del eje central de la unión soldada.



---

### **EXCESO DE PENETRACIÓN**

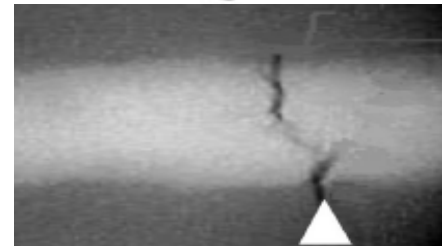
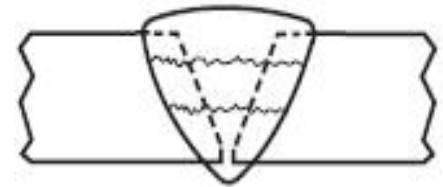
Es una zona de mayor densidad en la soldadura ya que se presenta un exceso de metal de aporte en la raíz de ésta, debido talvez a una mala preparación de la junta o a la falta de habilidad del soldador. Se observa como una amplia zona brillante sobrepuesta a la línea central de la soldadura pero aún más ancha que ésta.



---

### **GRIETAS TRANSVERSALES**

Son grietas que cruzan perpendicularmente el eje central de la soldadura y que en ocasiones su longitud alcanza la zona afectada térmicamente. Se observan como líneas ondulantes oscuras y finas, pueden ser discontinuas y con ramificaciones dependiendo de la severidad de éstas.

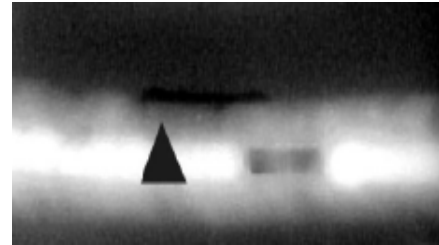


---

## SOCAVADO EXTERNO

Son surcos o mordeduras presentes en la superficie del metal base que corren junto a la soldadura.

Se producen por una fusión excesiva, tal vez por el excesivo aumento de la corriente. Se observa como líneas más oscuras e irregulares que corren a un costado de la unión soldada.

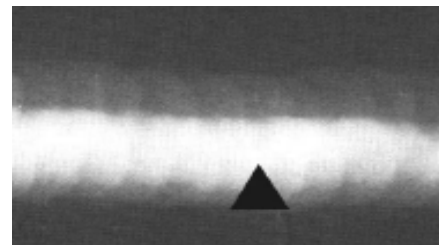
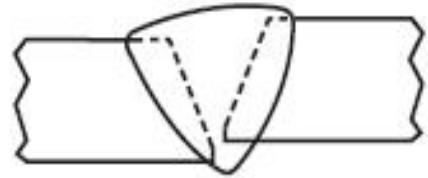


---

## DESLIZAMIENTO

Es un desnivel que se produce cuando las placas no se encuentran correctamente alineadas en un mismo plano antes que se deposite la soldadura.

Para evitar esto se debe tener cuidado durante preparación de la pieza. Se observa como un cambio brusco de densidad radiográfica sobre la unión soldada. La línea de mayor contraste corre sobre la raíz de la junta.



---

Fuentes: AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding inspection 2<sup>nd</sup> ed.  
EAST KODAK COMPANY. Non Destructive Testing Images.  
SONASPECTION. Weld Flaw Radiographs & Product Showcase.  
Conjunto de radiografías del IIW \*.  
GOMEZ MORENO, Orlando José. Soldadura de Metales.

---

\* Acrónimo en inglés para International Institute of Welding.

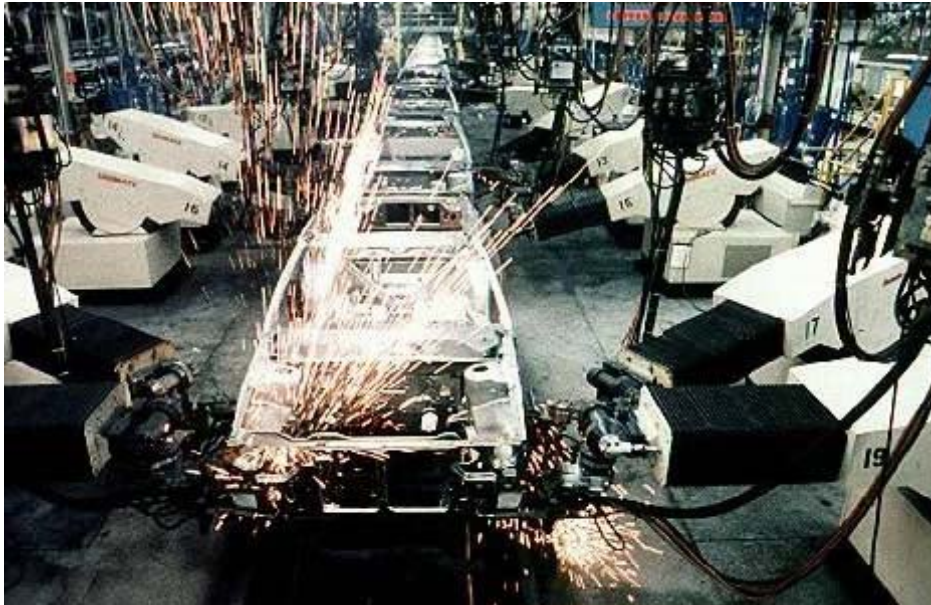
### 1.3 LAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

En la actualidad el empleo de **software** especializado desempeña un papel cada vez más importante en de nuestra sociedad, y día a día nos volvemos más dependientes de este tipo de servicio; ésto no es ninguna sorpresa ya que las computadoras cuentan con una gran variedad de características que las hacen llamativas a los ojos de la industria. Su enorme capacidad para almacenar información y de igual manera compartirla con cualquier lugar en mundo, su habilidad de realizar millones de operaciones en segundos, su cada vez mayor facilidad de adquisición y su bajo costo de operación y mantenimiento las convierten en unas máquinas de trabajo muy productivas; aún con todas las habilidades que una computadora posee, ésta es completamente inútil si no hace exactamente las tareas que se requieren.

En una fábrica automatizada que ensambla automóviles se involucran distintos y variados procesos realizados por los brazos robóticos que funcionan allí. Estos brazos son los encargados de mover, colocar, soldar, retirar, pulir, etc., la mayoría de las partes de los vehículos que se encuentran en construcción, pero lo realmente asombroso es que en estas líneas de producción pueden llegar a funcionar decenas de estos brazos que trabajan independientemente el uno del otro y aún así siguiendo ordenes específicas que les indican cuáles deben ser cada uno de sus movimiento, al involucrar variables como coordenadas espaciales y variaciones de tiempo que hay entre un evento y otro; este proceso de ensamblaje se puede observar en acción en la figura 10.

Para que este proceso de ensamblaje se lleve a cabo, cada brazo robótico debe actuar según una serie de indicaciones que son enviadas desde una computadora; esta computadora no decide por si sola ya que es un operador el responsable de indicarle lo que debe hacer al emplear un lenguaje común con el que ambos se pueden comunicar.

Figura 10. Línea automatizada de ensamblaje de automóviles



El proceso en el que se escriben estas ordenes, comúnmente llamadas código fuente y que determinarán el comportamiento de una computadora, se conoce como programación de computadores y es una tarea realizada por un programador, quien es aquella persona que crea el código fuente y que requiere de pericia en diferentes temas incluyendo las áreas de aplicación del programa y el conocimiento de los algoritmos necesarios para generar dicho comportamiento deseado. <sup>(6)</sup>

En la actualidad hay una gran variedad de lenguajes de programación y cada año se crean aún mas, por lo que la elección entre uno u otro depende principalmente de qué clase de trabajo se requiere realizar. El cuadro 2 presenta una tabla con ciertas características de algunos de los lenguajes más utilizados.

---

<sup>6</sup> WALES, Jimmy y SANGER, Larry. WIKIPEDIA the free encyclopedia. [online] URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Programming\\_languages](http://en.wikipedia.org/wiki/Programming_languages)> (consultado julio 15 2006)

La popularidad de un lenguaje puede medirse por su volumen en ventas y la calidad de los programas que se desarrollan en éstos está en función de sus requerimientos, los cuales pueden depender de su legibilidad y su tolerancia a las fallas, es decir, su confiabilidad; en otras palabras un programa se debe comportar de la manera que se requiere, o mejor aún, de la forma como debe, por lo tanto no se puede esperar que un programa funcione si su programador no conoce cuál debe ser su comportamiento.

Cuadro 2. Características y usos de algunos lenguajes de programación

LENGUAJE	CARACTERISTICAS
<b>PHP</b> <i>Hypertext  Preprocessor</i>	Es un lenguaje que presenta gran fluidez y rapidez en sus códigos; su principal aplicación es el desarrollo de aplicaciones tipo Web.
<b>MATLAB</b> <i>Matriz  Laboratory</i>	Lenguaje de programación que permite la fácil manipulación de matrices, funciones de gráficos y datos, implementación de algoritmos, creación de interfaces gráficas e interacción con otros lenguajes.
<b>JavaScript</b>	Se emplea para crear aplicaciones para Internet. Su fácil aprendizaje y manejo lo hace un lenguaje de gran demanda.
<b>Perl</b>	Perl es la alternativa más popular a PHP, seguramente porque es el lenguaje más antiguo.
<b>C</b>	Aprender C es básico ya que se están aprendiendo conceptos básicos de lenguajes como Java; se emplea para crear todo tipo de aplicaciones.

Fuente: WIKIPEDIA the free Encyclopedia. [Online]. URL: <<http://en.wikipedia.org>>

Para controlar el comportamiento de una máquina, particularmente el de una computadora, se emplea un lenguaje que es artificial pero que al igual que el humano se define a través del uso de reglas de sintáctica y de semántica para determinar la estructura y el significado respectivamente.

Un propósito notable de los lenguajes de programación es brindar las instrucciones que debe seguir un computador y es por esto que se diferencian principalmente de las expresiones humanas ya que requieren de un mayor grado de precisión y unidad. Cuando se usa el lenguaje natural para la comunicación con otras personas se puede ser ambiguo y cometer algunos errores y aún así se sabe que se es entendido. Sin embargo las computadoras hacen exactamente lo que se les dice que hagan y no entienden un código o una orden donde el programador 'quiso decir'; por eso, para eliminar cualquier mal entendido las instrucciones deben ser dadas de tal forma que el computador las siga en un orden establecido, y para esto se emplean los algoritmos.

En matemáticas, computación, lingüística y disciplinas relacionadas, un algoritmo es un procedimiento (una serie de instrucciones bien definidas) empleado para llevar a cabo alguna tarea que se encuentra en un estado inicial y que terminará en un estado final preestablecido. Los algoritmos son esenciales para la forma como las computadoras procesan la información, ya que un programa es en esencia un algoritmo que le dice a la computadora qué paso específico debe realizar para llevar a cabo una tarea específica.<sup>(7)</sup>

Hasta este punto se tiene que una computadora cuenta con la capacidad de realizar tareas con enorme eficiencia pero aún así no son completamente autónomas ya que requieren de las instrucciones que les indican los programadores.

---

<sup>7</sup> Ibid., URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm>> (consulta 25 julio 2006)

Una de las principales aplicaciones de las computadoras, y que está tomando cada vez mayor fuerza, es la simulación de los procesos; esta simulación consiste en crear, empleando los lenguajes de programación, entornos específicos muy similares a los reales donde el usuario interactúe con éstos y así sienta que se encuentra realizando una tarea cotidiana. <sup>(8)</sup>

El ejemplo más común de estos entornos virtuales son los simuladores de vuelo, en donde un aspirante a piloto se encuentra dentro de una cabina en tierra dotada físicamente con todos los elementos que encontraría en un avión real, o por lo menos en el tipo de avión para el que está aplicando (ver figura 11). Frente a él, simulando el horizonte, se encuentra una pantalla que responde de la manera más real a las órdenes que el piloto introduce usando los controles a su disposición; con estas simulaciones la empresa contratante minimiza los costos y los riesgos de emplear los equipos reales para el entrenamiento, y así cuando el aspirante esté listo podrá volar un avión real por primera vez contando ya con cierta experiencia. <sup>(9)</sup>

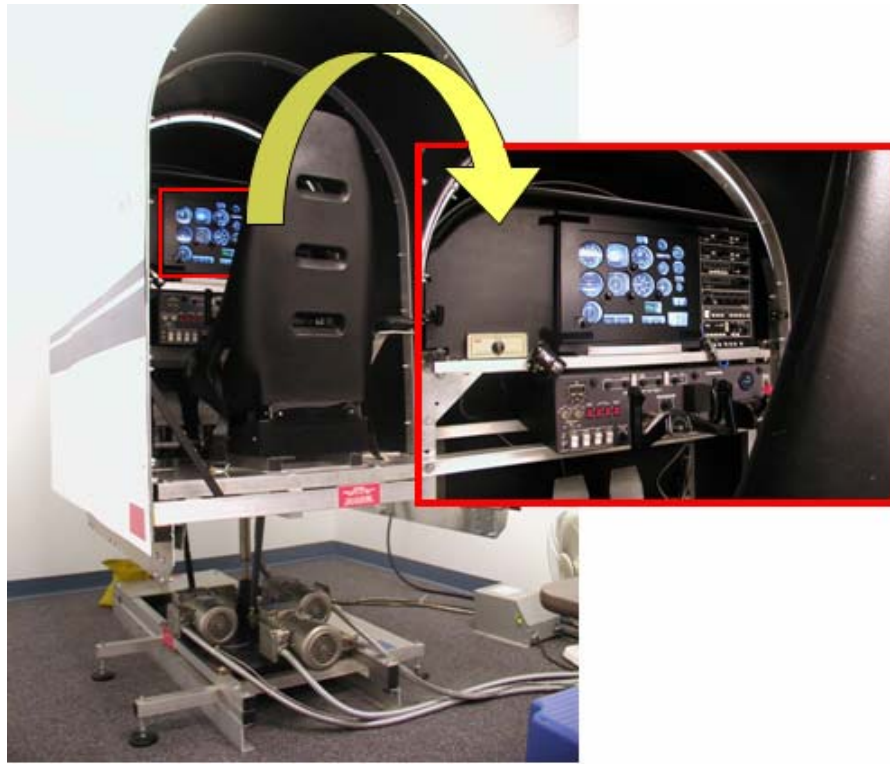
Los simuladores también se están aplicando en la medicina, en el control del flujo de tránsito de las grandes ciudades, en la predicción del clima, en el diseño de las salidas de emergencia para grandes instalaciones, en el comportamiento de materiales a ciertas condiciones, etc.; algo que se debe tener muy claro acerca de los simuladores y su concepto, es que estos no pretenden reemplazar a los procesos reales, simplemente brindan capacitación, preparación y predicción de algunas situaciones cotidianas de las que se quiere estudiar y aprender para mejorar.

