

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **MODELOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE WPS, PQR Y WPQ DE TUBERÍA API 5L X70 DE TRANSPORTE DE CRUDO.**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**NELSON OSWALDO REMACHE VALVERDE**

nelson.remache@epn.edu.ec

**Director: CARLOS FABIÁN ÁVILA VEGA, Ph.D.**

cavila67@yahoo.com

**Quito, Febrero 2016**

© Escuela Politécnica Nacional (2016)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Nelson Oswaldo Remache Valverde, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría: que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente

---

Nelson Oswaldo Remache Valverde

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Nelson Oswaldo Remache Valverde, bajo mi supervisión

**Carlos Fabián Ávila Vega, PhD**  
**Director del Proyecto**

## **AGRADECIMIENTOS**

Un especial agradecimiento al Ing. Sergio López Director de Operaciones y al Ing. Pedro Jaya Supervisor de Integridad de Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) por brindar su apoyo para la aprobación y asignación de recursos por parte de OCP para la elaboración de este proyecto.

A mis colegas Fabricio Romero, Boris Pillajo, Pablo Albán y Byron Freire quienes de una u otra forma generosamente me extendieron su mano durante la realización de este proyecto.

Al Ing. Gabriel Velasteguí por facilitar el uso del laboratorio y por sus aportes

Al director por sus revisiones.

## **DEDICATORIA**

A mi Padre Oswaldo Remache, a mi madre María Valverde y a mi hermana  
Gloria Remache

Nelson R.

## CONTENIDO

<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.3 ALCANCES .....	4
1.4 METODOLOGÍA .....	4
1.4.1 ACTIVIDAD 1: RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS.....	4
1.4.2 ACTIVIDAD 2: IDENTIFICAR LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL SISTEMA PARA EL MODELAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.4.3 ACTIVIDAD 3: MUESTREO DE LOS DATOS .....	5
1.4.4 ACTIVIDAD 4: PROPONER UN MODELO BASADO EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES .....	5
1.4.5 ACTIVIDAD 5: VALIDAR RESULTADOS .....	5
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>6</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	6
2.2 UNIÓN DE MATERIALES POR SOLDADURA .....	6
2.2.1 DEFINICIONES GENERALES .....	6
2.2.2 SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW).....	11
2.2.3 SÍNTESIS DE LA NORMA API 1104 (2005).....	16
2.2.4 SÍNTESIS DE LA NORMA API 5L (2014).....	18
2.3 REDES NEURONALES ARTIFICIALES .....	19
2.3.1 MODELAMIENTO DE LA NEURONA ARTIFICIAL .....	19

2.3.2	ARQUITECTURA DE PERCEPTRÓN.....	21
2.3.3	ARQUITECTURA ADELINÉ .....	23
2.3.4	ARQUITECTURA DEL PERCEPTRÓN MULTICAPA .....	25
<b>CAPITULO 3</b>	.....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS .....</b>	<b>36</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	36
3.2	METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS.....	36
3.2.1	ACTIVIDAD 1: ELABORACIÓN DEL FORMATO DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS .....	36
3.2.2	ACTIVIDAD 2: ELABORACIÓN DE LA SOLDADURA SEGÚN EL FORMATO WPS .....	37
3.2.3	ACTIVIDAD 3: ELABORACIÓN DEL FORMATO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR).....	37
3.2.4	ACTIVIDAD 4: ELABORACIÓN DE ENSAYOS ESTABLECIDOS EN PQR .....	37
3.2.5	ACTIVIDAD 5: PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS .....	37
3.3	ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS) .....	37
3.3.1	MATERIAL BASE .....	37
3.3.2	METAL DE APORTE PARA TUBERÍA API 5L X 70.....	38
3.3.3	ESQUEMATIZACIÓN DE LA JUNTA .....	39
3.3.4	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO .....	39
3.3.5	PARÁMETROS DEL WPS .....	40
3.3.6	ELABORACIÓN DEL FORMATO (WPS) .....	40
3.3.7	CODIFICACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS .....	42
3.4	ELABORACIÓN DE LA SOLDADURA SEGÚN WPS .....	43
3.4.1	EQUIPO DE SOLDADURA .....	43
3.4.2	PREPARACIÓN DE LA JUNTA.....	44



3.4.3	UBICACIÓN DE LA POSICIÓN DE SOLDADURA.....	44
3.4.4	PRECALENTAMIENTO.....	45
3.4.5	REALIZACIÓN DE LOS PASES DE SOLDADURA.....	45
3.5	REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) .....	46
3.6	ELABORACIÓN DE ENSAYOS ESTABLECIDOS EN EL PQR.....	47
3.6.1	ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS.....	47
3.6.2	REALIZACIÓN DE ENSAYOS.....	48
3.7	DATOS OBTENIDOS.....	49
3.7.1	DATOS CON LOS QUE SE REALIZA EL PROCESO DE SOLDADURA.....	50
3.7.2	DATOS OBTENIDOS DEL CORDÓN DE SOLDADURA .....	55
<b>CAPITULO 4</b>	.....	<b>61</b>
<b>4</b>	<b>MODELAMIENTO DEL CASO POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)</b> .....	<b>61</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	61
4.2	METODOLOGÍA .....	61
4.2.1	ACTIVIDAD 1: DEFINIR VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA RNA .....	61
4.2.2	ACTIVIDAD 2: DETERMINAR ESTRUCTURA DE LA RNA.....	61
4.2.3	ACTIVIDAD 3: PROCESAMIENTO DE DATOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	62
4.3	VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA RNA.....	62
4.3.1	PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL SISTEMA DE UNIÓN POR SOLDADURA.....	62
4.3.2	VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA.....	63
4.4	ESTRUCTURA DE LA RNA.....	64
4.4.1	TIPO DE APRENDIZAJE.....	64
4.4.2	ARQUITECTURA DE LA RNA.....	65

4.4.3	REGLA DE APRENDIZAJE .....	66
4.5	PROCESAMIENTO DE DATOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....	67
4.5.1	DATOS DE ENTRENAMIENTO Y DATOS DE VALIDACIÓN.....	67
4.5.2	NUMERO ÓPTIMO DE NEURONAS .....	67
4.5.3	VALIDACIÓN DE MODELOS .....	72
<b>CAPITULO 5</b>	.....	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>77</b>
5.1	WPS PARA TUBERÍA API 5L X 70.....	77
5.2	ANÁLISIS DE LOS MODELOS .....	77
5.3	PRECALIFICACIÓN.....	77
<b>CAPITULO 6</b>	.....	<b>78</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>78</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	78
6.2	RECOMENDACIONES .....	79
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>80</b>
<b>APÉNDICE</b>	.....	<b>82</b>
<b>APÉNDICE 1: ALGORITMO DE RETROPROPAGACIÓN</b>	.....	<b>83</b>
<b>APÉNDICE 2: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN R.</b>	.....	<b>98</b>
<b>ANEXOS</b>	.....	<b>103</b>
ANEXO 1: CATALOGO DE ELECTRODOS LINCOLN ELECTRIC.....		104
ANEXO 2: WPS CALIFICADO.....		105
ANEXO 3: PQR SOPORTE .....		106
ANEXO 4: WPQ DE PRECALIFICACIÓN .....		107
ANEXO 5: ENSAYOS REALIZADOS .....		108

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Polaridad .....	7
<b>Figura 2.2:</b> Partes principales de la unión por soldadura .....	8
<b>Figura 2.3:</b> Tipos de juntas más comunes .....	8
<b>Figura 2.4</b> Tipos de bisel más comunes .....	9
<b>Figura 2.5</b> Tipos de cordón de soldadura .....	9
<b>Figura 2.6</b> Posiciones de soldadura para tubería .....	10
<b>Figura 2.7</b> Representación esquemática del proceso SMAW.....	12
<b>Figura 2.8</b> Relación entre voltaje y longitud de arco.....	12
<b>Figura 2.9</b> Identificación de tipos de electrodos.....	14
<b>Figura 3.1</b> Niples de material base .....	38
<b>Figura 3.2</b> Junta para API 5L X 70 .....	39
<b>Figura 3.3</b> División de la tubería para codificación .....	42
<b>Figura 3.4</b> Equipo de soldadura por arco INVERTEC V350-PRO .....	43
<b>Figura 3.5</b> Preparación de la junta.....	44
<b>Figura 3.6</b> Posición 6G .....	45
<b>Figura 3.7</b> Pre calentamiento para la realización de la soldadura .....	45
<b>Figura 3.8</b> Elaboración del cordón de soldadura .....	46
<b>Figura 3.9</b> Obtención de las probetas de ensayo .....	48
<b>Figura 3.10</b> Máquina universal de ensayos de recopilación de datos a) y b) ..	49
<b>Figura 3.11</b> Parámetros geométricos del cordón de soldadura .....	50
<b>Figura 4.1</b> Función objetivo y función hipótesis .....	65

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación de electrodos AWS .....	14
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades químicas PSL 2 para API 5L X 70.....	18
<b>Tabla 2.3</b> Propiedades mecánicas PSL 2 para API 5L X 70 .....	18
<b>Tabla 3.1</b> Características del material base .....	38
<b>Tabla 3.2</b> Propiedades químicas de E8010-P1 .....	38
<b>Tabla 3.3</b> Rangos de corriente y polaridad para los electrodos a utilizar .....	39
<b>Tabla 3.4</b> Especificaciones técnicas INVERTEC V350-PRO .....	44
<b>Tabla 3.5</b> Características de las máquinas utilizadas .....	49
<b>Tabla 3.6</b> Valores de los parámetros del WPS .....	50
<b>Tabla 3.7</b> Datos de los parámetros del cordón de soldadura.....	55

## RESUMEN

En este proyecto de titulación se propone el modelamiento del sistema de unión por soldadura SMAW para la tubería API 5L X-70 mediante el uso de las herramientas de inteligencia artificial, como es el caso específico de las Redes Neuronales Artificiales (RNA). Este modelo permitirá analizar la interacción de las variables de soldadura involucradas, las mismas que constan en los documentos WPS, PQR y WPQ según la especificación API 1104.

En concreto, este modelo que aproxima el sistema de unión por soldadura permitirá a la industria del petróleo:

- 1) Encontrar el dominio para los valores de los parámetros con que se realiza la soldadura.
- 2) Determinar con anterioridad características relevantes del cordón de soldadura a través de la predicción.
- 3) Constituir una herramienta de precalificación de soldadores.

Estudios previos muestran la aplicación de redes neuronales artificiales en el área de soldadura. Por ejemplo: K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian (2008), Y. K. Yousif, K. M. Daws & B. I. Kazem (2008), Abdullah Al-Faruk, et al. (2010), Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir (2011), Singh, et al. (2012), S. W. Campbell, A. M. Galloway & N.A. McPherson (2012), Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada (2013), Mohsen Ghofrani, Hamid Shahabi & Farhad Kolahan (2014), I. U Abhulimen & J.I. Achevo (2014). Sin embargo, la literatura revisada no muestra la aplicación de RNA a la unión por soldadura de tubería de transporte de crudo según especificaciones de la normativa que aplica para este proceso. Por lo tanto, se justifica la propuesta que se plantea en esta investigación y se espera reacciones positivas en las industrias que trabajen con este material.

Los datos experimentales son la parte fundamental de esta investigación ya que estos portan la información relevante del sistema. Por lo tanto, se establece una metodología que facilita la realización de esta actividad. Siguiendo la metodología planteada, se elabora los documentos de soldadura WPS y PQR según la norma API 1104, el proceso experimental y la

elaboración de las probetas para ensayos se realiza con personal calificado en procesos similares, los ensayos son realizados bajo la supervisión de personal técnico calificado por lo que se garantiza la confiabilidad de los datos. Además, durante este proceso de obtención de datos se califica el WPS con su respectivo PQR.

El modelamiento sigue una metodología y de acuerdo a la literatura revisada se plantea dos modelos de RNA:

- 1) modelo de RNA1 para predecir parámetro mecánico de resistencia a la tracción
- 2) modelo de RNA2 para predecir parámetros geométricos.

Los modelos planteados corresponden a una arquitectura de tipo perceptrón multicapa y son entrenados bajo un algoritmo de aprendizaje de tipo supervisado denominado retropropagación. Se utiliza el método de validación cruzada simple para validar los modelos y se establece una precisión  $\varepsilon = 10\%$  para el error relativo porcentual que ayudara a decidir si el modelo es un buen aproximador o no. Como resultado concluyente se tiene el modelo de RNA1 como representativo del sistema, donde la resistencia a la tracción es una característica determinante del cordón de soldadura. El formato PQR que se plantea junto con el modelo de RNA1 representa una herramienta para precalificación de soldadores.

## ABSTRACT

The main aim in this project is to develop a model of a SMAW joint welding system for API 5L X 70 pipes by artificial intelligence tools. Particularly, Artificial Neuronal Networks (ANN) are used. This model is important to analyze the interaction between welding variables which are involved in technical sheets like WPS, PQR and WPQ by the standard API 1104.

Specifically, this model will contribute to the petroleum industry with the next items:

- 1) The parameters of the domain that are used in welding are found.
- 2) The most important characteristics of the welding cord are predicted
- 3) A prequalification welders tool is built.

Previous investigations show the application of RNA in welding. For instance: K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian (2008), Y. K. Yousif, K. M. Daws & B. I. Kazem (2008), Abdullah Al-Faruk, et al. (2010), Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir (2011), Singh, et al. (2012), S. W. Campbell, A. M. Galloway & N.A. McPherson (2012), Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada (2013), Mohsen Ghofrani, Hamid Shahabi & Farhad Kolahan (2014), I. U Abhulimen & J.I. Achevo (2014). Moreover, the bibliography reviewed doesn't describe the application of RNA on petroleum pipe transport applications. Thus, the proposal exposed in this project is justified and positive reactions are expected by the industries where this material is employed.

The experimental data are fundamental to reach the objectives in this investigation because they provide with the basic information to build the mathematical model. So, a methodology that makes easier this activity is established. WPS and PQR by the standard API 1104 are taken as reference. The test specimens and experimental process are develop and supervised by qualified professionals who have worked in similar areas before so the high performance is guaranteed. Also, while this process was done the WPS was qualified with its PQR.

The modeling follows a methodology and according to the literature reviewed two RNA models are established.

RNA Model 1: Predicts the tensile strength

RNA Model 2: Predicts geometrical parameters

The models showed belong to a multilayer perceptron type architecture that are trained by a retropropagation algorithm. To validate the results the simple cross-validation method is used. A  $\varepsilon=10\%$  precision is established to decide whether or not the model works properly. In conclusion, the RNA 1 model is a representative approximation of the system, where the tensile strength is a dominant characteristic of the welding cord. The PQR form related with the RNA 1 model is an important tool to welders prequalification.



## CAPITULO 1

### 1 INTRODUCCIÓN

#### 1.1 JUSTIFICACIÓN

En el campo petrolero la unión por soldadura de tubería en la construcción de oleoductos es un tema abierto a la investigación científica y tecnológica en el que se proponen métodos y procedimientos eficientes que ayuden a controlar y minimizar los riesgos de falla durante su operación, ya que este hecho ocasiona efectos negativos tanto a nivel económico social y ambiental del país, razón por el cual es necesario controlar los parámetros del proceso de soldadura.

Los procesos de soldadura más utilizados para la unión de tubería en la construcción de oleoductos son: soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido (SMAW), soldadura eléctrica por arco con electrodo de tungsteno bajo la protección de gas (GTAW) y soldadura eléctrica por arco con alambre sólido y bajo la protección de gas (GMAW).

En la actualidad para garantizar que estos procesos sean realizados de manera correcta se tiene tres documentos que garantizan la confiabilidad del procedimiento, y estos documentos son: Especificación del Proceso de Soldadura (WPS), Registro de Calificación del Procedimiento (PQR) y el Registro del Desempeño del Soldador (WPQ). De estos tres documentos depende que la unión de materiales por soldadura cumpla los requerimientos, los mismos que están sujetos al cumplimiento de normas según el tipo de soldadura, para el caso de la soldadura de oleoductos se tiene la norma API 1104, la práctica ha dejado en evidencia que las variables determinantes de estos documentos están interrelacionadas de tal forma que si se alteran uno de ellos los demás también cambian, es así que, encontrar los valores óptimos entre estas variables implica tiempo y dinero por las pruebas y ensayos que se deben realizar.

El presente estudio propone el modelamiento del sistema que permite la unión por soldadura para un material específico, mediante la aplicación de

inteligencia artificial el mismo que permitirá encontrar la relación que poseen estas variables para el proceso SMAW.