---

<sup>8</sup> Ibid., URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Computer\\_simulations](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_simulations)> (consulta 20 julio 2006)

<sup>9</sup> HARRISBURG JET CENTER, INC. UFS-Aero: Flight Training Device. [Online] URL: <[http://www.harrisburgjetcenter.com/hjc/flight\\_school/simulator/simulator.htm](http://www.harrisburgjetcenter.com/hjc/flight_school/simulator/simulator.htm)> (consultado agosto 2006)

Figura 11. Imagen de una cabina para la simulación de vuelo



Fuente: HARRISBURG JET CENTER. URL: <<http://www.harrisburgjetcenter.com>>

Otra forma muy útil de mejorar la eficiencia de los procesos es observando su comportamiento, así de esta manera será posible predecir cualquier cambio y por consiguiente realizar las correcciones respectivas.

Debido a que el volumen y la complejidad de los resultados obtenidos a partir de las investigaciones y de los mismos procesos crece con el incremento de las fuentes, hallar la forma de representar estos resultados de una manera más intuitiva se convierte en una tarea indispensable.

Patrick Marchand y O. Thomas Holland plantean una interesante respuesta a la pregunta, porqué es importante la visualización de datos y resultados:

En su más pura representación la ciencia es la búsqueda de la verdad, sin embargo en ocasiones algunas de esas verdades no son tan fáciles de descubrir y en la mayoría de las veces ni siquiera se sabe cómo formular la pregunta apropiada para llegar a ella.

Si consideramos el hecho que muchos fenómenos naturales son demasiado rápidos, o demasiado lentos, o demasiado grandes o demasiado pequeños para ser estudiados mediante la observación directa o con técnicas convencionales de laboratorio, entonces cómo se puede lograr ver lo oculto?.

Es importante buscar la manera más conveniente de visualizar estos resultados de tal forma que la mente humana pueda entenderlos y así logre formular la pregunta correcta que lo lleve a un nuevo descubrimiento o a un mejor entendimiento de algún fenómeno.

La visualización de resultados nos brinda la ayuda necesaria para identificar y enfatizar áreas de interés como aquellas donde ocurre un evento significativo o donde los resultados exhiben un comportamiento inusual; también ayuda a que nuestros pensamientos, conclusiones, observaciones o puntos de vista puedan ser llevados a otras personas de una manera más rápida e intuitiva.

Una buena visualización debe permitir llevar una gran cantidad de datos o conceptos difíciles de entender a cantidades y términos

fácilmente entendibles, ya que se debe recordar que es por comparación que se descubre lo que no conocemos.<sup>(10)</sup>

Un ejemplo común de los beneficios de la visualización de resultados es el empleo de los termogramas como el de la figura 12, los cuales representan mediante diferentes colores los gradientes de temperatura presentes en un cuerpo humano, y que posteriormente podrán ser analizados por un médico especializado para determinar, por ejemplo, si el paciente sufre de alguna enfermedad de circulación en la sangre.

Figura 12. Termograma de un rostro humano



Cuando se hace mención de los resultados obtenidos a partir de una investigación se habla generalmente de información numérica, como las tablas de resultados, que por si sola no brinda ninguna respuesta evidente; de aquí se tiene entonces

---

<sup>10</sup> MARCHAND, Patrick y HOLLAND, O. Thomas. Graphics and GUI's with MATLAB 7.0. 3a ed. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 2003. p 6.

que la mejor manera de representar y hacer ver estos comportamientos es transformarla en información gráfica la cual es mucho más comprensible y útil para el investigador o el ingeniero.

El empleo de gráficas en dos y tres dimensiones, los diagramas de torta, las barras porcentuales, los mapas de contorno, y todo aquello que conlleve a la creación de imágenes a partir de cualquier tipo de información numérica, son formas comunes para facilitar el entendimiento de los fenómenos estudiados haciendo, por lo tanto, más agradable la etapa de investigación y el proceso de aprendizaje de aquellos que así lo desean.

#### **1.4 VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES CON MATLAB**

Como se mencionó anteriormente, una de las principales características de las computadoras es su capacidad de presentar de manera visual todo tipo de imágenes; la forma como esto se lleva a cabo es gracias a la proyección de un gran conjunto de pequeños puntos llamados **pixeles**<sup>\*</sup>, donde cada uno de estos elementos representa un color individual de la imagen y que ordenados de forma coherente crean la apariencia de ésta

A partir del concepto anterior se puede señalar que para dos imágenes del mismo tamaño, aquella que contenga más de estos **pixeles** logrará representar una mayor variedad de colores y por lo tanto se proyectará con una mayor definición y calidad, por otro lado la imagen que presenta una cantidad insuficiente de estos elementos se observará 'pixelada', como popularmente se conoce. Este concepto se ilustra en la figura 13.

---

<sup>\*</sup> Acrónimo en inglés para Picture Elements

Figura 13. Imagen que revela la presencia de los **píxeles**



La estructura básica del manejo de datos en MATLAB se hace empleando arreglos de elementos en forma matricial; esta característica lo hace naturalmente adecuado para la representación de información gráfica a partir de valores numéricos ordenados como un conjunto de datos que representan colores o intensidades de colores.

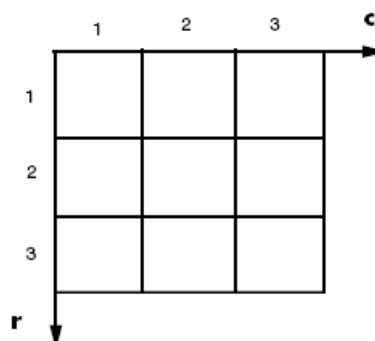
MATLAB almacena muchas de sus imágenes en forma de arreglos numéricos de 2 dimensiones, es decir, matrices, donde cada elemento de esta matriz corresponde a un único **pixel** de la imagen generada. Por lo tanto si una imagen está compuesta por 200 filas y 300 columnas de diferentes puntos coloreados, ésta se podría almacenar en una matriz cuya dimensión puede ser representada por la notación 200x300.

Algunos de los tipos de imágenes que se pueden procesar en MATLAB, como por ejemplo las imágenes **truecolors** o de color real, requieren de arreglos numéricos en 3 dimensiones en donde cada plano representa la intensidad de los **pixel** de un color en particular y que combinados forman así más colores. Ésta convención hace que trabajar con imágenes en MATLAB sea similar a trabajar con cualquier otro tipo de arreglo numérico, lo que convierte a MATLAB en una herramienta muy poderosa para el procesamiento y visualización de todo tipo de imágenes.

En MATLAB la ubicación de un elemento dentro de una imagen se puede expresar de varias formas dependiendo del contexto; las principales son las coordenadas espaciales y las coordenadas por **pixel**.

Para el desarrollo del presente trabajo se eligió el sistema de coordenadas por **pixel** debido a que es el método mas conveniente a la hora de expresar posiciones dentro de una imagen; en este sistema de coordenadas la imagen se trabaja como si fuese una malla de elementos discretos que se ordenan de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Ver figura 14.

Figura 14. Representación del sistema de coordenadas por píxel de MATLAB



En este sistema de coordenadas el primer componente **r** (**row**) aumenta hacia abajo, mientras que el segundo componente **c** (**column**) aumenta hacia la derecha.

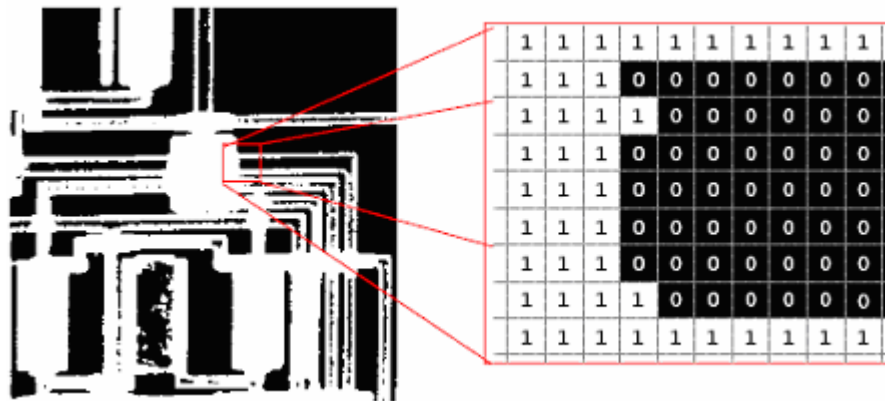
En las coordenadas por **pixel** la posición de los elementos dentro de la imagen es representada por valores enteros que están en un rango que va desde uno hasta el tamaño de la fila ( $r$ ) o hasta el tamaño de la columna ( $c$ ). Aquí se puede observar una correspondencia directa entre este sistema y las coordenadas que MATLAB usa para representar sus datos, y es esta correspondencia la que relaciona los datos pertenecientes a la matriz-imagen y la forma en que esta imagen es presentada. Por ejemplo, si se tiene una imagen de cierto tamaño, el **pixel** ubicado en la fila 15 de la segunda columna se encontrará almacenado dentro de la matriz-imagen como un elemento ubicado en la posición [15,2] al que le pertenece un único valor que representa un único punto coloreado de la imagen.

Para el procesamiento de imágenes MATLAB define cuatro tipos, y dependiendo de cuál se elija para trabajar es que se establece la forma como MATLAB interpretará y procesará los valores que hacen parte de los elementos de la matriz-imagen.

El primer tipo de imagen que se puede trabajar en MATLAB es la Imagen Binaria o **Binary Image**; para estas imágenes el **pixel** asume uno de dos posibles valores numéricos: uno o cero, en donde el primero representa el color blanco y el segundo representa el color negro dentro de un arreglo numérico o matriz de dos dimensiones. Ver figura 15.

El segundo tipo de imagen que se puede visualizar en MATLAB es la imagen por índices o **Indexed Image**; este tipo de imágenes se representan por un arreglo numérico y una matriz que contiene un mapa de colores. Los valores de los elementos del arreglo numérico son índices directos que representan una ubicación dentro del mapa de colores que tiene un tamaño de  $m$  filas por 3 columnas, es decir  $m \times 3$ , donde cada elemento de este mapa contiene un valor en un rango entre cero y uno.

Figura 15. Correspondencia entre una imagen tipo Binaria y sus elementos



Fuente: THE MATHWORKS INC. Image Processing Toolbox user's guide 5th ed

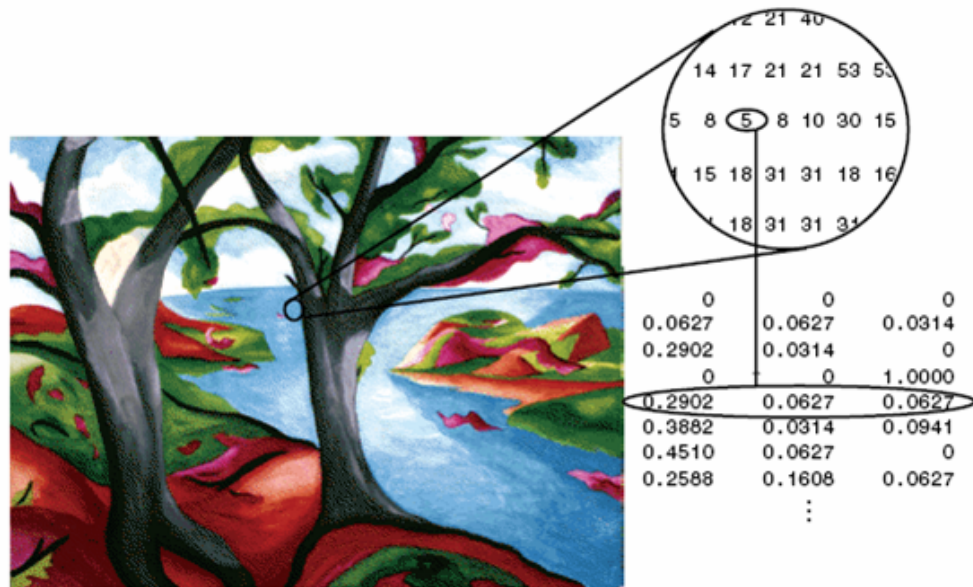
Cada fila dentro del mapa de colores describe las intensidades que representan los colores rojo, verde y azul de un único píxel de la imagen; por lo tanto una imagen por índices usa una relación directa entre el valor del **pixel** y los valores en el mapa. El color de cada **pixel** de la imagen se determina usando el valor correspondiente del arreglo como una guía de posición dentro del mapa.

Cada vez que se crea una imagen por índices, está se genera directamente con su mapa de colores; sin este mapa la imagen no podría ser representada, por otro lado, una imagen no necesariamente necesita un único mapa de colores para proyectarse, ya que MATLAB cuenta con una gran variedad de éstos, y su empleo depende del tipo de trabajo que se esta realizando y del tipo de imagen que se desea visualizar.

Para visualizar el concepto de imagen por índices, se tiene la figura 16 donde se observa la información que hace parte del arreglo numérico para cierta región y su respectivo mapa de colores; el número cinco señalado indica que el píxel que se encuentra ubicado en esta posición está representado por los colores que se forman a combinar las intensidades preestablecidas del rojo, el verde y el azul que

se encuentran en el mapa de colores adjunto en la fila cinco, por lo tanto cabe mencionar que el número de filas del mapa de colores debe ser igual al máximo valor de los elementos que se encuentren dentro del arreglo numérico

Figura 16. Correspondencia entre un imagen tipo índices y sus elementos

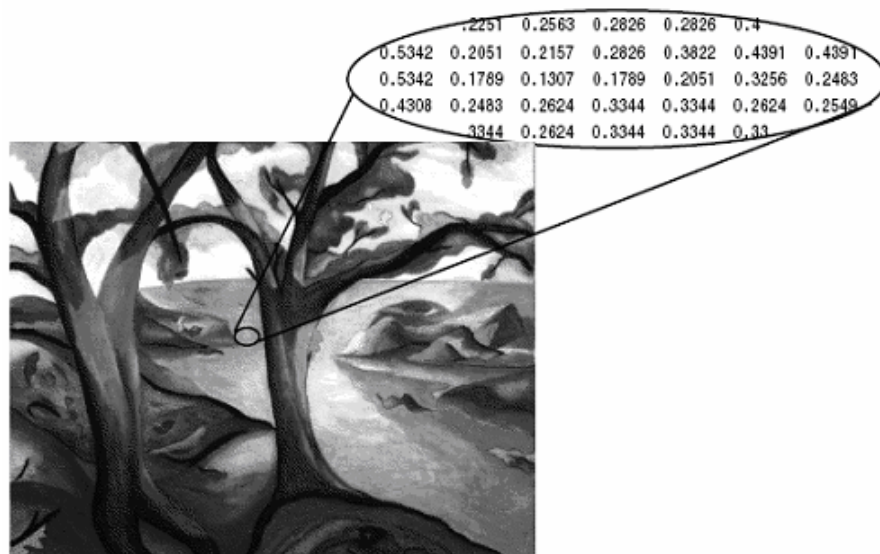


Fuente: THE MATHWORKS INC. Image Processing Toolbox user's guide 5th ed

El tercer tipo es la imagen en escala de grises o **Gray Scale Image**; este tipo de imagen consiste es una matriz cuyos elementos representan distintos niveles de gris. MATLAB almacena este tipo de imágenes como una matriz individual que no requiere de un mapa de colores ya que cada elemento de ésta corresponde a un **pixel** de la imagen.