Estudios similares en donde se han obtenido buenos resultados en procesos de soldadura se puede mencionar los siguientes:

K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian (2008) utilizaron una RNA multicapa entrenada con el algoritmo de retropropagación para predecir el esfuerzo de tracción partiendo de las variables velocidad de rotación, velocidad de soldadura y fuerza axial del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) para aleación de aluminio AA7039 que corresponde a la serie 7xxx el cual es considerado insoldable por procesos convencionales de soldadura por fusión debido a la dificultad de encontrar la correlación óptima entre los parámetros de soldadura, mientras que Y. K. Yousif, K. M. Daws & B. I. Kazem (2008) presentan una RNA multicapa entrenada con dos algoritmos diferentes que son: algoritmo de Lavenber-Marquardt y el algoritmo de gradiente descendente con momento para la predicción de esfuerzo de tracción, límite elástico y elongación, partiendo únicamente de las variables velocidad de soldadura y velocidad de rotación de la herramienta para el mismo proceso (FSW) aplicado en la soldadura de láminas de aluminio. Abdullah Al-Faruk, et al. (2010) utilizan una RNA multicapa entrenada con el algoritmo de retropropagación para predecir el ancho y la profundidad de penetración del cordón de soldadura partiendo de las variables diámetro del electrodo, intensidad de corriente, voltaje y velocidad de alimentación del electrodo para el proceso de soldadura eléctrica por arco (AW) en láminas de acero suave, Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir (2011) utilizan una RNA multicapa entrenada con el algoritmo de retropropagación para la predicción de las características geométricas tales como: ancho del cordón (FW), sobremonta (FH), penetración (BH) y ancho de raíz (BW), partiendo de las variables velocidad de soldadura, intensidad de corriente, voltaje y flujo de gas para el proceso GTAW en acero HSLA; R. P. Singh, et al. (2012) utilizan una RNA entrenada con el algoritmo retropropagación para predecir la profundidad de penetración del cordón de soldadura de los procesos de soldadura eléctrica por arco (AW) en placas de acero, partiendo de las variables de entrada corriente, voltaje, velocidad de soldadura y campo magnético; S. W. Campbell, A. M.

Galloway & N.A. McPherson (2012) hacen uso del software *Neuro Solution* para predecir los variables geométricas como espesor de garganta efectiva y longitud de pierna del cordón tipo filete del proceso de soldadura GMAW con protección alternante de gas para la soldadura de acero DH36, Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada (2013) utilizan una RNA multicapa entrenada con los algoritmos de retropropagación y Lavenber-Marquardt para encontrar las variables geométricas ancho de cordón (FW) y penetración (BH) de soldadura en el proceso micro láser para juntas miniaturizadas de partes metálicas de acero Stailless Steel SUS304 teniendo como entradas la potencia del láser, velocidad de escaneo y diámetro de punto del láser; Mohsen Ghofrani, Hamid Shahabi & Farhad Kolahan (2014) utilizan una RNA para predecir las variables de soldadura en el proceso MIG usando datos acústicos obtenidos de ensayos no destructivos (END), I. U Abhulimen & J.I. Achevo (2014) utilizan una RNA entrenada con los algoritmos de retropropagación y Lavenber-Marquardt para predecir la resistencia a la tracción, limite elástico y deformación en la soldadura obtenida por el proceso GTAW en tubería de acero suave. Mientras que Amit Kumar, Vikas Chauhan & Ankur Singh Bist (2013) indican el rol que desempeña los modelos de RNA en la tecnología de soldadura.

La literatura revisada no indica aplicaciones de redes neuronales artificiales (RNA) para el análisis y simulación de las variables que intervienen en los documentos WPS, PQR y WPQ para la unión por soldadura de tubería API 5L X70 de transporte de crudo.

Es así que dentro de este escenario surge la siguiente interrogante: **¿Será posible encontrar un modelo de inteligencia artificial que permita simular la interacción de los parámetros que conforman el sistema de unión por soldadura para tubería API 5L X70 mediante el proceso SMAW?**

## **1.2 OBJETIVOS**

El dar respuesta a la interrogante que justifica esta investigación permitirá alcanzar los siguientes objetivos:

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Probar modelos de redes neuronales para el análisis y simulación de WPS, PQR y WPQ de tubería API 5L X70 de transporte de crudo.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Revisar conceptos y normativa para la realización de la soldadura de tubería de oleoductos.
- 2) Revisar conceptos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) como una herramienta de inteligencia artificial para el análisis de datos.
- 3) Obtener datos experimentales a través de los documentos WPS y PQR acorde a los criterios de la norma API 1104.
- 4) Probar modelos de Redes Neuronales Artificiales que aproximen el sistema de unión por soldadura de tubería API 5L X-70 para el proceso SMAW.

## **1.3 ALCANCES**

- 1) Este estudio es aplicable específicamente a la unión por soldadura de tubería API 5L X-70 por el proceso SMAW según la norma API 1104.
- 2) Se usa lenguaje de programación R para el modelamiento del sistema por RNA.

## **1.4 METODOLOGÍA**

Para alcanzar el objetivo planteado en este estudio se realiza las siguientes actividades:

### **1.4.1 ACTIVIDAD 1: RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS**

Los datos experimentales son los requisitos principales para la realización de este estudio ya que estos proveerán información del comportamiento propio del sistema de la unión por soldadura de la tubería API 5L X70 por el proceso SMAW.

#### **1.4.2 ACTIVIDAD 2: IDENTIFICAR LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL SISTEMA PARA EL MODELAMIENTO DEL PROBLEMA**

En base a los datos obtenidos se establece los parámetros involucrados en el sistema de unión por soldadura.

#### **1.4.3 ACTIVIDAD 3: MUESTREO DE LOS DATOS**

Se realiza un muestreo de los datos obtenidos, dividiéndolos en dos grupos: 1) datos de entrenamiento; 2) datos prueba.

#### **1.4.4 ACTIVIDAD 4: PROPONER UN MODELO BASADO EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES**

Se realiza la búsqueda de la arquitectura de RNA óptima que modela el sistema para un algoritmo o algoritmos de aprendizaje específicos.

#### **1.4.5 ACTIVIDAD 5: VALIDAR RESULTADOS**

Con el grupo de datos de prueba se realiza la validación de la RNA, para este efecto, los resultados obtenidos de la RNA correspondientes a las variables del vector de entrada se compara con los resultados experimentales, determinando de esta forma el margen de error relativo porcentual que indicará si el modelo es un buen aproximador o no.

## **CAPITULO 2**

### **2 MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta una síntesis de lo que es la unión de materiales por soldadura, específicamente se habla sobre el proceso de soldadura eléctrica por arco con electrodo revestido SMAW que se aplicará para la unión de tubería API 5L X70 la misma que deberá cumplir los requisitos establecidos por la norma API 1104. También se presenta una síntesis sobre redes neuronales artificiales (RNA) que son la herramienta de inteligencia artificial a utilizar. Se inicia con definiciones generales de los documentos de soldadura WPS, PQR y WPQ y los elementos constitutivos de la unión por soldadura con arco eléctrico. Luego se establece los parámetros determinantes del proceso de soldadura SMAW y se brinda información sobre sus componentes principales. Posteriormente se describe una síntesis de la norma API 1104 que provee las especificaciones para la soldadura de tubería de oleoductos. Luego se presenta una síntesis sobre la especificación API 5L que indica los requerimientos que deben cumplir los materiales con esta especificación y finalmente se definen las generalidades sobre redes neuronales artificiales (RNA).

#### **2.2 UNIÓN DE MATERIALES POR SOLDADURA**

##### **2.2.1 DEFINICIONES GENERALES**

###### **2.2.1.1 SOLDADURA**

Se define la soldadura como: un proceso de unión por una coalescencia localizada de metales o no metales, producido por el calentamiento de los materiales hasta la temperatura de soldadura con o sin la aplicación de presión y con el uso o no de material de aporte (ANSI/AWS A3.0,1994).

###### **2.2.1.2 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)**

Es el formato en el que se detallan todas las variables necesarias y suficientes para realizar una soldadura, esta indica al soldador ajustar todos los

parámetros de soldadura sin dejar nada a libre interpretación. Además, para que sea considerado aceptable este debe ser calificado por un PQR.

### 2.2.1.3 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR)

Es un formato en el que se especifican los resultados de los ensayos realizados a las probetas de soldadura para el correspondiente WPS, las formas y dimensiones de estas probetas están dadas por los estándares internacionales de soldadura dependiendo del caso específico al que se refiera.

### 2.2.1.4 CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR (WPQ)

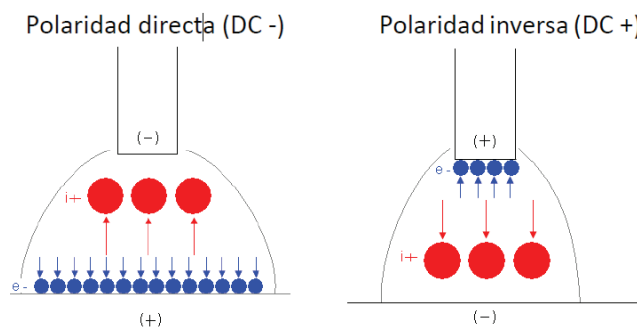
Es un formato donde se especifican los resultados de las pruebas realizadas a la junta soldada para determinar la habilidad del soldador para hacer soldaduras de buena calidad, para aplicar el WPQ se debe utilizar un WPS previamente calificado.

### 2.2.1.5 ARCO ELÉCTRICO

Es el paso de la corriente eléctrica entre dos polos de diferente carga acompañado de un gran desprendimiento de energía en forma de calor y luz.

### 2.2.1.6 SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

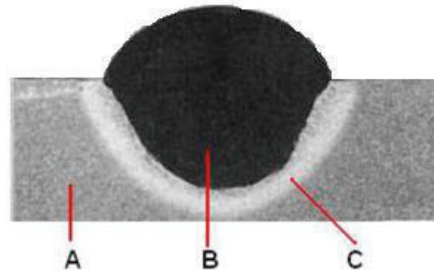
Es el transcurso estable y controlado del arco eléctrico en el que se aprovecha la liberación de energía para realizar la soldadura. El arco se estabiliza cuando los electrones emitidos por uno de los polos fluyen a través del plasma ionizado al otro polo, fundiendo el material sólido que los conecta por la liberación de energía en forma de calor. El polo con carga positiva se le conoce como cátodo y el polo con carga negativa como ánodo. Además, la dirección en que fluyen los electrones define la polaridad tal como muestra la figura 2.1 donde el máximo calentamiento del material base se obtiene en polaridad DC+.



**Figura 2.1:** Polaridad

### 2.2.1.7 UNIÓN DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

En la unión por soldadura se identifican tres partes principales tal como indica la siguiente figura 2.2:



**Figura 2.2:** Partes principales de la unión por soldadura

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-1)

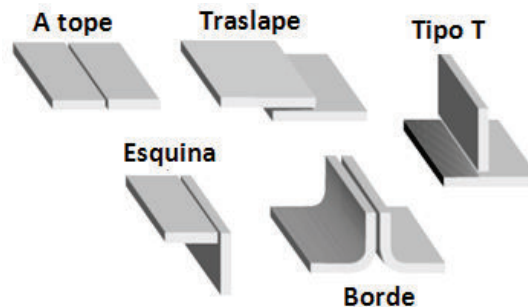
Donde: A es el material base que forma la junta de soldadura.

B es el cordón de soldadura formado por el material de aporte.

C zona afectada por el calor.

### 2.2.1.8 JUNTAS PARA SOLDADURA CON MATERIAL DE APORTE

Son las diferentes disposiciones en que se arreglan y orientan las partes a ser soldadas para obtener comodidad y seguridad, “existen 5 estilos básicos de juntas (ver figura 2.3): la junta a traslape, junta a tope, junta de esquina, junta de brida o borde y la junta en T (Henry Hortwitz, 1976, p 16).



**Figura 2.3:** Tipos de juntas más comunes

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-1)

### 2.2.1.9 BISEL

Es el tipo de borde con el cual se prepara una junta para realizar una soldadura por arco eléctrico, es decir, es la forma geométrica del material base donde se aplica el material de aporte que forma el cordón de soldadura. Los biseles más



comunes se muestran en la figura 2.4, se puede encontrar un número mayor de tipos de bisel (Henry Hortwitz, 1976, p 20-23).

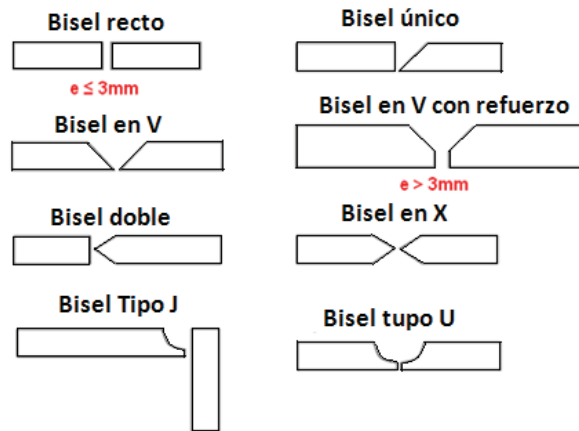


Figura 2.4 Tipos de bisel más comunes

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-1)

### 2.2.1.10 CORDÓN DE SOLDADURA

Es el depósito del material de aporte que forma la unión por el efecto térmico de los materiales en cuestión, los principales tipos de cordones de soldadura se indica en la figura 2.5.

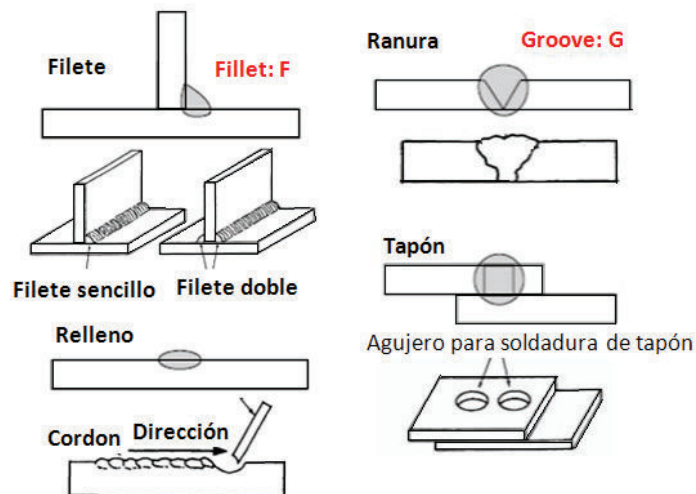


Figura 2.5 Tipos de cordón de soldadura

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-1)

### 2.2.1.11 POSICIONES DE SOLDADURA

Se define como las diferentes ubicaciones que puede adoptar el soldador respecto a la junta soldada para realizar un cordón de soldadura, para el caso de soldadura de tuberías se tiene las posiciones dadas por la figura 2.6.

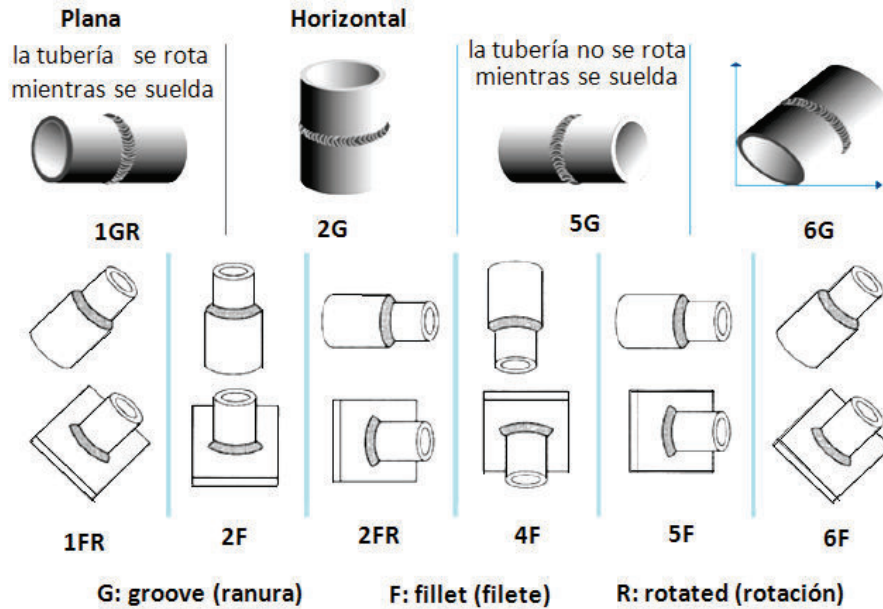


Figura 2.6 Posiciones de soldadura para tubería

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-1)

### 2.2.1.12 PRE CALENTAMIENTO Y POS CALENTAMIENTO

El pre calentamiento y pos calentamiento se realiza con el propósito de evitar el temple en el cordón de soldadura por efecto del enfriamiento brusco minimizando de esta manera la posibilidad de agrietamiento en la unión por soldadura. El precalentamiento debe ser indispensable cuando se está trabajando con material base de espesor considerable ya que este al no ser pre calentado absorberá una gran cantidad de energía térmica produciendo el efecto de enfriamiento brusco en la unión de soldadura. Por otro lado, el pos calentamiento será aplicable cuando se requiera modificar u obtener un tipo de estructura específica de la unión soldada.

Para calcular la temperatura de precalentamiento se establece la siguiente ecuación (Henry Hortwitz, 1976, p 520):

$$T = 630 \left( \sqrt{[C]_r} - 0.25 \right)^{1/2} + 32 [^{\circ}F] \quad (2.1)$$

Donde:  $[C]_r$  es el carbono equivalente total.

El carbono equivalente total está dado por:

$$[C]_r = [C]_c [C]_r \quad (2.2)$$

Donde:  $[C]_c$  es el equivalente químico en carbono del acero.

$[C]_r$  Es el equivalente en carbono para el espesor de la placa.