Para este tipo de imágenes un valor de intensidad igual a cero representa el color negro y una intensidad igual a uno representa el color blanco; valores intermedios representan intensidades de gris intermedias. Ver figura 17.

Figura 17. Correspondencia entre una imagen **gray scale** y sus elementos



Fuente: THE MATHWORKS INC. Image Processing Toolbox user's guide 5th ed

Por último se tiene la Imagen de color vivo o **Truecolor Image**. En este tipo de imagen el color de cada **pixel** se especifica con tres valores: uno para la intensidad del rojo, uno para la del verde y otro para la del azul. MATLAB almacena este tipo de imágenes en un arreglo numérico de tres dimensiones donde cada dimensión define la intensidad de cada uno de estos tres colores para formar un color individual en un punto dentro de la imagen. Ver figura 18.

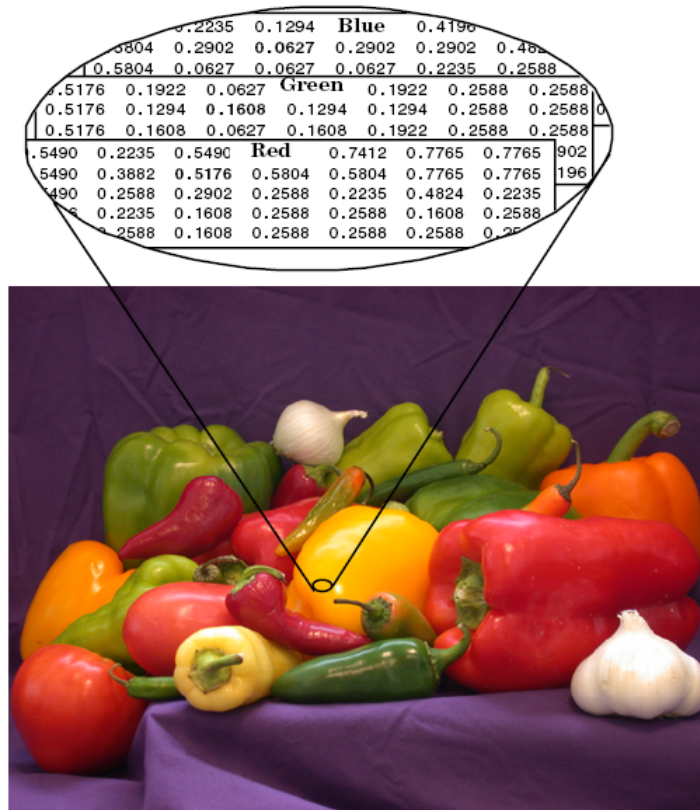
Este tipo de imágenes tampoco requieren de un mapa de colores, por otro lado, el formato en el que se guarda tiene un alcance potencial de presentar 16 millones de colores dándole la capacidad de representar imágenes de la vida real con una alta definición; de ahí su nombre de imagen de colores vivos.

### 1.5 LAS TIC's COMO HERRAMIENTA PARA LA EDUCACIÓN

Aunque aún no existe una definición precisa y uniforme de este término se puede decir que las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones se refieren a las

tecnologías que se necesitan para la gestión y transformación de información, y muy en particular, del uso de las computadoras y del **software** especializado para crear, modificar, almacenar y recuperar toda esa información.<sup>(11)</sup>

Figura 18. Correspondencia entre una imagen tipo RGB y sus elementos



Fuente: THE MATHWORKS INC. Image Processing Toolbox user's guide 5th ed

El uso de las TIC's se puede observar diariamente a nuestro alrededor, y cada uno de nosotros las emplea directa o indirectamente; ejemplos sencillos de ellas pueden ser las transacciones de dinero empleando los cajeros automáticos, la televisión, la radio y principalmente el Internet.

<sup>11</sup> WALES, Jimmy y SANGER, Larry. Op.cit., [Online]. URL: <<http://es.wikipedia.org/wiki/TIC>> (consulta 20 febrero 2007)

La revolución tecnológica y de intercambio de información que vive la humanidad actualmente es debida en buena parte a las TIC's. Los grandes cambios que caracterizan esencialmente esta nueva sociedad son: la generalización del uso de las tecnologías, las redes de comunicación, el rápido desenvolvimiento tecnológico y científico, y la globalización de la información. <sup>(12)</sup>

Lo anterior le brinda a las TIC's suficientes razones para que se empleen en todos los niveles de educación. El **X-Ray Simulator o XRSIM**, desarrollado por el centro de evaluación no destructiva de la universidad estatal de Iowa en los Estados Unidos <sup>(13)</sup>, que es un programa que simula la inspección radiográfica usando un modelo de diseño asistido por computador para producir imágenes radiográficas físicamente precisas fue hecho con un enfoque en aquella parte referente a la formación universitaria, más concretamente la de ingenieros, aunque en general este tipo de herramientas pueden ser aplicadas para cualquier grado de enseñanza.

En términos generales se puede decir que todos los tipos de aplicaciones educativas hechas con las TIC's son medios y no fines. Es decir, son herramientas y materiales de construcción que facilitan el aprendizaje, el desarrollo de habilidades y distintas formas de aprender así como estilos y ritmos de aquellos que las emplean; en lo que se refiere estrictamente a la enseñanza, las nuevas tecnologías incorporan importantes ventajas al proceso educativo, algunas de las más importantes se presentan a continuación:

---

<sup>12</sup> CONFERENCIA DE RECTORES DE LAS UNIVERSIDADES ESPAÑOLAS (CRUE). Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el Sistema Universitario Español. [online]. Madrid: CRUE, 2004. p.14. URL: <<http://www.crue.org>> (consulta 12 febrero 2007)

<sup>13</sup> NDT RESOURCE CENTER, X ray inspection simulation. [online] URL:<<http://www.ndt-d.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/AdvancedTechniques/xrsim.htm>>

- Reducen las limitaciones de espacio y de tiempo permitiendo la aplicación de un modelo de aprendizaje más centrado en el estudiante, quién a su vez puede organizar de mejor forma buena parte de su tiempo.
- Permiten el ahorro de costos.
- Facilitan al educador el seguimiento y la supervisión de los estudiantes <sup>(14)</sup>.

El profesor universitario ya no es el único que brinda el conocimiento aunque sigue siendo una pieza clave de su transmisión ya que el estudiante necesita, fundamentalmente, de su enseñanza, orientación y asesoramiento. Este proceso exige a su vez la preparación del propio profesor que deberá incorporar metodologías y enfoques nuevos al proceso de enseñanza y aprendizaje. <sup>(15)</sup>

A pesar de las ventajas que supone la incorporación de las TIC's en la docencia, investigación y gestión, y que fueron puestas de manifiesto en los párrafos anteriores, la implantación de las TIC's en estos ámbitos también encierra un peligro. Un funcionamiento inadecuado en momentos en que los usuarios tanto internos como externos no permiten la existencia de errores en servicios que consideran básicos, puede repercutir negativamente en la imagen de la universidad o cualquier otro tipo de centro educativo. Por lo tanto se puede decir que aunque las TIC's presenten distintas ventajas, su implementación se debe hacer bajo estrictas medidas de control para que brinden al usuario todo su potencial.

---

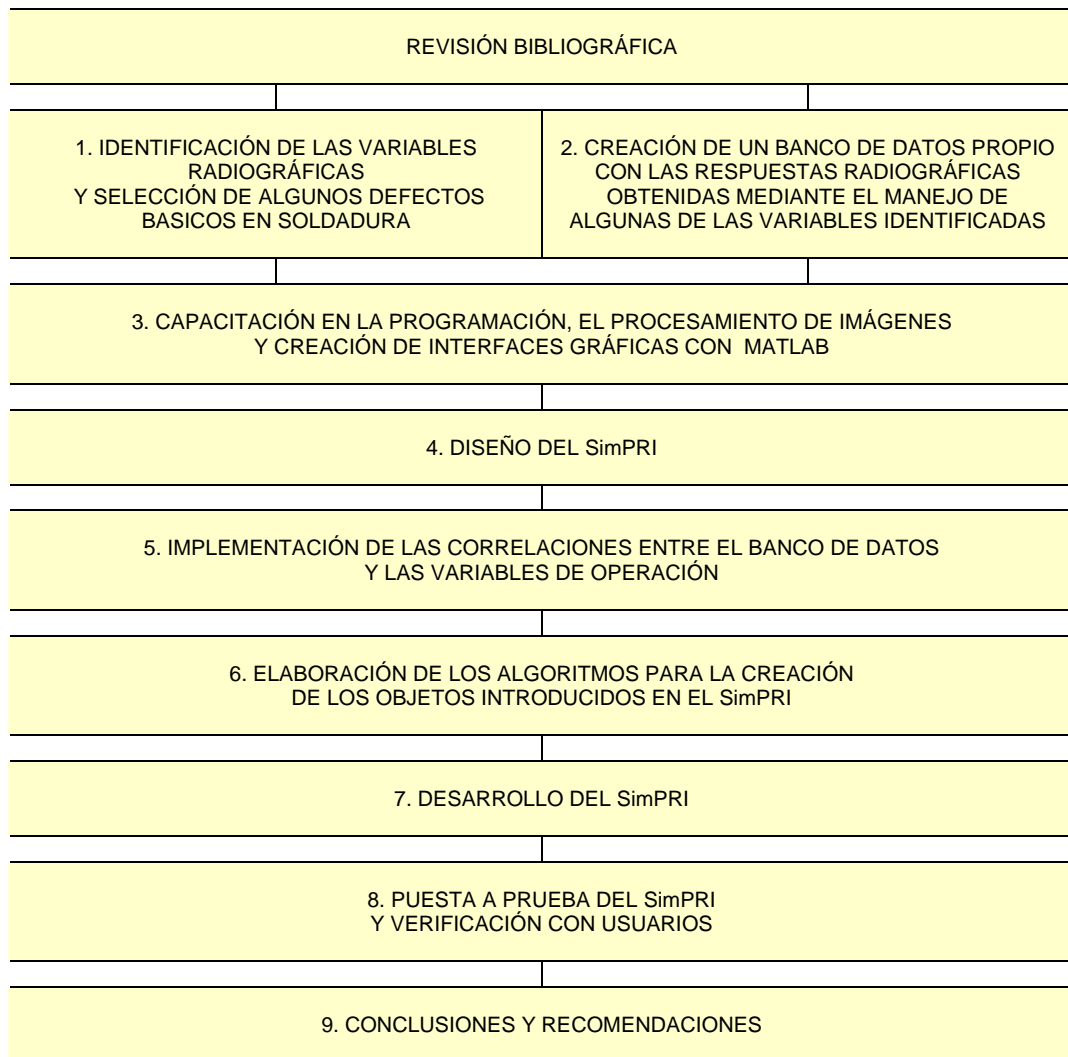
<sup>14</sup> AGUILAR, Esperanza y otros. Ambiente virtual para apoyar aprendizajes colaborativos en un modelo pedagógico fundamentados en la resolución de problemas. Escuela Colombiana de Ingenierías. Bogota. 2001. p. 25-45

<sup>15</sup> CONFERENCIA DE RECTORES DE LAS UNIVERSIDADES ESPAÑOLAS (CRUE). Op.cit., p 45

## 2. METODOLOGIA

La metodología seguida para el desarrollo del presente trabajo consta de una serie de etapas las cuales se presentan en la figura 19; posteriormente se hace una breve descripción de cada una de ellas.

Figura 19. Diagrama esquemático de la metodología de trabajo



La primera etapa del desarrollo de la herramienta SimPRI, la cual se llevó a cabo a lo largo de todo el proyecto, consistió en la consulta bibliográfica de libros especializados, artículos, información digital y paginas de Internet, tesis y manuales; de aquí se obtuvieron los conocimientos básicos necesarios para el desempeño de temas tales como la radiografía industrial con rayos X, el proceso radiográfico, la programación con MATLAB, la defectología en los procesos de soldadura y su inspección, y el empleo de las TIC's como método alternativo de apoyo para la educación y formación de ingenieros.

Con base en la revisión bibliográfica se establecieron las variables que influyen en el proceso radiográfico; la identificación práctica de algunas de éstas y de algunos defectos en soldadura se realizó observando y analizando el comportamiento de las variables que se manejan en el equipo de rayos X del laboratorio de END de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, así como también la evaluación de algunos de los defectos más comunes producidos en la soldadura y que pueden ser observados mediante el análisis de imágenes y/o radiografías realizadas en el laboratorio y/o utilizando la colección de radiografías de la IIW.

El banco de datos que se elaboró a partir de información ya disponible en el trabajo de grado ELABORACIÓN DE CARTAS DE EXPOSICIÓN RADIOGRÁFICA MEDIANTE UN PROCESO DE SIMULACIÓN ASISTIDA POR COMPUTADOR y se introdujo dentro de una matriz numérica para facilitar su manejo; esta información contiene las relaciones existentes entre las respuestas radiográficas obtenidas (densidad radiográfica o grado de ennegrecimiento) y algunas de las variables identificadas. Posteriormente este banco fue empleado para la interpolación de resultados y la implementación de correlaciones que permitieron la manipulación de todas las variables anteriormente identificadas.

La capacitación en MATLAB se logró con el apoyo de manuales especializados que presentaban el conocimiento necesario para la aplicación de este potente

lenguaje de programación como principal base para el desarrollo de la herramienta informática.

Una vez identificadas las variables radiográficas y seleccionado los defectos de soldadura que serían introducidos en el SimPRI, se realizó un bosquejo en forma general de cómo sería el proceso radiográfico y que posteriormente fue implementado como una guía para el desarrollo de la herramienta; este esquema, resumido en la figura 4 (página 8), presenta de manera integral el proceso que se llevó a cabo para simular la evaluación de la sanidad de uniones soldadas

El paso siguiente consistió en usar los conceptos aprendidos en programación con MATLAB para implementar las expresiones matemáticas necesarias que lograrían correlacionar las respuestas radiográficas obtenidas ante el manejo ya no de algunas sino de todas las variables identificadas; esta fue la base para posterior simulación del proceso radiográfico de uniones soldadas. En los capítulos siguientes se hace una descripción más detallada de todos los aspectos referentes a la creación y la forma como se opera la herramienta SimPRI.