Y el equivalente en carbono para el espesor de la placa está dado por:

$$[C]_r = [1 + 0.005(\text{espesor} [mm])] \quad (2.3)$$

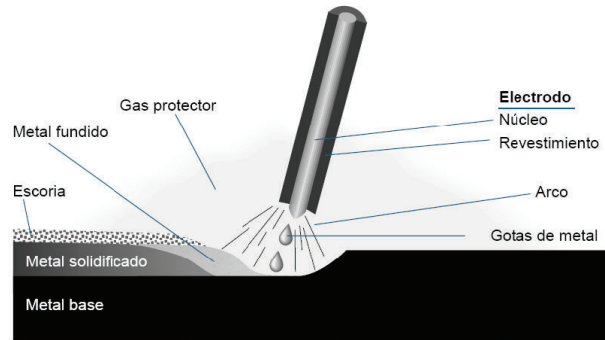
### **2.2.1.13 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END) Y ENSAYOS DESTRUCTIVOS (ED)**

Los ensayos no destructivos de manera general son aquellos que luego de realizarlos no cambian de manera permanente las propiedades físicas y químicas de un determinado material, la realización de estos ensayos implica la aplicación de leyes físicas y químicas como por ejemplo la acústica que provee una técnica llamada ultrasonido, la óptica que también provee una técnica llamada difracción de rayos X etc. Los métodos de ensayos no destructivos aplicables a la soldadura y la manera de realizarlos generalmente están especificados en los estándares de la soldadura en análisis. Por otro lado los ensayos destructivos de forma general son aquellos en que luego de realizar el ensayo cambian de manera permanente las propiedades del material ya sean físicas o químicas, estos ensayos destructivos se realiza con el propósito de determinar los valores límites de determinada propiedad del material por lo que se aplica las leyes físicas que permiten medir determinada propiedad, de igual forma los métodos de ensayos destructivos aplicables a la soldadura y la manera de realizarlas está especificado en los estándares referentes a la soldadura en análisis.

### **2.2.2 SOLDADURA ELÉCTRICA POR ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)**

#### **2.2.2.1 DEFINICIÓN**

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) es un proceso en el que se produce coalescencia de metales por el aprovechamiento de la energía liberada en forma de calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo revestido y la superficie del metal base, esquemáticamente este proceso se representa según la siguiente figura 2.7:



**Figura 2.7** Representación esquemática del proceso SMAW

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-5)

### 2.2.2.2 PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO SMAW

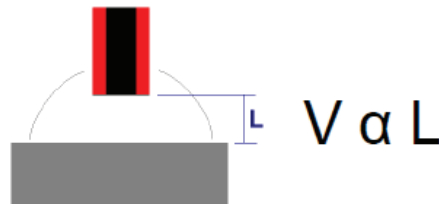
Estos parámetros determinan las características geométricas, físicas y químicas del cordón de soldadura, siendo estas variables las siguientes:

#### 1) Corriente de Soldadura (I)

La corriente debe ser suficiente para obtener una buena fusión y penetración, sin perder el control del charco de soldadura. Además, para un tipo específico de tamaño del electrodo, el amperaje óptimo depende de varios factores como la posición de soldadura, el tipo de unión y la rapidez de aportación del material. Se tiene dos tipos de corriente que son la corriente continua DC y corriente alterna AC.

#### 2) Voltaje de Arco Eléctrico (V)

El voltaje de arco está directamente relacionado con la longitud del arco (ver figura 2.8) y en general esta longitud no debe exceder el diámetro del núcleo del electrodo.



**Figura 2.8** Relación entre voltaje y longitud de arco

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-5)

#### 3) Velocidad de Soldadura (S)

Es la rapidez con que se realiza el depósito del material de aporte a lo largo de la junta, esta depende de varios factores como: tipo de corriente de soldadura,

amperaje y polaridad, posición de soldadura, rapidez de fusión del electrodo, espesor del material, condición de la superficie del metal base, tipo de junta y tipo de bisel.

### **2.2.2.3 MATERIAL DE APORTE PARA EL PROCESO SMAW**

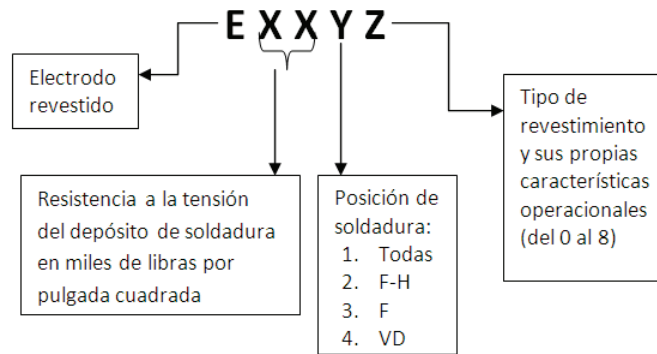
El electrodo revestido es una varilla metálica de acero al carbono rodeada con una capa de material llamado revestimiento, según la naturaleza del material de revestimiento se conoce industrialmente tres tipos: Básico, que contiene en su revestimiento mayor proporción calcio o calcita; Rutílico, el cual posee un alto contenido de rutilo (dióxido de titanio); Celulósico, cuyo revestimiento está compuesto principalmente por combustible de materia orgánica (celulosa).

Entre las principales Funciones del revestimiento del electrodo se puede mencionar:

- Provee al arco una atmosfera protectora y evita una contaminación excesiva del metal de aporte derretido.
- Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de los granos en el metal de soldadura (Si, Mn).
- Establece las características eléctricas del electrodo y estabilizar el arco de soldadura (NA, K, Ca).
- Proporciona un manto de escoria que protege el metal depositado del aire y mejorar las propiedades mecánicas.
- Construye un medio para añadir elementos de aleación que modifican las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

### **2.2.2.4 CLASIFICACIÓN AWS DE LOS ELECTRODOS REVESTIDOS**

Los diámetros y longitudes estandarizados para los electrodos usados en el proceso SMAW varían en los rangos de 1.6 a 8 mm y de 225 a 450 mm respectivamente, la AWS A5.1 (2006) ha establecido un sistema para identificar y clasificar los diferentes tipos de electrodos, a continuación se presenta esta identificación de manera simplificada:



**Figura 2.9** Identificación de tipos de electrodos

(Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-5)

Según el tipo de recubrimiento, corriente y polaridad se tiene la siguiente tabla de electrodos:

**Tabla 2.1** Clasificación de electrodos AWS

YZ	TIPO DE REVESTIMIENTO	TIPO DE CORRIENTE
10	Celulósicos	DC+
11		AC, DC+
12	Rutílicos	AC,DC-
13		AC,DC-,DC+
15	Bajo hidrogeno (básico)	DC+
16		AC,DC+
18		AC,DC+
28		AC,DC+
48		AC,DC+

Facultad de Ingeniería Mecánica EPN, Laboratorio de Soldadura, practica N°-5.

### 2.2.2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS

Los tipos de revestimientos mencionados en 2.2.2.3 presentan las siguientes características:

#### 1) Revestimiento tipo celulósico:

- Espesor del revestimiento mediano o delgado
- Genera gotas de medianas a grandes
- Se puede soldar en todas las posiciones

- Se consigue buena penetración
- Poca formación de escoria y de difícil remoción

**Aplicación:**

- Soldadura de juntas difíciles de alinear tal como estructuras rígidas y tuberías

**2) Revestimiento Rutílico**

- El espesor del revestimiento es mediano o grueso pocas veces es delgado
- Genera gotas gruesas cuando el revestimiento es delgado, mediano cuando el revestimiento es mediano, y pequeñas cuando el revestimiento es grueso
- Se puede soldar en todas las posiciones
- La penetración es mediana
- Escoria densa de distribución uniforme y fácil remoción

**Aplicación:**

- Con revestimiento delgado se utiliza para soldar espesores delgados y los revestimientos medianos o gruesos para rellenar

**3) Recubrimiento tipo básico**

- Generalmente el revestimiento es grueso
- Las gotas son de tamaño mediano
- Se puede soldar en todas las posiciones
- Baja penetración
- Forman cordones libres de poros y fisuras por su bajo  $H_2$
- Su escoria es densa de aspecto marrón

**Aplicaciones**

- Soldadura de acero de bajo carbono en espesores gruesos
- Para aceros de baja aleación
- Para aceros medio y alto contenido de carbono

### **2.2.3 SÍNTESIS DE LA NORMA API 1104 (2013)**

#### **2.2.3.1 ALCANCE DE LA NORMA API 1104**

La norma cubre la soldadura por arco eléctrico y gas de juntas a tope y de filete para tuberías de acero al carbono de baja aleación utilizadas en compresión, bombeo y transporte de hidrocarburos, es aplicable para construcciones nuevas y para aquellas que se encuentran en servicio. Además, cubre los procedimientos para la realización de ensayos ED y END, así también como los requisitos de aceptación para ser aplicados a la producción. Por lo tanto, todo trabajo realizado de acuerdo a esta norma debe reunir o exceder los requerimientos establecidos

#### **2.2.3.2 ESPECIFICACIONES**

##### **Equipamiento**

Los equipos de soldadura deben estar en óptimas condiciones de tal forma que garanticen su buen desempeño y seguridad al operario durante la elaboración de la soldadura.

##### **Materiales**

Este estándar es aplicable a la soldadura de tuberías que conforman las especificaciones API 5L y ASTM aplicables.

##### **Material de aporte**

Los materiales de aporte deben estar según estándar AWS.

##### **Especificación del procedimiento WPS**

En la especificación del procedimiento se debe incluir información específica como:

- Proceso
- Materiales y accesorios
- Diámetros y espesores
- Diseño de junta
- Metales de aporte y número de cordones
- Características eléctricas
- Características de llama
- Posición



- Dirección de soldadura
- Tiempo entre pases
- Tipo y remoción de dispositivos de alineación
- Limpieza y/o esmerilado
- Pre y pos calentamiento
- Gas de protección y caudal de flujo
- Fundente de protección
- Velocidad de avance

### **Probetas de ensayo de soldadura a tope**

Para la obtención de las probetas de ensayo de calificación de la soldadura se debe unir dos nipples de tubería siguiendo los detalles que indique el WPS para posteriormente realizar el corte en la ubicación que indique la norma, el número de probetas necesarias por cada tipo de ensayo según el diámetro de la tubería también está especificado.

#### **2.2.3.3 ENSAYO DE JUNTAS SOLDADAS A TOPE**

Los ensayos que API 1104 especifica son:

- Ensayo de tracción
- Ensayo de rotura con entalla
- Ensayo de doblado de cara y de raíz
- Ensayo de doblado de lado

Para cada ensayo la norma especifica la preparación de la probeta, el método para llevar a cabo el ensayo y los requerimientos a cumplir.

#### **2.2.3.4 CALIFICACIÓN DE SOLDADORES**

El propósito de los ensayos de calificación de soldadores es determinar la habilidad que poseen para ejecutar uniones soldadas de buena calidad para esto se debe usar un procedimiento previamente calificado, la norma especifica el número de probetas de ensayo así también como su ubicación y estas deben cumplir los mismos requerimientos de aceptación con que se calificó el procedimiento. Además, la norma establece los requerimientos para una calificación simple o una calificación múltiple.

## 2.2.4 SÍNTESIS DE LA NORMA API 5L (2014)

### 2.2.4.1 ALCANCE DE LA ESPECIFICACIÓN API 5L

La especificación API 5L proporciona los requisitos para tuberías adecuadas para su uso en el transporte de gas, agua, petróleo y de aceite en las industrias del petróleo y gas natural. Además, especifica los requisitos para la fabricación de dos niveles de especificación de productos PSL 1 y PSL2 de tubos de acero con costura. Los grados cubiertos por esta especificación son A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80 y grados intermedios.

### 2.2.4.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

La composición química del acero utilizado para la fabricación de tubería con esta especificación está acorde a los requerimientos químicos dados para los productos PSL 1 y PSL 2. La tabla 2.2 hace referencia al metal base utilizado en el procedimiento de soldadura.

Tabla 2.2 Propiedades químicas PSL 2 para API 5L X 70

Grado	Máximo de Carbono	Máximo de Magnesio	Máximo de Fosforo	Máximo de Sulfuro	Máximo de Titanio	Otros
X70	0.22	1.65	0.025	0.015	0.06	c,d

c: niobio, vanadio

d: la suma de niobio, vanadio y titanio no excede el 0.15%

### 2.2.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

La tubería deberá cumplir los requisitos de tracción dados para los dos niveles de productos PSL 1 y PSL 2. La siguiente tabla 2.3 hace referencia al metal base utilizado en el procedimiento de soldadura.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas PSL 2 para API 5L X 70

Grado	Esfuerzo de fluencia mínimo		Esfuerzo de fluencia máximo		Esfuerzo ultimo mínimo		Esfuerzo ultimo máximo		Elongación mínima en 2"
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	%
X 70	70000	483	90000	621	82000	565	110000	758	a

a: la elongación mínima en 2" (50.8 mm) debe ser determinado por la ecuación 2.4:

En unidades del sistema internacional la mínima elongación según la norma API 5L es:

$$e = 1.944 \frac{A^{0.2}}{U^{0.9}} \quad (2.4)$$

Donde:  $e$  = elongación mínima en 2" (50.8 mm)

$A$  = área aplicable de la probeta de ensayo de tracción

$U$  = esfuerzo último especificado en psi

#### 2.2.4.4 CARBONO EQUIVALENTE (CE)

Para el metal base utilizada PSL 2 se especifica el cálculo del carbono equivalente como sigue:

- Cuando el contenido de carbono es menor o igual a 0.12% el CE debe ser calculado como sigue:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2.5)$$

- Cuando el contenido de carbono es mayor a 0.12% el CE debe ser calculado como sigue:

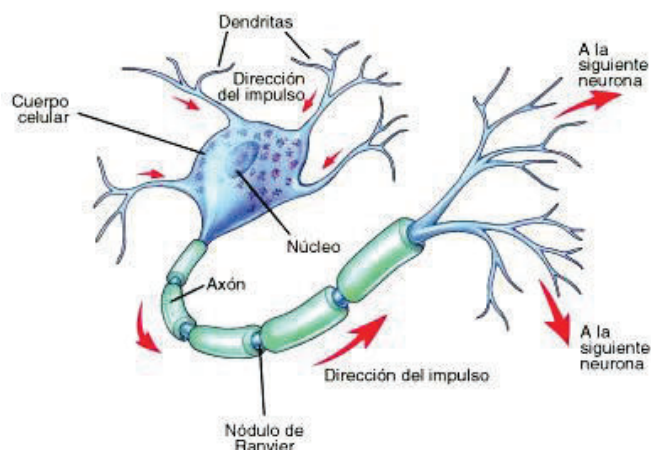
$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2.6)$$

## 2.3 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

### 2.3.1 MODELAMIENTO DE LA NEURONA ARTIFICIAL

Una de las razones más emocionantes de la Inteligencia Artificial (IA) es hacer máquinas tan inteligentes como los seres humanos, todavía se está lejos de alcanzarlo pero muchos investigadores de IA creen que el mejor camino para lograrlo es mediante algoritmos de aprendizaje automático que traten de imitar como aprende el cerebro humano.

Las redes neuronales artificiales (R.N.A.), fueron desarrolladas como una simulación de las neuronas o de las redes de neuronas en el cerebro, una neurona en el cerebro de forma esquemática se puede representar como muestra la figura 2.10:

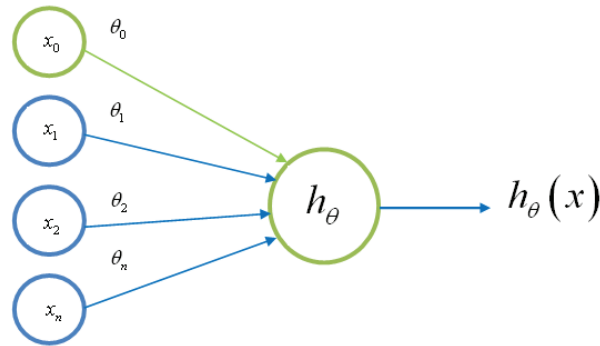


**Figura 2.10** Estructura básica de una neurona biológica

(<http://mijas-costac.blogspot.com/2013/09/2-relacion-y-coordinacion.html>)

Las neuronas son células en el cerebro y las dos cosas que llaman la atención son: que la neurona tiene un cuerpo celular y por otra parte que la neurona tiene un número de cables de entrada llamadas dendritas que reciben entradas de otras ubicaciones, también tiene un cable de salida que utiliza para enviar señales o mensajes a otras neuronas. Así en un nivel simple una neurona es una unidad computacional que tiene un número de entradas a través de sus cables de entrada y realiza algunos cálculos para luego enviar los resultados mediante el axón a otros nodos o a otras neuronas en el cerebro. La forma en que las neuronas se comunican unas con otras es mediante pulsaciones eléctricas.

Para una red neuronal artificial que se va implementar en una computadora se utilizará un modelo muy simple de lo que una neurona hace, se va modelar la arquitectura de una neurona como muestra en la figura 2.11, en donde las dendritas o cables de entrada viene a ser el conjunto de los nodos representados por los valores de entrada  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  y los parámetros de  $\theta$  que es la información a procesar, el cuerpo celular representada por la función hipótesis  $h_\theta$  llamada también función de transferencia y el axón la salida  $h_\theta(x)$ , que es la encargada de llevar la información procesada.