El desarrollo de los algoritmos necesarios para la creación de las piezas y los defectos seleccionados que serán introducidos en el SimPRI son elementos conocidos como objetos ya que aunque fueron creados a partir de información numérica, serán provistos de propiedades como altura, longitud, posición, forma y cantidad, para que presenten un comportamiento y una respuesta frente a la manipulación de las variables radiográficas. Esto hace parte del concepto de la programación orientada a objetos. Andy H. Register presenta en su libro una excelente guía para el aprendizaje de esta técnica. \*

---

\* ANDY H. REGISTER. A guide to MATLAB Object-Oriented Programming. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 2007.

Una vez elaborados los objetos pieza, película radiográfica y defectos, y hechas las correlación entre las respuestas radiográficas y las variables del proceso, se prosiguió a la etapa de programación de la herramienta la cual logró hacer interactuar los objetos creados a partir de sus propiedades con las condiciones a las que se someten para que posteriormente representen de manera visual estas respuestas en forma de una imagen radiográfica. Aquí se empleó el conocimiento adquirido en la programación, procesamiento de imágenes y creación de GUI's\* con MATLAB.

Después de terminada la etapa de programación, el simulador fue puesto a prueba con distintos usuarios que simularon del proceso radiográfico de piezas soldadas. A partir de esta experiencia se realizaron mejoras en lo relacionado con algunas imágenes y procedimientos.

Con base en la información obtenida durante todo el proceso de desarrollo de la herramienta y la posterior etapa de implementación y verificación, se logró observar las ventajas reales que brinda el simulador, así como sus limitaciones y las posibles mejoras y proyecciones para trabajos potenciales en la misma línea.

---

\* Acrónimo en inglés para Graphic User Interfaces

### 3. DESARROLLO

Siguiendo la metodología indicada en el capítulo anterior (ver figura 19) se llevó a cabo el desarrollo del presente trabajo. A continuación se presentan más detalles de cada una de las etapas de este proceso.

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES RADIOGRÁFICAS Y SELECCIÓN DE ALGUNOS DEFECTOS BÁSICOS EN SOLDADURA

A partir de la revisión bibliográfica realizada se identificaron como variables esenciales del proceso radiográfico: el kilo voltaje (KV), la cantidad de radiación la cual es el producto entre la corriente y el tiempo de exposición ( $\text{mA} \cdot \text{t}$ ), el tipo de radiación, el tipo de película, la distancia entre la fuente de los rayos X y la película radiográfica, el proceso de revelado, el tipo de material a irradiar, las pantallas intensificadoras, y por último el tipo de equipo.

Para el presente trabajo se dejaron constantes: el proceso de revelado, el tipo de equipo (ANDREX de 160 KV y 5 mA), el tipo de radiación (rayos X) y el uso de pantallas intensificadoras y la distancia entre la fuente de rayos X y la película radiográfica\*.

Los defectos de soldadura seleccionados para ser incluidos en el simulador fueron: porosidades, inclusiones de tungsteno, grietas longitudinales y transversales, chisporroteo, falta de penetración, exceso de penetración y deslizamiento (Hi-Lo). Más detalles de estos y algunos otros defectos se presentan en el cuadro 1.

---

\* Los detalles completos de estas condiciones experimentales, basadas en el trabajo de Norberto Quintero y Cesar Cáceres, se presentan en el anexo A

### **3.2 CREACIÓN DE UN BANCO DE DATOS PROPIO CON LAS RESPUESTAS RADIOGRÁFICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MANEJO DE ALGUNAS DE LAS VARIABLES IDENTIFICADAS**

De la información numérica disponible se seleccionaron las tablas que presentaban la relación entre la densidad radiográfica y las variables del proceso así como los factores de corrección por cambio de variable. A partir de esta información se estableció el banco de datos propio del proyecto, hecho en forma de matrices, que posteriormente fue introducido dentro del código del simulador para crear y verificar nuevas correlaciones, las cuales permitirán no solo el manejo de un único valor de densidad radiográfica sino de un arreglo numérico de densidades (matriz), aumentando el alcance de la información original ya que permitirá transformar información numérica en gráfica.

### **3.3 CAPACITACIÓN EN LA PROGRAMACIÓN, EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES Y CREACIÓN DE INTERFACES GRÁFICAS CON MATLAB**

El desarrollo de la herramienta SimPRI se basó en la capacitación de conceptos tales como el procesamiento y la visualización de imágenes usando MATLAB así como la creación y presentación de GUI's y la programación orientada a objetos. Para ésto fue necesaria la revisión de información tanto en formato físico como digital así como la realización del respectivo entrenamiento para adquirir la destreza necesaria. Tomando como base estos conceptos se realizó el correspondiente diseño de la herramienta informática.

### **3.4 DISEÑO DEL SimPRI**

Tomando la información generada en el anterior punto 3.1 (Identificación de las variables radiográficas y selección de algunos defectos básicos en soldadura) y

empleando el diagrama de la figura 4 se realizó el diseño básico del comportamiento de la herramienta, el cual se presenta en la figura 20.

Éste diagrama presenta el diseño de la herramienta ya que muestra de manera integral, resumida y concisa el funcionamiento que se espera obtener de ésta después de su etapa de programación.

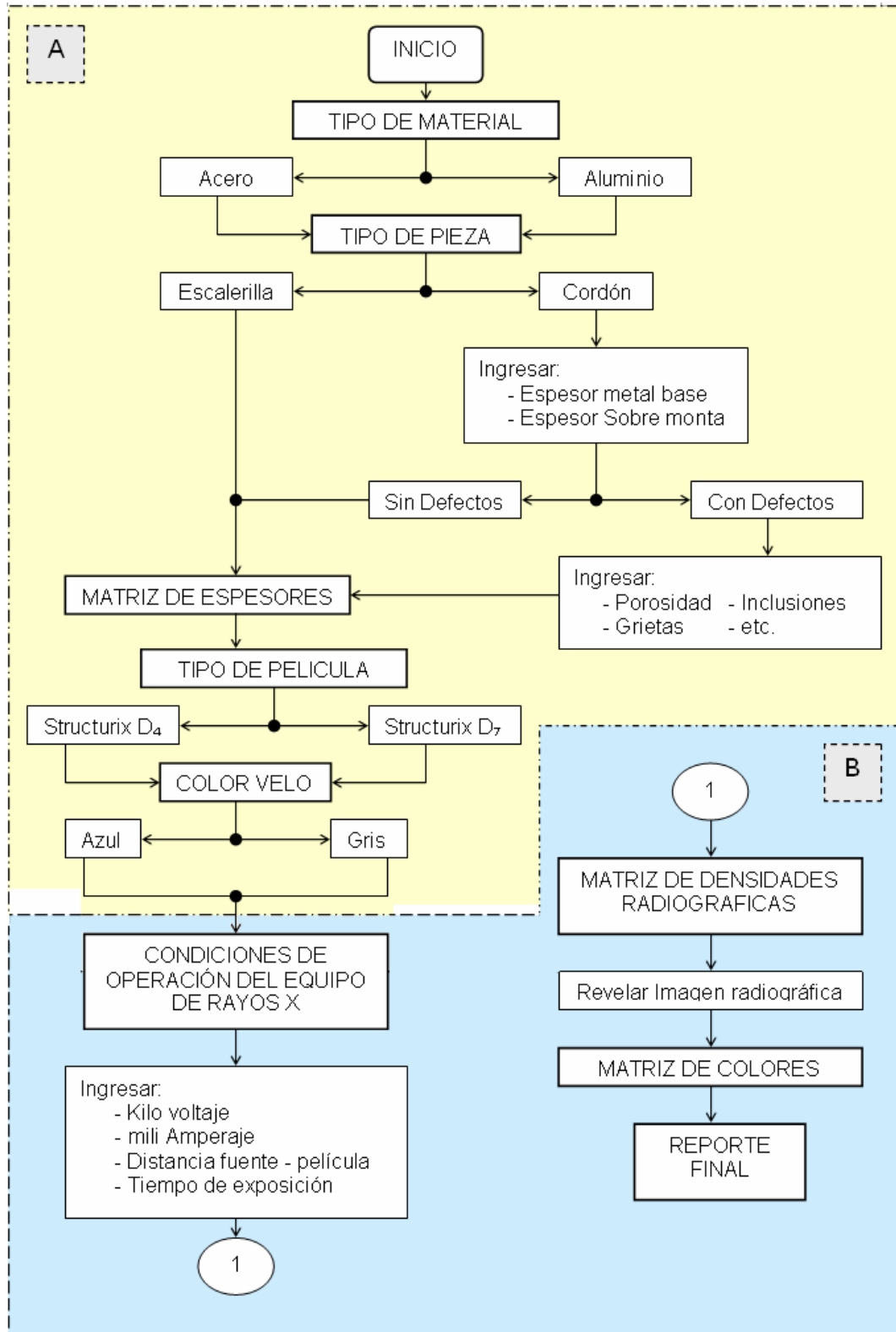
La parte A del diagrama corresponde al manejo que el profesor hace del SimPRI y por medio del cual evalúa y pone a prueba los conocimientos del estudiante, quien es el que opera la parte B. Una forma de explicar esto podría ser asumiendo que el profesor al hacer aquellas selecciones de la parte A finalmente obtiene, por ejemplo, un cordón de soldadura de acero con algunos defectos que él seleccionó e ingresó. El estudiante, basándose en sus conocimientos, deberá seleccionar aquellas condiciones de exposición que generen la mejor respuesta radiográfica para que posteriormente sea analizada y evaluada, permitiendo así la creación de un reporte con los comentarios y conclusiones de la práctica.

Una descripción más detallada de cómo se lleva a cabo este proceso directamente con el entorno del simulador se presenta en el capítulo 4 llamado DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA SimPRI.

### **3.5 IMPLEMENTACIÓN DE LAS CORRELACIONES ENTRE EL BANCO DE DATOS Y LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

Como ya se indicó anteriormente, para la creación de la herramienta SimPRI se dispuso de una gran cantidad de información numérica la cual contiene distintas tablas que presentan las respuestas radiográficas obtenidas experimentalmente sobre piezas de acero y aluminio de espesor variable. Un ejemplo de estas tablas con sus respectivas condiciones y plan de exposiciones es presentada en el anexo B.

Figura 20. Diagrama esquemático del comportamiento del SimPRI



El empleo de la información anterior les permitió a sus autores, Norberto Quintero y Cesar Cáceres <sup>(16)</sup>, hallar una expresión matemática que logra relacionar eficientemente todas las variables del proceso radiográfico mencionadas anteriormente, brindando como resultado un valor numérico para la densidad radiográfica; ver (Ec-2).

$$d = d_0 + b * Kp * Ke * I * t * \left( \frac{Km}{dfp} \right)^2 \quad (\text{Ec-2})$$

Donde

- $d$  : densidad radiográfica o grado de ennegrecimiento
- $d_0$  : densidad inicial o velo de la película radiográfica
- $b$  : coeficiente en función del espesor, del KV y del tipo de material
- $Kp$  : factor de corrección por el cambio del tipo de película radiográfica
- $Ke$  : factor de corrección por el cambio del tipo de equipo
- $I$  : corriente empleada en la exposición [mA]
- $t$  : tiempo que toma la exposición [min]
- $Km$  : factor de corrección por el cambio de distancia fuente-película [cm]
- $dfp$  : distancia entre la fuente de rayos X y la película radiográfica [cm]

Las tablas de 1 a 3 presentan los valores de  $Kp$ ,  $Km$  y  $Ke$ . En las tablas 4 y 6 se aprecian valores obtenidos para  $d_0$  tanto para el acero como para el aluminio, y en las 5 y 7 se presentan los valores de  $b$  para los mismos materiales respectivamente.

---

<sup>16</sup> QUINTERO, Norberto y CACERES, Cesar. Elaboración de cartas de exposición radiográfica mediante un proceso de simulación asistida por computador. [Tesis de grado]. UIS, Facultad de Ingenieras Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, 1992. p 78 - 120.

Tabla 1. Valores del factor  $K_p$

TIPO DE PELÍCULA	FACTOR $K_p$
Structurix D7	1
Structurix D4	0.44
Otra	Debe ser calculado <sup>(17)</sup>

Tabla 2. Valores del factor  $K_m$

TIPO DE MATERIAL	FACTOR $K_m$
Acero	70
Aluminio	100

Tabla 3. Valores del factor  $K_e$

TIPO DE EQUIPO	FACTOR $K_e$
ANDREX	1
Otro	Debe ser calculado <sup>(18)</sup>

<sup>17</sup> Ibid., p.127–130

<sup>18</sup> Ibid., p. 130–133

Tabla 4. Valores del coeficiente  $d_o$  para el acero

KV	ESPEJOR (mm)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
100	0.39	0.50	0.51	0.45	0.36	0.34	0.28	0.25	0.25								
110	0.28	0.43	0.41	0.34	0.33	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24			
120	0.25	0.35	0.47	0.33	0.43	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25
130		0.29	0.34	0.45	0.40	0.45	0.40	0.33	0.32	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27
140		0.25	0.37	0.45	0.39	0.43	0.44	0.37	0.38	0.32	0.30	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.25
150			0.28	0.36	0.47	0.38	0.43	0.39	0.37	0.34	0.36	0.34	0.32	0.31	0.30	0.29	0.30
160			0.38	0.33	0.34	0.48	0.46	0.51	0.43	0.42	0.45	0.37	0.32	0.30	0.28	0.28	0.28

Tabla 5. Valores del coeficiente  $b$  para el acero

KV	ESPEJOR (mm)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<b>100</b>	1.05	0.35	0.14	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01								
<b>110</b>	1.750	0.590	0.300	0.190	0.123	0.085	0.057	0.040	0.027	0.019	0.013	0.010	0.007	0.005			
<b>120</b>	2.170	0.960	0.448	0.315	0.162	0.126	0.085	0.061	0.044	0.030	0.021	0.015	0.01	0.008	0.0065	0.006	0.0056
<b>130</b>		1.700	0.986	0.540	0.370	0.230	0.166	0.128	0.096	0.072	0.053	0.040	0.030	0.024	0.018	0.013	0.010
<b>140</b>		2.220	1.140	0.697	0.500	0.343	0.240	0.190	0.138	0.110	0.090	0.072	0.057	0.046	0.036	0.0287	0.022
<b>150</b>			1.650	0.978	0.57	0.447	0.304	0.239	0.184	0.152	0.117	0.094	0.074	0.061	0.048	0.038	0.028
<b>160</b>			1.890	1.400	1.020	0.639	0.480	0.340	0.280	0.230	0.173	0.145	0.120	0.101	0.083	0.066	0.051

Tabla 6. Valores del coeficiente  $d_o$  para el aluminio

KV	ESPEORES (mm)																	
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54
<b>60</b>	0.42	0.34	0.29	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23									
<b>80</b>	0.42	0.42	0.34	0.38	0.34	0.31	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22			
<b>100</b>	0.25	0.42	0.43	0.39	0.34	0.35	0.36	0.41	0.36	0.34	0.32	0.31	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25
<b>120</b>	0.20	0.28	0.26	0.35	0.43	0.36	0.32	0.43	0.40	0.41	0.37	0.36	0.37	0.34	0.32	0.30	0.29	0.28
<b>140</b>		0.25	0.25	0.25	0.26	0.28	0.34	0.42	0.40	0.43	0.40	0.38	0.34	0.33	0.33	0.36	0.33	0.29
<b>160</b>				0.25	0.25	0.25	0.26	0.25	0.23	0.27	0.31	0.29	0.3	0.29	0.31	0.28	0.28	0.35

Tabla 7. Valores del coeficiente  $b$  para el aluminio

KV	ESPESOR (mm)																	
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54
<b>60</b>	0.2	0.12	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01									
<b>80</b>	0.6	0.43	0.33	0.23	0.18	0.14	0.1	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.027			
<b>100</b>	1.5	0.98	0.75	0.61	0.51	0.41	0.33	0.26	0.22	0.18	0.15	0.13	0.11	0.087	0.072	0.06	0.05	0.04
<b>120</b>	2.7	1.99	1.67	1.25	0.99	0.85	0.74	0.56	0.49	0.39	0.34	0.29	0.24	0.2	0.173	0.15	0.12	0.09
<b>140</b>		3.10	2.63	2.25	1.79	1.56	1.22	0.97	0.85	0.68	0.59	0.51	0.45	0.38	0.33	0.26	0.22	0.17
<b>160</b>				2.97	2.59	2.21	1.84	1.60	1.45	1.19	0.98	0.86	0.74	0.65	0.56	0.48	0.39	0.29

Cabe mencionar que todas las exposiciones se hicieron utilizando el equipo de radiación X marca ANDREX que se encuentra en el laboratorio de END de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y cuyas condiciones de operación son:

Tabla 8. Condiciones de operación del equipo ANDREX

VARIABLE	UNIDAD	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Voltaje	KV	50	160
Corriente	mA	0	5
Tiempo de exposición	min	0	9

Se debe señalar que los autores anteriormente mencionados encontraron una estrecha relación para el coeficiente  $b$  con respecto al espesor del material y al kilo voltaje del tubo, hallando por medio de regresión lineal la siguiente expresión:

$$b = A * (KV)^B \quad (\text{Ec-3})$$

Donde  $A$  y  $B$  son coeficientes gobernados por el espesor del material.

El coeficiente de correlación calculado para los términos de la Ec-3 estuvo entre 0.98 y 0.99, mostrando de esta forma el grado de precisión con el que cuenta esta expresión.

La introducción de la anterior expresión del coeficiente  $b$  en la Ec-2 permite que esta última determine densidades a partir de diferentes kilo voltajes incluyendo valores distintos a los empleados experimentalmente. La expresión general se presenta a continuación en la Ec-4:

$$d = d_0 + (A * KV^B) * Kp * Ke * I * t * \left( \frac{Km}{dfp} \right)^2 \quad (\text{Ec-4})$$

Previa verificación de sus términos y confirmación de su confiabilidad, esta expresión fue el punto de partida para el manejo de los grados de ennegrecimiento dentro del proyecto y por lo tanto dentro del simulador.

Como se puede observar de las tablas 3 a 6, y de la 9 y la 10, la variación de espesores que se hace para la pieza de aluminio es diferente de la del acero, en un factor de tres para ser exactos; ésto se debe a que el aluminio al poseer una densidad menor, es decir que es más ligero, absorbe tres veces menos radiación por lo que es necesario emplear mayores espesores y así asegurar respuestas radiográficas que sean comparables con las del acero.

### **3.6 ELABORACIÓN DE LOS ALGORITMOS PARA LA CREACIÓN DE LOS OBJETOS INTRODUCIDOS EN EL SimPRI**

Los objetos dentro del concepto de programación orientada a objetos son entidades y por lo tanto tienen una identidad, es decir, propiedades o características que los hacen únicos frente a otros objetos y que por medio de éstas es que logran interactuar entre sí. Dentro del simulador se implementaron algunos de estos objetos a través del código del programa, dándoles por lo tanto algunas características que son comunes pero a su vez propias.

La pieza, la película y los defectos seleccionados y que finalmente fueron introducidos se crearon usando los conceptos aprendidos en programación con MATLAB; cada uno de éstos se comporta como un objeto dentro del simulador lo que les permite responder de manera más real, contrario a si se hubiese empleado el método tradicional de programación, a los estímulos radiográficos a los que se vean sometidos.

El cuadro 3 resume de manera concisa los objetos y las propiedades que se le brindaron; cabe mencionar que son estas propiedades las que interactúan con las variables del proceso radiográfico y por lo tanto se ven afectadas de manera directa según el manejo que se haga de éstas.

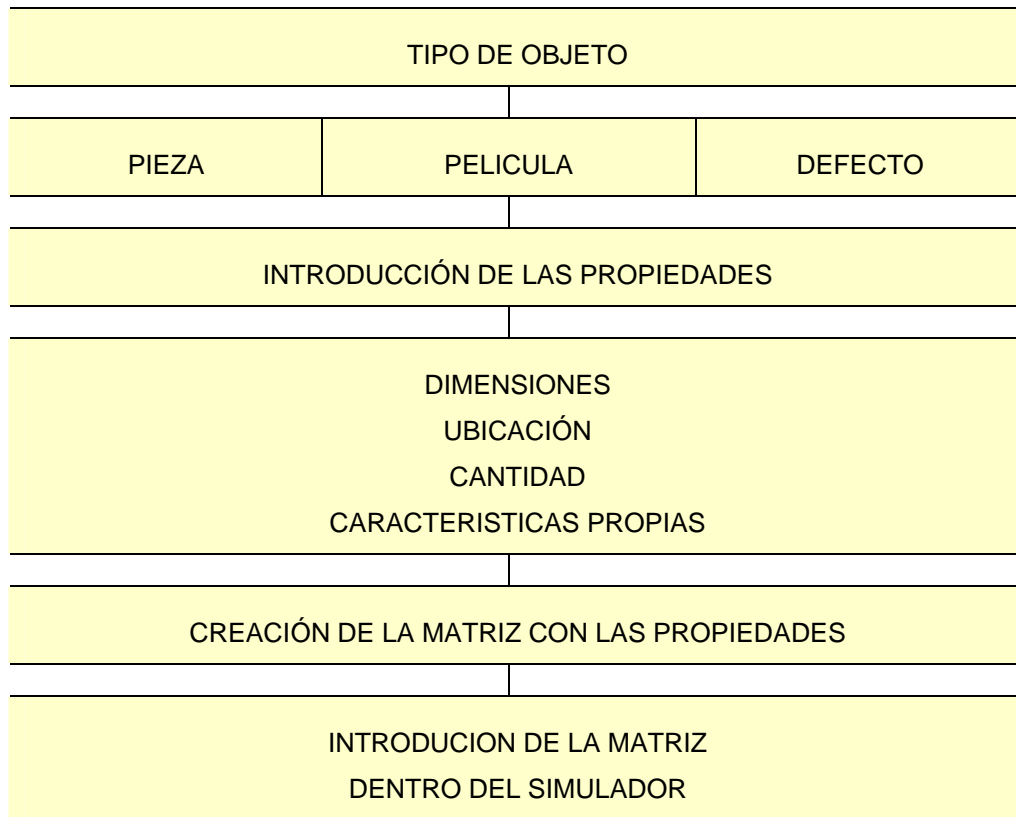
Cuadro 3. Descripción de los objetos introducidos en el SimPRI

NOMBRE DEL OBJETO	CARACTERÍSTICAS
<b>PIEZA</b>	Material: Acero o Aluminio Tipo: Escalerilla o Unión soldada Dimensiones: Alto, Ancho y Profundo
<b>DEFECTO</b>	Posición dentro de la película: coordenadas (x,y) Forma: Depende del tipo de defecto Tamaño: coordenadas (x,y,z)
<b>PELICULA RADIOGRAFICA</b>	Dimensiones: Largo y Ancho Color de velo: Azul o Gris Tipo: Structurix D7 o Structurix D4

La figura 21 presenta los pasos seguidos para la creación de los distintos objetos introducidos en el SimPRI, los cuales deberán interactuar y responder de la forma más real a las distintas condiciones radiográficas a los que se vean sometidos.

Un proceso mas detallado de cómo se llevó esto a cabo se presenta a continuación en el DESARROLLO DEL SimPRI.

Figura 21. Etapas para la creación de los objetos pieza, película y defectos



### 3.7 DESARROLLO DEL SimPRI

A continuación se presenta el desarrollo de la herramienta la cual consistió de dos etapas principales. La primera está relacionada con la programación de la parte fundamental del simulador (información numérica no visible), y la segunda con la programación de su entorno visual (información grafica visible).

**3.7.1 Primera Etapa:** Una vez obtenida la capacitación necesaria para lograr programar en MATLAB y después de obtener el diseño del SimPRI, se partió de la información numérica con la que se cuenta y de la expresión que logra relacionarla para generar una respuesta y así proseguir a la etapa de programación del SimPRI.

Para lograr todo lo anterior se decidió que la ecuación 2 debía ser transformada y acondicionada a la forma como MATLAB maneja los datos, es decir, como matrices; esto fue posible al hallar una expresión equivalente para el coeficiente  $b$  empleando los valores de la tabla 5 y 7, las cuales brindaron como resultado una nueva tabla de coeficientes y una nueva expresión; ver tablas 9 y 10 y Ec-5.

$$d = d_0 + (b_1 * e^{b_2 * S}) * Kp * Ke * I * t * \left( \frac{Km}{dfp} \right)^2 \quad (\text{Ec-5})$$

Donde:

$b_1$  y  $b_2$  : coeficientes en función del Kv

$S$  : espesor de la pieza [mm]

Se puede observar que en la (Ec-5) los valores para el espesor de la pieza ahora pueden ser introducidos directamente sin que dependan de otros coeficientes, incluso se pueden ingresar cantidades decimales permitiendo resultados aún más similares a los encontrados en la realidad.

Para comprender la forma como funcionan en conjunto la (Ec-5) y sus correspondientes tablas de datos, se desarrollará un ejemplo en el que se desea calcular el valor de densidad radiográfica que se obtendrá al irradiar una pieza de acero de 3.5 milímetros de espesor durante 4 minutos, si se aplican 110 kilo Voltios, 3.5 mili Amperios a una distancia fuente película de 80 centímetros y empleando una película Structurix D4.

Tabla 9. Coeficientes  $b_2$ ,  $b_1$  y  $d_0$  para el acero

COEFICIENTES			
KV	$b_2$	$b_1$	$d_0$
100	-0.5985	1.1214	0.3700
110	-0.4128	1.2426	0.2864
120	-0.3627	1.3949	0.3082
130	-0.3230	2.0328	0.3319
140	-0.2826	2.2278	0.3287
150	-0.2676	2.4197	0.3491
160	-0.2496	3.1362	0.3753

Tabla 10. Coeficientes  $b_2$ ,  $b_1$  y  $d_0$  para el aluminio

COEFICIENTES			
KV	$b_2$	$b_1$	$d_0$
60	-0.1139	0.2313	0.2822
80	-0.0741	0.5963	0.2993
100	-0.0672	1.4334	0.3289
120	-0.0627	2.7677	0.3372
140	-0.0591	4.3415	0.3267
160	-0.0523	5.6035	0.2747

El primer paso que se debe hacer es encontrar los valores correspondientes a los factores de la (Ec-5) en las tablas 1, 2, 3 y 9.

$$\begin{array}{lll}
 d_0 = 0.2864 & b_1 = 1.2426 & b_2 = -0.4128 \\
 S = 3.5 & Kp = 0.44 & I = 3.5 \\
 t = 4 & Km = 70 & dfp = 80
 \end{array}$$

Después de esto las cantidades halladas son reemplazadas en la (Ec-5), la cual dará como resultado el valor numérico del grado de ennegrecimiento resultante como respuesta a la selección de las anteriores variables.

$$d = (0.2864) + (1.2426 * e^{(-0.4128 * (3.5))}) * (0.44) * (3.5) * (4) * \left(\frac{70}{80}\right)^2$$

$$d = 1.67$$

Ahora bien, considerando que una pieza generalmente no presenta un único espesor constante, más aún si se trata de una unión soldada, esto hace necesario que deba ser cambiada, o mejorada, la manera como se introducen los valores de los espesores de la pieza; recordando de las generalidades, la forma como MATLAB maneja sus datos, y que una de las características de los computadores es procesar miles de operaciones en segundos, de aquí se parte a un nuevo concepto en la determinación de la densidad radiográfica sobre piezas de acero y aluminio.

Empleando el concepto de MATLAB para el manejo de datos se presentará otro ejemplo manteniendo las mismas condiciones anteriores pero esta vez para distintos valores de espesor presentados de la siguiente forma:

$$S_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 3.5 & 4.0 \\ 2.5 & 1.5 \end{bmatrix}$$

Reemplazando en la (Ec-5), y aplicándola para cada elemento de  $S$ , se tiene:

$$d = 0.2864 + \left( 1.2426 * e^{(-0.4128) * \begin{bmatrix} 3.5 & 4.0 \\ 2.5 & 1.5 \end{bmatrix}} \right) * (0.44) * (3.5) * (4) * \left( \frac{70}{80} \right)^2$$

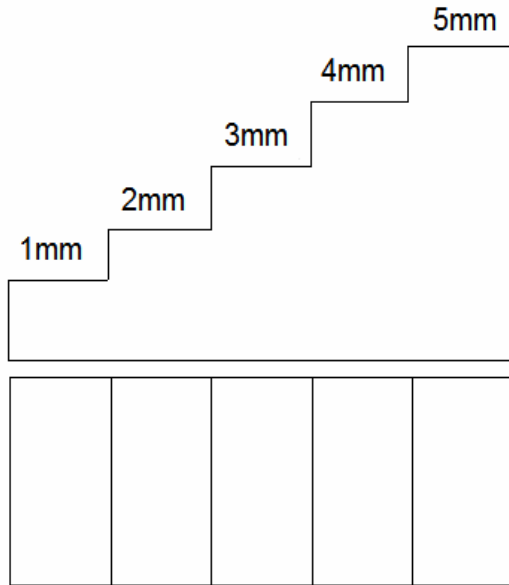
$$d_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1.67 & 1.41 \\ 2.38 & 3.44 \end{bmatrix}$$

Aunque una pieza con distintos espesores que genera a su vez distintas respuestas radiográficas ya es un acercamiento mucho mayor a un fenómeno real, aún se sigue dependiendo de respuestas numéricas las cuales, tal cual se encuentran, no definen ningún comportamiento claro, estado que las hace muy poco útiles para lograr conclusiones definitivas acerca de la influencia de las variables en la respuesta radiográfica, de aquí parte la necesidad de visualizar correctamente esta información numérica y transformarla en información gráfica.

De las generalidades acerca de la visualización de imágenes con MATLAB se tiene que la forma como este lenguaje de programación maneja sus datos numéricos y gráficos es la misma, se decidió aprovechar esto y así generar imágenes a partir de las distintas respuestas radiográficas obtenidas sobre piezas de diferentes espesores.