**Figura 2.11** Arquitectura de una neurona artificial

Los vectores de parámetros están dados como:

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \cdot \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

El nodo correspondiente a la entrada  $x_0$  se llama unidad de oscilación (*bias*) puesto que  $x_0 = 1$ . Además, en la literatura de redes neuronales los parámetros  $\theta$  del modelo se llaman *pesos del modelo*.

### 2.3.2 ARQUITECTURA DE PERCEPTRÓN

La figura 2.11 junto con la función de transferencia dada por la ecuación (2.7) representa un perceptrón simple:

$$h_{\theta}(x) = a(\theta^T x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta^T x \geq 0 \\ 0 & \text{si } \theta^T x < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Un perceptrón simple puede clasificar el vector de entradas en dos categorías puesto que las salidas pueden ser 0 o 1.

Un perceptrón múltiple se compone por la disposición paralela de perceptrones simples, es decir, un perceptrón múltiple se forma de una capa de perceptrones simples, pudiendo clasificar de esta manera las entradas dentro de algunas categorías.

La regla de aprendizaje perceptrón es un ejemplo de entrenamiento supervisado, la regla de aprendizaje le provee un conjunto de ejemplos del comportamiento propio del sistema en análisis:

$$\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), (x^{(3)}, y^{(3)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$$

Donde:  $x^{(m)}$  es la entrada a la red y  $y^{(m)}$  es la correspondiente respuesta objetivo de salida. Como cada entrada es aplicada a la red, la salida de la red es comparada con la respuesta objetivo. La regla de aprendizaje entonces ajusta los pesos y la unidad de oscilación (bias) de la red para llevar la salida de la red a cerrar en la respuesta objetivo.

### 2.3.2.1 REGLA DE APRENDIZAJE DEL PERCEPTRÓN

El propósito de la regla de aprendizaje es entrenar a la red para que realice alguna tarea, existen algunos tipos de reglas de aprendizaje para redes neuronales, los mismos que se pueden clasificar en tres categorías:

#### 1) Aprendizaje supervisado

La regla de aprendizaje se provee por un conjunto de ejemplos del comportamiento propio del sistema:

$$\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), (x^{(3)}, y^{(3)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$$

Donde:  $x^{(m)}$  es la variable independiente y  $y^{(m)}$  es la correspondiente respuesta que arroja el sistema (variable dependiente).

#### 2) Aprendizaje por refuerzo

Es similar al aprendizaje supervisado, excepto que, en vez de proveer la respuesta  $y^{(m)}$  para cada entrada  $x^{(m)}$ , el algoritmo de aprendizaje solo da una calificación, la calificación es una medida del rendimiento del modelo del sistema sobre la misma secuencia de entradas.

#### 3) Aprendizaje no supervisado

Los parámetros determinantes que modelan el sistema son modificados solamente en respuesta a las variables de entrada  $x^{(m)}$ , es decir, no hay la

respuesta del sistema  $y^{(m)}$  por lo que los algoritmos de aprendizaje no supervisado categorizan los patrones de entrada en un número finito de clases.

La *regla de aprendizaje de ajuste de pesos para el perceptrón* está dada por:

$$\theta^{actual} = \theta^{anterior} + ex \quad (2.8)$$

Donde:  $e = x - h_o(x)$  es el error del perceptrón

Esta regla es extendida para entrenar la unidad de oscilación cuya entrada es siempre 1, entonces, reemplazando este valor en la ecuación (2.8) se tiene:

$$\theta_0^{actual} = \theta_0^{anterior} + e \quad (2.9)$$

La regla de aprendizaje perceptrón dado por las ecuaciones (2.8) y (2.9) actualizan el vector de pesos de una sola neurona perceptrón. Se puede generalizar esta regla para múltiples perceptrones que forman una capa agregando el sub índice  $i$  como sigue.

Regla de aprendizaje para los pesos:

$${}_i\theta^{actual} = {}_i\theta^{anterior} + e_i x \quad (2.10)$$

Regla de aprendizaje para la unidad de oscilación (bias):

$${}_i\theta_0^{actual} = {}_i\theta_0^{anterior} + e_i \quad (2.11)$$

La demostración de convergencia de la regla de aprendizaje perceptrón se puede encontrar en (Martin T. Hagan, Howard B. Demuth & Mark Beale, 2002, p 4-15).

### 2.3.3 ARQUITECTURA ADELIN

Existe un gran número de problemas que no se reducen a problemas de clasificación en donde el perceptrón deja de ser útil, es decir, si las salidas fueran números reales la regla de aprendizaje perceptrón no permite producir salidas reales ya que la función de transferencia es de tipo escalón que transforma la suma ponderada de las entradas que es un valor real en una salida binaria desechando el error. La *ADELIN* (*ADaptive Linear NEuron*) es una arquitectura similar a la del perceptrón, la única diferencia es que tiene

una función de transferencia de tipo lineal (ecuación (2.12)) que permite tomar en cuenta el error producido.

$$h_{\theta}(x) = a(\theta^T x) = \theta^T x \quad (2.12)$$

### 2.3.3.1 REGLA DE APRENDIZAJE PARA LA ADELIN

La regla de aprendizaje para la *ADELIN* incluye la diferencia entre el valor real producido en la capa de salida  $h_{\theta}(x^{(i)})$  y el valor objetivo esperado  $y^{(i)}$  para un patrón de entrada  $x^{(i)}$ , es decir,  $|h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)}|$ . Puesto que no es posible conseguir una salida exacta, pero si minimizar la desviación cometida por la red se debe evaluar de forma global el error cometido. La medida de error se conoce como *función costo*  $J(\theta)$ , se puede definir algunas funciones costo en el modelo pero normalmente la que más se utiliza es el *error cuadrático promedio* definida como:

$$J(\theta^T) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (2.13)$$

Por lo tanto la regla de aprendizaje debe ser capaz de minimizar la función costo dada por la ecuación (2.13) (u equivalente en caso de definir otra función) para todos los valores del conjunto de entrenamiento.

Una manera de encontrar el mínimo de la función costo es recurriendo a algoritmos de optimización que buscan los puntos mínimos de una superficie, por ejemplo se puede mencionar los siguientes algoritmos de optimización:

- Algoritmo del descenso del gradiente
- Algoritmo de método de Newton
- Algoritmo de gradiente conjugado

Los algoritmos de optimización mencionados son de tipo iterativo, es decir, se empieza dando a los parámetros valores aleatorios y sus valores se actualizan de acuerdo a una ecuación de la forma:

$$\theta_{j+1} = \theta_j + \alpha_j P_j \quad (2.14)$$

O su equivalente:



$$\Delta\theta_j = (\theta_{j+1} - \theta_j) = \alpha_j P_j \quad (2.15)$$

Donde el vector  $P_j$  representa una dirección de búsqueda y el escalar  $\alpha_j$  es la velocidad de aprendizaje que determina la longitud de cada paso.

La regla de aprendizaje para la *ADELIN* la provee el *algoritmo LMS* (ecuación (2.16)) que utiliza el algoritmo de optimización del descenso del gradiente para encontrar el mínimo, Martin T. Hagan, Howard B. Demuth & Mark Beale (2002).

$$\theta_{j+1} = \theta_j + \alpha_j (h_\theta(x^{(i)}) - y^{(i)}) x_j^{(i)} \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) se conoce como la *regla de aprendizaje LMS*.

Se observa claramente que a diferencia de la regla de aprendizaje perceptrón, la regla de aprendizaje *LMS* introduce la diferencia entre la salida deseada y la obtenida.

#### 2.3.4 ARQUITECTURA DEL PERCEPTRÓN MULTICAPA

El perceptrón multicapa nace como consecuencia de las limitaciones de la arquitectura del perceptrón simple y/o múltiple referente a los problemas de separabilidad no lineal. El perceptrón multicapa se forma por varias capas de neuronas como indica la figura 2.12. y las funciones de transferencia más utilizadas puede ser la función sigmoidea:

$$h_\theta(x) = g_1(\theta^T x) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T x}} \quad (2.17)$$

y la función tangente hiperbólica:

$$h_\theta(x) = g_2(\theta^T x) = \frac{1 - e^{-\theta^T x}}{1 + e^{-\theta^T x}} \quad (2.18)$$