Si se parte de una pieza de acero en forma de escalerilla, en la que cada paso aumenta en un milímetro, se tiene que la vista lateral y superior de esta pieza se observan como en la figura 22.

Figura 22. Vista lateral y superior de una escalerilla metálica



De aquí se crea una matriz llamada  $S$  que contendrá en cada elemento el valor del espesor de la escalerilla; para el presente caso  $S$  tiene 2 filas por 5 columnas (exagerando el tamaño de los píxeles de una imagen), ver figura 23.

Antes de continuar se debe agregar que las dimensiones de la matriz determinan únicamente el tamaño de la imagen final por lo que no influyen en el valor de las respuestas radiográficas.

Figura 23. Matriz que contiene los espesores de la escalerilla metálica

$$S_{(2 \times 5)} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline \end{array}$$

Para irradiar esta pieza se optó por una película Structurix D7 a una distancia de 120 cm del tubo de rayos X, 120 Kilo voltios y 1.7 mili Amperios durante 7 minutos.

Al buscar nuevamente en las tablas 1, 2, 3 y 9 se obtienen los siguientes valores.

$$\begin{array}{llll}
 d_0 = 0.3082 & b_1 = 1.395 & b_2 = -0.363 & Kp = 1 \\
 I = 1.7 & t = 7 & dfp = 120 & km = 70
 \end{array}$$

Estos ahora se introducen en la (Ec-5) y al igual que en el ejemplo anterior se obtendrá una matriz de iguales dimensiones, como se puede apreciar en la figura 24, la cual contiene el valor de las distintas densidades radiográficas producidas. Aquí hay que observar la correspondencia entre cada valor de espesor, su posición y su valor de densidad.

Figura 24. Matriz que contiene las densidades radiográficas

$$d_{(2 \times 5)} =$$

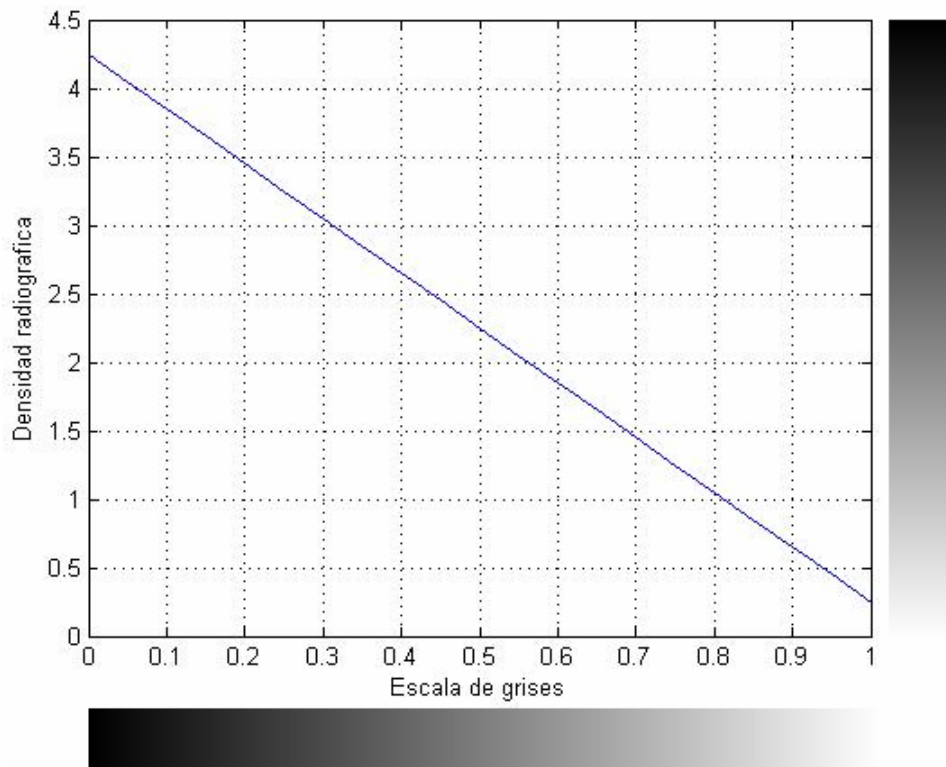
<b>4,24</b>	<b>3,04</b>	<b>2,21</b>	<b>1,63</b>	<b>1,23</b>
<b>4,24</b>	<b>3,04</b>	<b>2,21</b>	<b>1,63</b>	<b>1,23</b>

Para generar una imagen a partir de esta información se debe crear una función que correlacione estos valores de densidad con diferentes intensidades de colores, para este caso debido a que se trata de una radiografía se decide hacer con distintos niveles de gris.

Al medir, observar y comparar los grados de ennegrecimiento de distintas radiografías reales se determinó arbitrariamente que para densidades mayores a 4.25 no se logra apreciar una diferencia notable en el grado de

ennegrecimiento, es decir, todo parece ser de color negro; del mismo modo se determinó que densidades menores a 0.25 se consideraban como color blanco. Esto es importante ya que definió cual debería ser la sensibilidad de la escala de grises que se introduciría en el SimPRI. Ver figura 25.

Figura 25. Correlación entre niveles de gris y densidad radiográfica



Fuente: El autor

Partiendo de la observación anterior, se creó una correlación entre los valores que se encuentran entre el rango de 0.25 y 4.25, y los que hay entre 0 y 1, y como se mencionó anteriormente, un valor de cero equivale al color negro y por lo tanto a aquellas densidades iguales y mayores a 4.25, y un valor igual a uno representa el color blanco y densidades iguales y menores a 0.25.

Continuando con el ejemplo se tiene que la nueva matriz de la anterior figura 24 es del tipo **grayscale image** y por lo tanto puede ser procesada por MATLAB para generar una imagen que se observe como la radiografía de una pieza que tiene la forma de una escalera, de tal manera que brinde mayor información ya que permite visualizar la respuesta permitiendo una mejor comprensión de los resultados. Ver figura 26.

Figura 26. Matrices que representan una imagen tipo escala de grises

0,1	0,3	0,5	0,8	0,8
0,1	0,3	0,5	0,8	0,8
0,1	0,3	0,5	0,8	0,8
0,1	0,3	0,5	0,8	0,8

Fuente: El autor

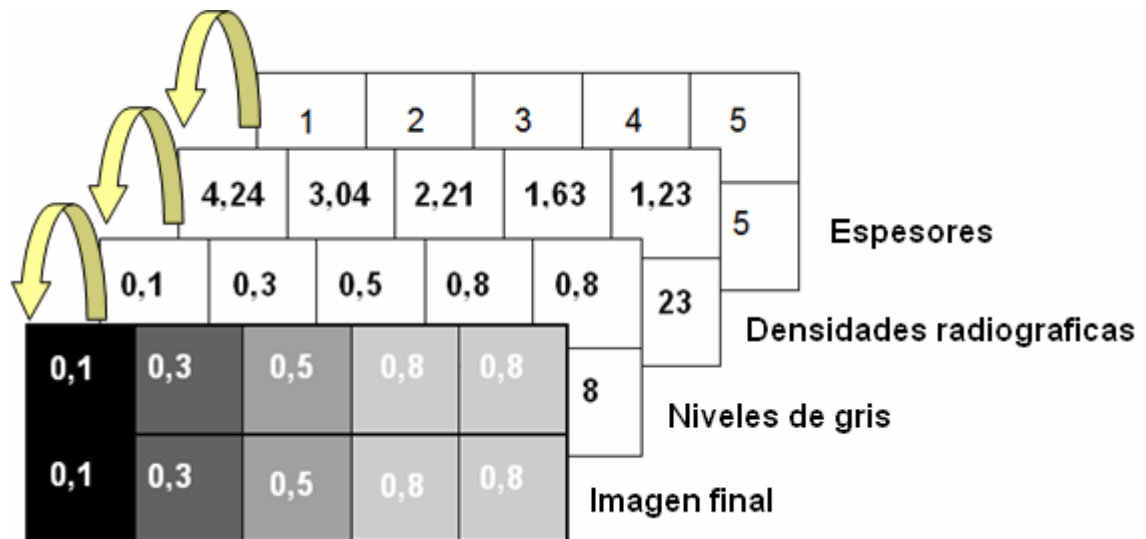
El color gris generado mediante este proceso es muy uniforme, y en una radiografía real esto generalmente no ocurre ya que la pieza presenta pequeñas variaciones de espesor, ver cuadro 1; para remediar esto, se introdujo una función que genera un ruido en la imagen, es decir, elimina esta uniformidad y brinda una apariencia más real a la radiografía.

Hasta este momento se sabe cómo funciona la simulación del proceso radiográfico sobre una escalerilla metálica, y la figura 27 muestra las etapas por las que pasa la matriz de espesores antes de formar una imagen.

Para el presente trabajo, además de la escalerilla, también se introdujo una pieza que representará una unión soldada, específicamente la unión de dos

placas metálicas; para lograr lo anterior se desarrolló un algoritmo que creará una matriz cuyos valores corresponderán a los distintos espesores presentes en este tipo de piezas, es decir, los del metal base y los del sobre espesor.

Figura 27. Etapas de transformación de las matrices empleando el SimPRI



Fuente: El autor

Ya que la tarea de un inspector calificado es determinar la sanidad de una pieza analizando las radiografías y establecer si las discontinuidades presentes en la soldadura son o no relevantes, se seleccionaron, crearon e introdujeron los algoritmos para una serie de defectos representativos de los procesos de soldadura; estos defectos son aquellos que ya fueron numerados en el cuadro 1.

Al igual que el concepto real de absorción diferencial de radiación debido a las discontinuidades presentes en una pieza de análisis, el SimPRI se basa en las variaciones de espesor introducidas como valores numéricos positivos y negativos de estas discontinuidades.

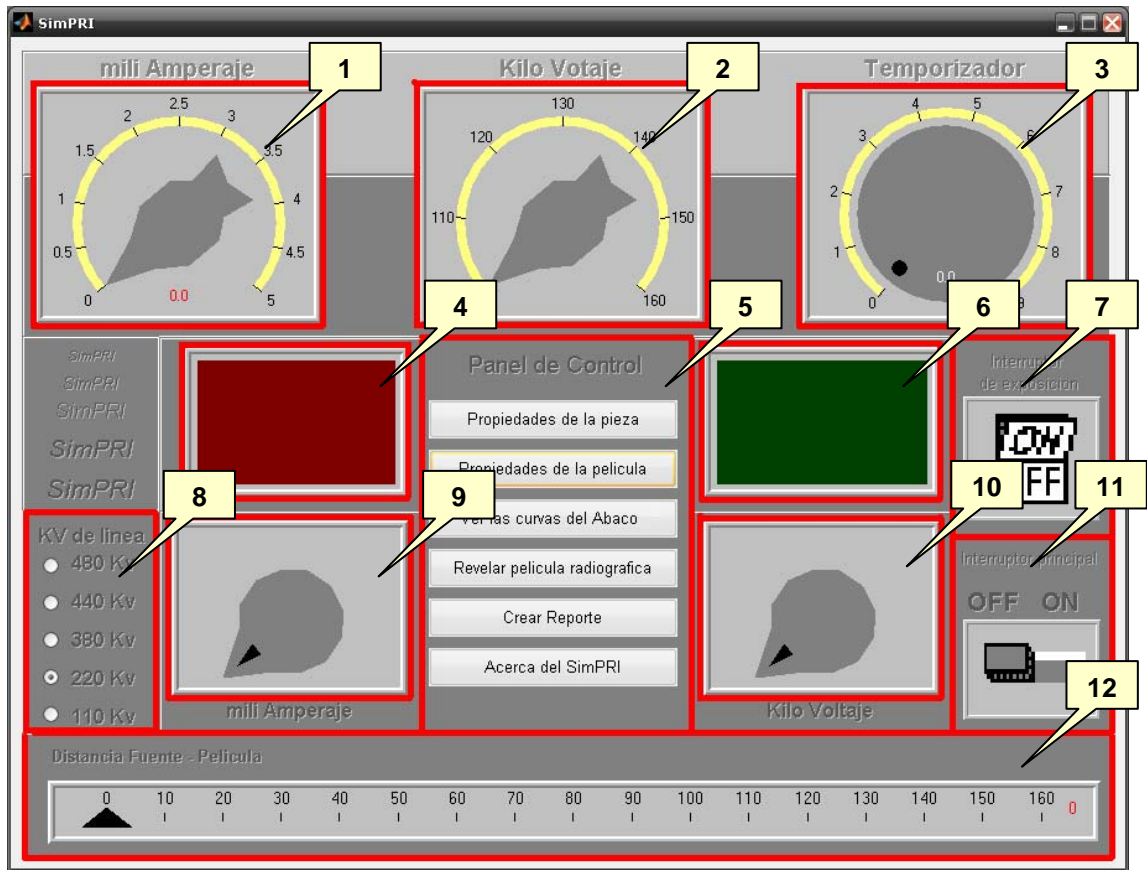
Al tomar la altura del cordón de soldadura o sobre espesor como un nivel de espesor base, se definió que toda aquella discontinuidad que indique una adición de material de mayor densidad que éste, como en el caso del chisporroteo, será representado como un valor de espesor positivo; por lo tanto se tiene que un poro será introducido con un valor de espesor negativo, y de igual forma se aplica para los otros defectos brindando de esta manera la posibilidad de agregar posteriormente cualquier tipo de discontinuidad basándose en este concepto.

**3.7.2 Segunda Etapa:** No solo es importante simular los resultados del proceso radiográfico, también es importante simular el entorno, o mejor, el medio en el que este proceso se lleva a cabo. Para realizar esto se empleó una herramienta que contiene MATLAB llamada GUI, la cual permite mediante el empleo de código de programación la creación de todo tipo de interfaces haciendo de esta manera más intuitiva y más real la experiencia de simular el proceso radiográfico con el SImPRI.

Para el desarrollo de la consola principal, la cual se puede observar en la figura 28, se tomó como base la propia consola del equipo de rayos X marca ANDREX que se encuentra en el laboratorio END de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, ver figura 29. Comparando estas dos figuras se logran apreciar las correspondencias y similitudes entre ambas, lo que permitirá una experiencia más real al momento de su empleo enriqueciendo de esta forma la capacitación del usuario en esta técnica de ensayo no destructivo.

La figura 28 muestra los 12 objetos que representan los distintos controles y características principales de la consola del equipo ANDREX, los cuales son listados en la misma. Para su mayor correspondencia se introdujeron perillas, indicadores de kilo voltaje, mili amperaje y tiempo de exposición, lámparas de luz verde y roja, e interruptores principales.

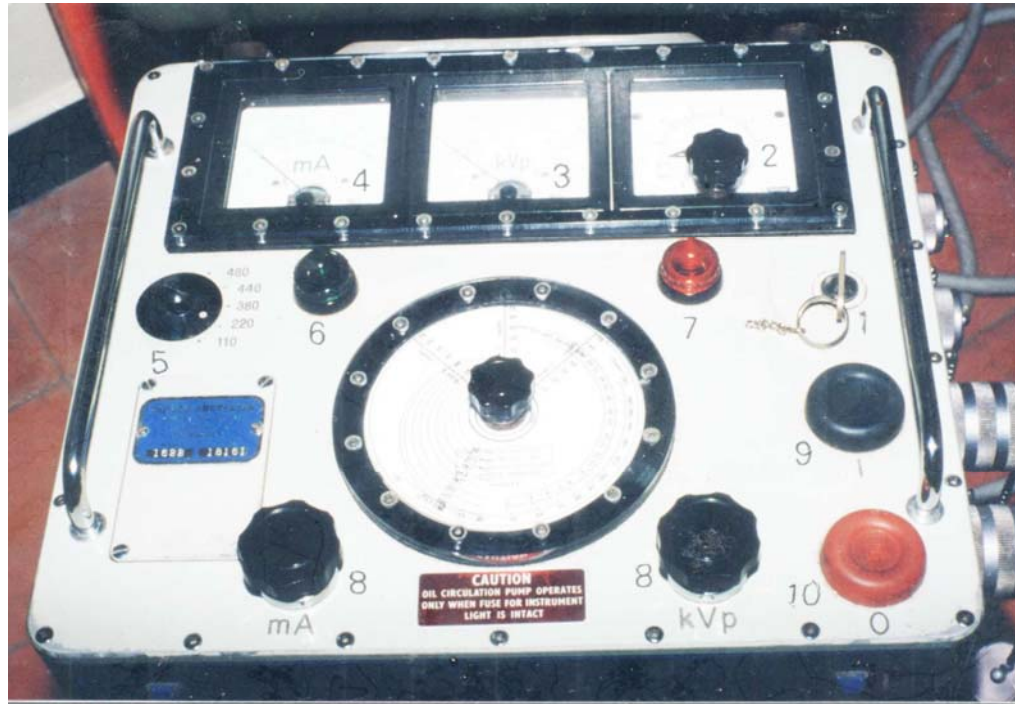
Figura 28. Consola principal de la herramienta informática SimPRI



- |  |   |
|--|---|
| 1. Indicador de mili Amperaje          | 2. Indicador de kilo Voltaje                |
| 3. Temporizado                         | 4. Lámpara de señal roja                    |
| 5. Panel de control                    | 6. Lámpara de señal verde                   |
| 7. Interruptor de inicio de exposición | 8. Selección de voltaje de línea            |
| 9. Perilla de control de mili Amperaje | 10. Perilla de control de Kilo voltaje      |
| 11. Interruptor principal              | 12. Control de la distancia fuente película |

Para un mejor manejo y comprensión del proceso radiográfico e influencia de sus variables se introdujo como ayudas adicionales una regilla para controlar la distancia fuente-película, un ábaco que orienta la selección de las condiciones de exposición y un densitómetro que corrobora los resultados radiográficos obtenidos.

Figura 29. Consola del equipo ANDREX



### 3.8 IMPLEMENTACIÓN DEL SimPRI Y VERIFICACIÓN USANDO USUARIOS

Al finalizar el desarrollo del simulador se hizo la implementación de éste durante dos semestres con los estudiantes del laboratorio de END, la mayoría de ellos con conocimientos básicos en radiografía, soldadura y programación de computadores, quienes dieron sus opiniones acerca de la herramienta y brindaron sugerencias, muchas de las cuales fueron introducidas.

Algunas de estas sugerencias y recomendaciones hechas, y que fueron implementadas, se presentan a continuación:

- Mejorar la movilidad de los controles, como perillas e interruptores, es decir, hacerlos más intuitivos y fáciles de manejar.
- Crear la posibilidad de generar un reporte al finalizar la práctica simulada al igual que se hace en los laboratorios reales.

- Dar a conocer dentro del reporte no solo los valores de las variables esenciales empleadas, sino también de las que fueros fijadas.
- Introducir un manual que ayude a comprender el manejo del simulador.

Aquellas recomendaciones que no fueron implementadas debido a su complejidad fueron puestas dentro de las recomendaciones finales presentadas junto con las del autor del trabajo.

### **3.9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Estas son presentadas en su correspondiente capítulo.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA SimPRI

A continuación se presentará una simulación siguiendo las etapas del proceso radiográfico sugeridas en la figura 4 página 8, ya que la mejor forma de señalar sus características y algunos de sus detalles es colocándola a prueba.

El primer paso consiste en determinar las características de la pieza que será analizada, es decir, de qué tipo es el material del que esta hecha y cuál es su espesor máximo. Como se señala en la figura 30 estas opciones fueron seleccionadas y los valores correspondientes fueron introducidos.

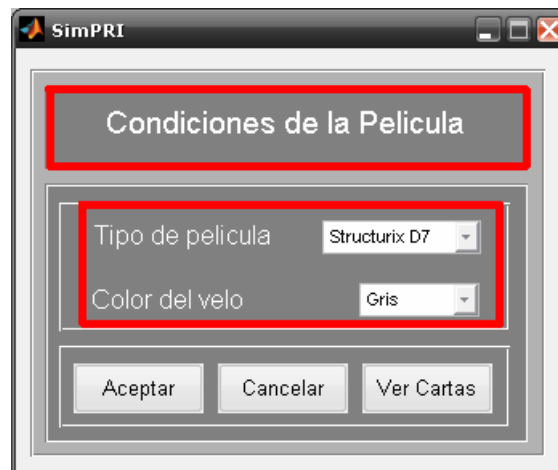
Figura 30. Selección de las condiciones de la pieza de análisis



El paso siguiente es seleccionar el tipo de película radiográfica y su velo. El sentido que se da dentro del SimPRI al velo, es el del color aparente de la

película, es decir, al ver una radiografía real para algunos observadores ésta parece constar de tonos azules, pero para otros parecen ser tonos de gris; esto se implementó en el SimPRI al brindar la posibilidad de representar los resultados radiográficos con ambas apariencias. Las opciones para la película radiográfica son señaladas en la figura 31.

Figura 31. Selección de las condiciones de la película radiográfica

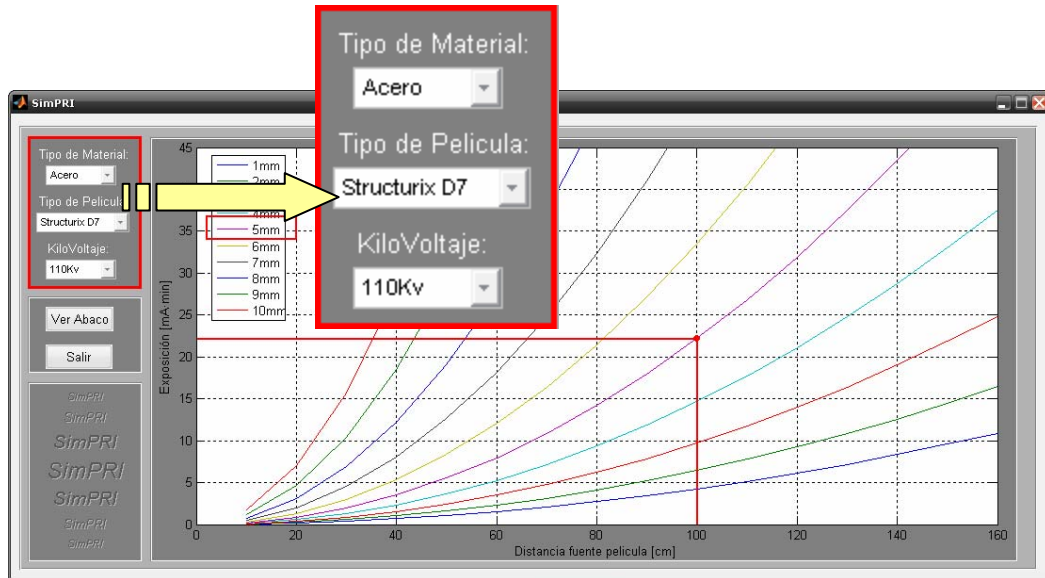


El paso siguiente es seleccionar las condiciones a las que debe trabajar el equipo, y para esto se emplea el ábaco. Ver figura 32; en éste se ingresan las características anteriormente definidas de la pieza y la película, y aquellas características con las que se trabajará en el equipo de rayos X, que para este caso se trata del SimPRI.

En el ábaco se debe ubicar la curva que corresponde al espesor máximo de la pieza, es decir 5 milímetros según lo observado en la figura 30, luego se hace cortar con los ejes X y Y los cuales determinarán la distancia fuente-película y el valor de la exposición respectivamente; la exposición es un producto que mide la energía total emitida por el tubo de rayos X, por lo tanto se deben hallar dos posibles valores que multiplicados entre si den como resultado este resultado,

determinando así de igual manera el tiempo de exposición necesario y la corriente que se debe emplear.

Figura 32. Uso del Ábaco para seleccionar las condiciones de exposición

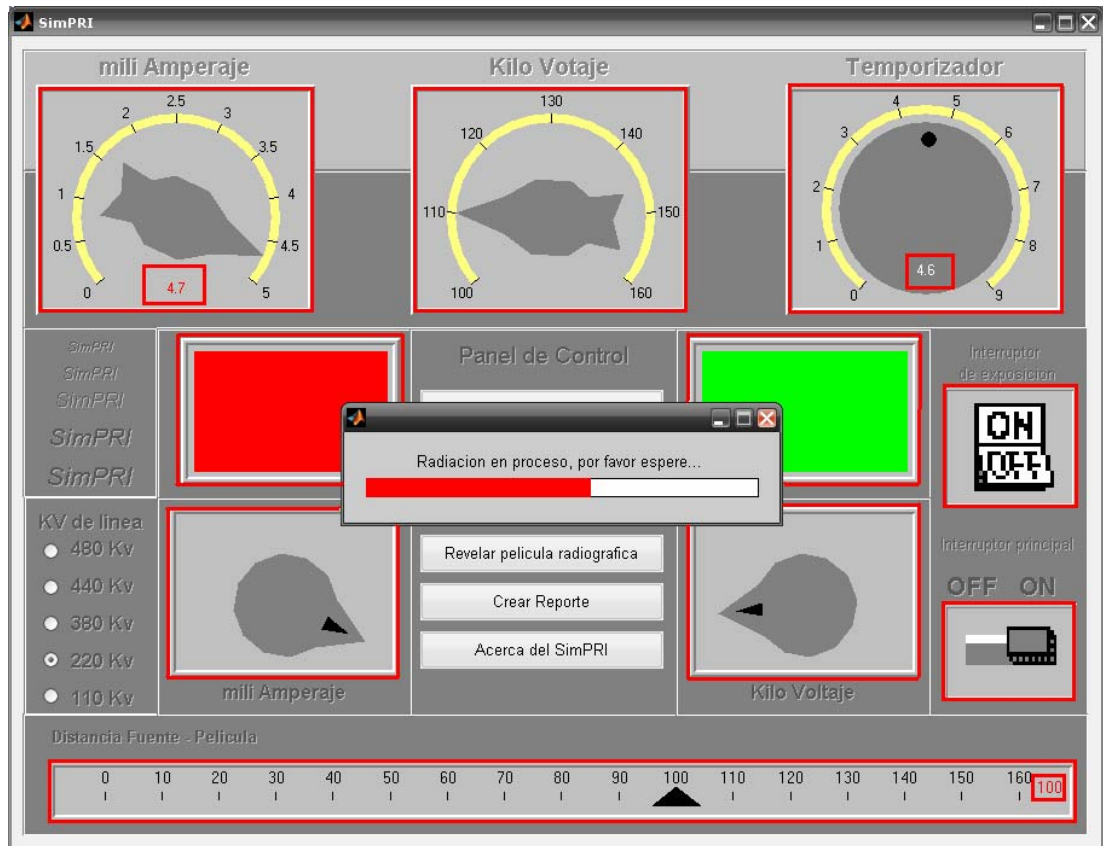


En la figura 32 se observa que para irradiar la pieza y obtener los mejores resultados de calidad de imagen se requiere de una distancia de 100 centímetros desde la fuente de rayos X y la película radiográfica, y una exposición de unos 22 mA\*min, o lo que es igual, 4.7y mili Amperios durante 4.6 minutos.

Las variables determinadas ahora son introducidas empleado los controles de la consola del equipo SimPRI; después de esto ya se puede dar inicio a la irradiación de la pieza y el posterior revelado de la imagen radiográfica

En la figura 33 se puede apreciar el SimPRI cuando se encuentra en la etapa de radiación de la pieza; aquí se observan las variables seleccionadas como el Kilo voltaje, el mili Amperaje, el tiempo de exposición y la distancia fuente-película en los controles, y al igual que el equipo real, la lámpara de señal roja se encuentra encendida informando al operario que la emisión de rayos X aún esta proceso.

Figura 33. SimPRI mientras irradia la pieza



Para corroborar que la selección de las variables se hizo correctamente se puede emplear el densitómetro que se introdujo dentro del SimPRI; con éste se puede medir el espesor y la densidad radiográfica sobre cualquier punto de la imagen, ver figura 34.

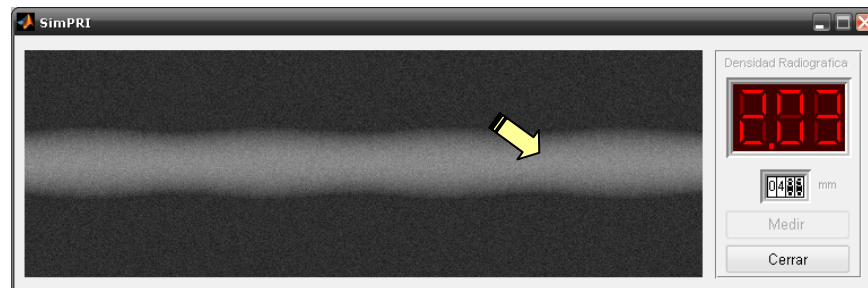
Para el SimPRI se asumió el valor de densidad radiográfica de 2 como el correcto (valor incluido dentro del intervalo de densidades permitidas por las normas API\* y ASTM\*\*) sobre la zona del espesor que se tomó como guía para la selección de

\* API 1104 de 1999, capítulo 11, Procedures for Nondestructive Testing, numeral 11.1.10.1, p 33.

\*\* ASTM E -1742 del 2000, Estandar Practice for Radiographic Examination, numeral 6.10.

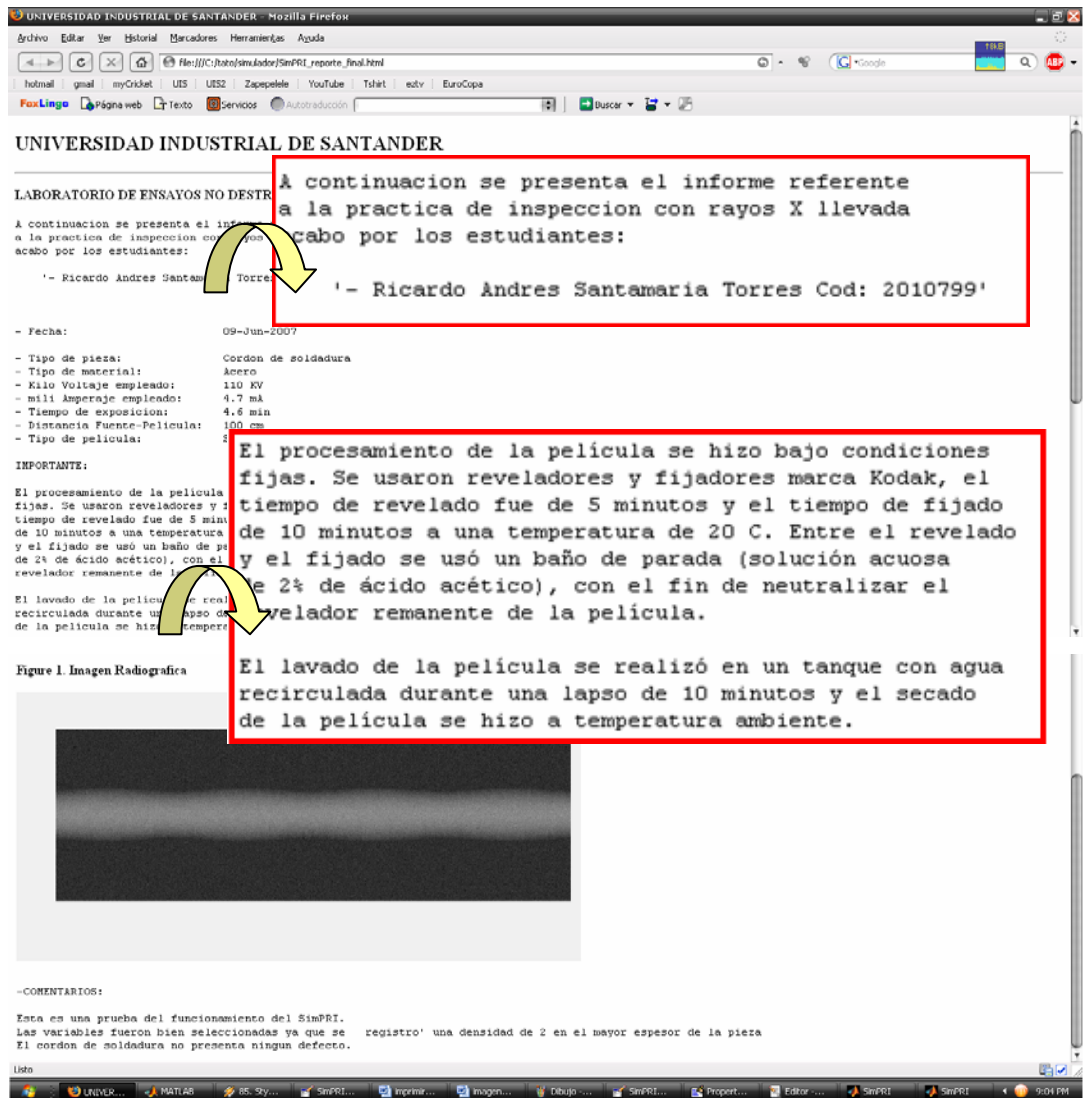
las variables, es decir, aquel seleccionado en el ábaco y que en este caso representa el espesor máximo de la pieza.

Figura 34. Respuesta radiográfica y medición de la densidad



Por último, la herramienta SimPRI presenta la opción de generar un pequeño reporte en formato HTML el mismo de las páginas de Internet, el cual por lo tanto puede ser guardado e impreso posteriormente para de esta forma obtener un registro permanente de la práctica. Este reporte contiene el nombre de los usuarios que realizaron la inspección, así como sus comentarios y las condiciones a las que se llevó a cabo el proceso radiográfico. Ver figura 35.

Figura 35. Reporte generado por el SimPRI



## 5. CONCLUSIONES

Se diseñó, desarrolló e implementó con éxito la herramienta informática SimPRI, en el laboratorio de END, de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UIS, como apoyo a las prácticas de toma y evaluación de radiografías, complementando los procesos reales.

Se establecieron las correlaciones entre la información numérica disponible y las variables del proceso radiográfico para simular respuestas que serán representadas de manera visual como información gráfica simulando una radiografía.

Se elaboraron los distintos algoritmos que representan los objetos pieza, película y defectos de soldadura, y se introdujeron dentro del SimPRI para consolidar esta herramienta informática.

El SimPRI en la práctica se comporta como una herramienta eficiente al generar conocimiento básico del manejo de un equipo real y de la evaluación de radiografías, permitiendo valorar la influencia directa de las variables del proceso sobre la respuesta radiográfica y afianzando los conocimientos teóricos implicados.

El SimPRI fue puesto a prueba con los usuarios del laboratorio de END los cuales brindaron aportes y sugerencias para el mejoramiento de la herramienta, las cuales en su mayoría fueron implementadas y se encuentran funcionando, aquellas que no, fueron introducidas dentro de las recomendaciones.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Mejorar el alcance de la herramienta introduciendo mayor número de defectos, otros materiales, diferentes películas y equipos de rayos X, así como otros tipos de piezas para así consolidar una herramienta más completa en la capacitación de futuros ingenieros.
- Hallar correspondencia y factores de corrección para aplicar el SimPRI en la predicción de resultados reales, empleando los equipos existentes en el laboratorio de END.
- Desarrollar otras herramientas informáticas basadas en las TIC's, para apoyar la capacitación en la inspección de otros procesos de fabricación, así como otros END.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, Esperanza y otros. Ambiente virtual para apoyar aprendizajes colaborativos en un modelo pedagógico fundamentados en la resolución de problemas. Escuela Colombiana de Ingenierías. Bogota. 2001. p 25-45

AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding inspection. 2a ed. Miami: American Welding Society, 1980. 217p.

\_\_\_\_\_. Welding Metallurgy. Miami: American Welding Society, 2001. 48p.

ANDY H. REGISTER. A guide to MATLAB Object-Oriented Programming. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 2007.

CONFERENCIA DE RECTORES DE LAS UNIVERSIDADES ESPAÑOLAS (CRUE). Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el Sistema Universitario Español. [Online]. [Madrid, España]: CRUE, 2004. URL: <<http://www.crue.org>> (consultado 12 febrero 2007)

EASTMAN KODAK COMPANY. Non destructive testing images: Your guide to proper processing and interpretation of radiography films for Non-Destructive Testing. Rochester: Eastman Kodak Company, 2003. p 55-83.

\_\_\_\_\_. Radiography in modern industry. 4a ed. Rochester: Eastman Kodak Company, 1980. p 6-127.

GOMEZ MORENO, Orlando José. Metalurgia de la soldadura. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1989. 170 p.

GOMEZ MORENO, Orlando José. Soldadura de metales. Universidad Industrial de Santander, 1989. p 8-4 a 8-14.

HARRISBURG JET CENTER INC. UFS-Aero: Flight Training Device. [Online]. [Harrisburg, Estados Unidos]. URL: <<http://www.harrisburgjetcenter.com>> [Consultado agosto 2006]

MAQUINARIA ARTES GRAFICAS HARTMANN S.A. Densitometría. [Online]. [Barcelona, España]. URL: <<http://www.hartmann.es>> [Consultado 27 marzo 2007]

MARCHAND, Patrick y HOLLAND, O. Thomas. Graphics and GUI's with MATLAB 7.0. 3a ed. London: CHAPMAN & HALL/CRC, 2003. 489 p.

NDT RESOURCE CENTER, X ray inspection simulation. [Online] URL: <<http://www.ndt-d.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/AdvancedTechniques/xrsim.htm>> [Consultado febrero 2006]

QUINTERO, Norberto y CACERES, Cesar. Elaboración de cartas de exposición radiográfica mediante un proceso de simulación asistida por computador. Bucaramanga, 1992, 200 p. Trabajo de grado [Ingeniero Metalúrgico]. UIS. Facultad de Ingenieras Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

SCHNEEMAN, Justin. Industrial X-ray interpretation. Evanston: Intex Publishing Company, 1968. p 1-143.

SONASPECTION INTERNATIONAL Ltd. Weld flaw radiographs & product showcase. [online]. Lancaster: Sonaspection International Ltd, 2005. URL: <<http://www.sonaspection.com>> [Consultado 15 junio 2006]

STORER, Jay y HYNES, John. The Hynes welding manual: Basics of Gas, Arc, MIC, TIG, and Plasma welding & Cutting. California: Hynes Publishing Group, 1994. 171p.

THE MATHWORKS INC. Getting started with MATLAB 7.0. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. 230 p.

\_\_\_\_\_. Image processing toolbox user's guide. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. 284 p.

\_\_\_\_\_. MATLAB 7.0: Creating graphical user Interfaces. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. 284 p.

\_\_\_\_\_. MATLAB 7.0: Desktop tools and development environment. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. 574 p.

\_\_\_\_\_. MATLAB 7.0: Graphics. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. 623p.

\_\_\_\_\_. MATLAB 7.0: Mathematics. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. p 1-3 a 2-27.

\_\_\_\_\_. MATLAB 7.0: Programming. 5a ed. Natick: The MathWorks Inc, 2005. p 1-3 a 4-68.

WALES, Jimmy y SANGER, Larry. WIKIPEDIA the free encyclopedia. [Online]. [San Diego, Estados Unidos]. URL: <<http://www.en.wikipedia.org>> [Consultado Julio 2006]

## ANEXO A

Todas las exposiciones experimentales se realizaron en el equipo portátil ANDREX, con una distancia fuente-película constante de 70 cm para el acero y 100 cm para el aluminio.

Las exposiciones se hicieron con el haz de radiación en dirección horizontal, colocando detrás de las películas pantallas de plomo de 10 mm de espesor, para evitar radiación dispersa.

El procesamiento de las películas se hizo manualmente bajo condiciones fijas. Se usaron reveladores y fijadores marca Kodak, el tiempo de revelado fue de 5 minutos y el tiempo de fijado de 10 minutos a una temperatura 20 °C. Entre el revelado y el fijado se usó un baño de parada (solución acuosa al 2% de ácido acético), con el fin de neutralizar el revelador remanente en las películas.

El lavado de las películas se realizó en un tanque con agua recirculada por un lapso de tiempo de 10 minutos y el secado de las películas se hizo a temperatura ambiente.

Después del procesado de las películas, las densidades fueron evaluadas por el densitómetro digital (marca Macbeth TD-902).

## ANEXO B

### Plan de exposiciones:

Para el plan de exposiciones experimentales se considera el kilo voltaje del tubo (KV) y la exposición (mA\*min) como variables del proceso, los otros parámetros se establecen como constantes usando los valores indicados en el anexo A.

Para el acero se adoptó la siguiente serie de kilo voltajes:

100 – 110 – 120 – 130 – 140 – 150 – 160 KV

Para cada valor de KV, se tomaron 10 exposiciones, dando como resultado un total de 70 exposiciones. Los siguientes fueron los valores de exposición establecidos:

1 – 2 – 3 – 5 – 7 – 10 – 15 – 20 – 25 – 30 mA\*min

Las condiciones para el aluminio fueron las siguientes:

Serie de kilo voltajes:

60 – 80 – 100 – 120 – 140 – 160 KV

Para cada valor de KV se realizaron 9 exposiciones, para un total de 54 exposiciones. Aquí se emplearon los siguientes valores de exposición:

1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 7 – 9 – 12 – 15 mA\*min

A continuación se presentan dos de las 13 tablas que muestran esta información.

Valores de densidad obtenidos para acero con diferentes exposiciones de prueba a 110 KV

EXP. mA-min	ESPESOR (mm)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>1</b>	2.11	1.12	0.70	0.52	0.41	0.35	0.31	0.29	0.27	0.26	0.25					
<b>2</b>	3.75	1.95	1.16	0.80	0.59	0.47	0.39	0.34	0.31	0.29	0.28	0.26				
<b>3</b>		2.39	1.42	0.95	0.70	0.53	0.44	0.38	0.34	0.31	0.30	0.28	0.27	0.25		
<b>5</b>		3.14	1.78	1.17	0.83	0.63	0.51	0.44	0.4	0.36	0.32	0.30	0.28	0.27	0.25	
<b>7</b>		4.63	2.76	1.79	1.24	0.91	0.71	0.52	0.51	0.42	0.36	0.33	0.30	0.29	0.26	0.25
<b>10</b>			3.31	2.45	1.84	1.21	0.92	0.63	0.58	0.46	0.40	0.36	0.32	0.30	0.28	0.26
<b>15</b>			4.59	3.08	2.04	1.40	1.01	0.77	0.61	0.50	0.42	0.38	0.34	0.32	0.29	0.27
<b>20</b>				4.21	2.80	1.90	1.35	1.00	0.79	0.63	0.53	0.46	0.40	0.36	0.31	0.28
<b>25</b>					3.43	2.33	1.64	1.21	0.92	0.73	0.60	0.50	0.42	0.38	0.34	0.32
<b>30</b>					4.36	2.97	2.09	1.52	1.14	0.84	0.65	0.53	0.45	0.40	0.36	0.34

Valores de densidad obtenidos para acero con diferentes exposiciones de prueba a 110 KV

EXP. mA- min	ESPESOR (mm)																		
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	
1	1.12	0.89	0.73	0.62	0.53	0.46	0.42	0.39	0.37	0.34	0.31	0.28	0.27	0.26	0.25				
2	1.91	1.46	1.16	0.96	0.81	0.69	0.60	0.54	0.48	0.43	0.39	0.35	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25		
3	2.36	1.80	1.41	1.14	0.95	0.76	0.70	0.58	0.52	0.47	0.41	0.39	0.36	0.33	0.30	0.27	0.25		
4	2.72	2.02	1.56	1.25	1.02	0.84	0.74	0.60	0.55	0.49	0.44	0.42	0.39	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25	
5	3.43	2.57	1.93	1.51	1.22	1.00	0.85	0.74	0.64	0.56	0.52	0.46	0.42	0.39	0.36	0.33	0.30	0.28	
7		3.79	2.94	2.14	1.77	1.4	1.04	0.95	0.80	0.66	0.60	0.55	0.50	0.42	0.40	0.37	0.35	0.33	
9		4.04	3.20	2.43	1.92	1.56	1.28	1.06	0.91	0.78	0.68	0.60	0.53	0.48	0.45	0.43	0.41	0.39	
12			4.26	3.37	2.7	2.16	1.77	1.44	1.24	1.03	0.88	0.71	0.67	0.59	0.55	0.49	0.45	0.42	
15				3.65	2.96	2.32	1.95	1.55	1.31	1.10	0.97	0.84	0.75	0.67	0.62	0.57	0.55	0.50	