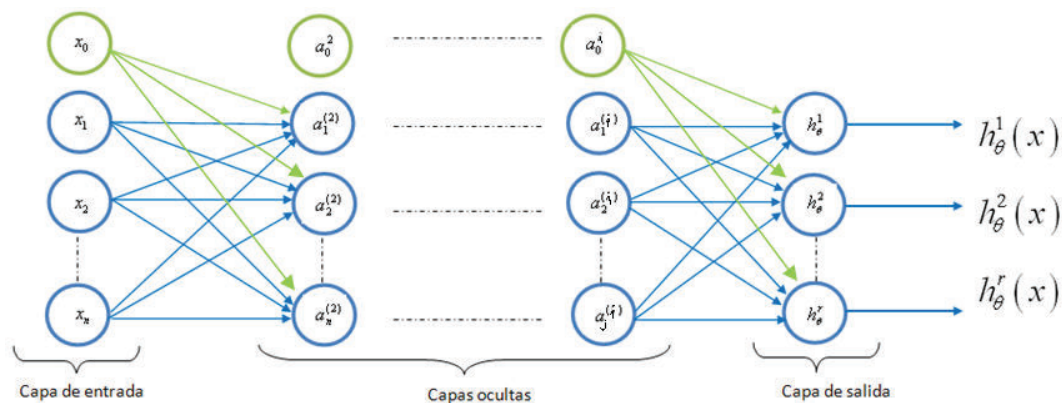


Figura 2.12 Arquitectura de perceptrón múltiple

El término capa oculta no es un término general pero básicamente cualquier cosa que no sea una capa de entrada o una capa de salida será llamada capa oculta y el término  $a_k^{(l)}$  denota la activación de la neurona  $k$  en la capa  $l$ , y por activación se refiere al valor que es calculado por  $y$  dado como resultado específico. Además, la red neuronal está parametrizada por estas matrices  $\theta^{(k)}$  que es una matriz de pesos que controla el mapeo de la capa  $l$  a la capa  $l+1$ , entonces si una red tiene  $S_l$  unidades en su capa  $l$  y  $S_{l+1}$  unidades en su capa  $l+1$ , entonces, la matriz  $\theta^{(k)}$  que rige el mapeo de la función de la capa  $l$  a la capa  $l+1$  va tener dimensión  $S_{l+1} \times S_l$

“El número de capas ocultas y el número de neuronas en estas capas deben ser elegidos por el diseñador. No existe un método o regla que determine el número óptimo de neuronas ocultas para resolver un problema dado” (Pedro Isasi & Ines M. Galván, 2004, p 52)

Con el propósito de observar lo que hace un perceptrón multicapa, suponga que se tiene una red con tres variables en la capa de entrada  $x_1, x_2, x_3$ , una capa oculta con tres neuronas  $a_k^{(l)}, k=1,2,3$  y una variable en la capa de salida tal como se muestra en la siguiente figura 2.13:

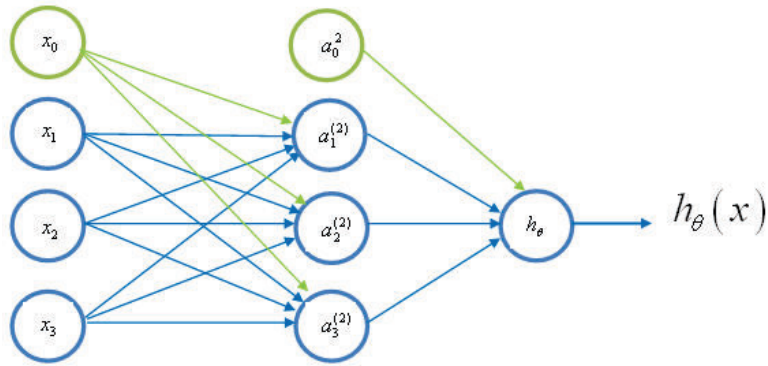


Figura 2.13: Arquitectura ejemplo del perceptrón multicapa

La primera capa oculta tiene su valor calculado como:

$$a_1^{(2)} = g\left(\theta_{10}^{(1)}x_0 + \theta_{11}^{(1)}x_1 + \theta_{12}^{(1)}x_2 + \theta_{13}^{(1)}x_3\right) \quad (2.19)$$

$$a_2^{(2)} = g\left(\theta_{20}^{(1)}x_0 + \theta_{21}^{(1)}x_1 + \theta_{22}^{(1)}x_2 + \theta_{23}^{(1)}x_3\right) \quad (2.20)$$

$$a_3^{(2)} = g\left(\theta_{30}^{(1)}x_0 + \theta_{31}^{(1)}x_1 + \theta_{32}^{(1)}x_2 + \theta_{33}^{(1)}x_3\right) \quad (2.21)$$

Aquí se tiene tres unidades de entrada ocultas cuya dimensión de la matriz de parámetros theta es  $\theta^{(1)} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$  que rigen el mapeo desde las tres unidades ocultas.

Finalmente, el espinal en la capa óptima o de salida se tiene una unidad más que calcula  $h_\theta(x)$  que es igual  $h_\theta(a_1^{(3)})$  y puede escribirse como:

$$h_\theta(x) = a_1^{(3)} = g\left(\theta_{10}^{(2)}a_0^{(2)} + \theta_{11}^{(2)}a_1^{(2)} + \theta_{12}^{(2)}a_2^{(2)} + \theta_{13}^{(2)}a_3^{(2)}\right) \quad (2.22)$$

En la ecuación (2.22)  $\theta^{(2)}$  es la matriz de parámetros o matriz de pesos que controla la función que mapea las unidades ocultas que son las unidades de la capa 2 a la unidad de la capa 3 cuya dimensión es  $\theta^{(2)} \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ .

A este proceso de calcular  $h_\theta(x)$  se llama *propagación hacia adelante*.

Esta vista de la propagación hacia adelante también ayuda a comprender que podrían estar haciendo el perceptrón multicapa y porque podrían ayudar a comprender interesantes problemas no lineales.

### Ejemplo de cálculo de una función compleja no lineal de entrada

Considere el siguiente problema en el que se tiene variables de entrada  $x_1$  y  $x_2$  que son valores binarios, en la figura 2.14a se representa 2 ejemplos positivos (X) y 2 ejemplos negativos (O) que es una versión simplificada de un problema de aprendizaje más complejo en el que puede haber varios ejemplos positivos en la parte superior derecha y en la parte inferior izquierda, y de forma análoga varios ejemplos negativos tal como muestra la figura 2.14b. Para modificar los círculos se debe aprender un límite de decisión no lineal en el que se pueda separar los ejemplos positivos y negativos. Entonces ¿Cómo puede un perceptrón multicapa hacer esto?

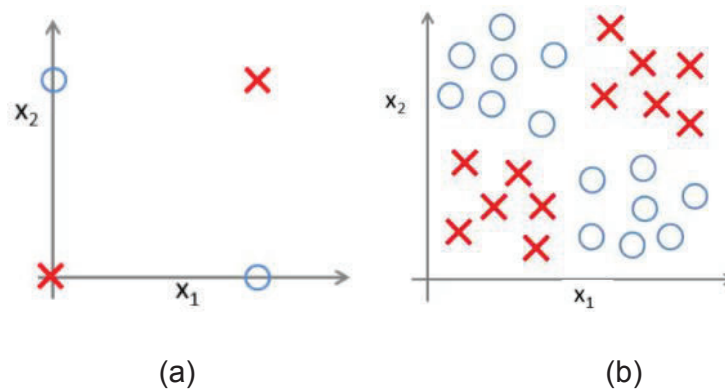
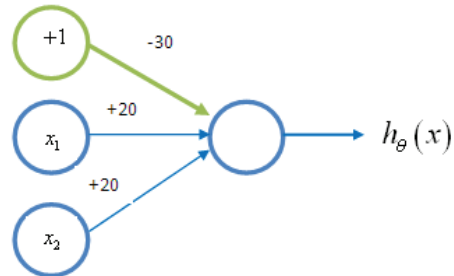


Figura 2.14: Ejemplo de problema no lineal

En la figura 2.14a se observa que está calculando la etiqueta destino dada por la función  $x_1 \text{ XOR } x_2$ . Es decir, que se va a tener ejemplos positivos si ambos  $x_1$  y  $x_2$  son verdaderos. Ahora se quiere saber si un perceptrón multicapa es capaz de ajustar este tipo de conjuntos de entrenamiento, con este propósito se realizan los siguientes ejemplos más simples que muestran como un perceptrón simple se ajusta a la función AND, OR y realizar la negación (función NOT).

Concretamente suponga que se tiene la etiqueta destino  $y$  dada por la función AND  $y = x_1 \text{ AND } x_2$ , para hacer que una neurona calcule esta función lógica AND se asigna los respectivos valores a los pesos o parámetros (valores ajustados en el proceso de entrenamiento para la compuerta AND) tal como muestra la figura 2.15.



**Figura 2.15:** perceptrón para función lógica AND

Entonces esto está diciendo que:

$$h_{\theta}(x) = g_1(-30 + 20x_1 + 20x_2)$$

Por lo tanto, para los cuatro posibles valores de  $x_1$  y  $x_2$ ,  $h_{\theta}(x)$  es igual a:

$x_1$	$x_2$	$h_{\theta}(x)$
0	0	$g_1(-30) \approx 0$
0	1	$g_1(-10) \approx 0$
1	0	$g_1(-10) \approx 0$
1	1	$g_1(10) \approx 1$

Como se puede observar estos valores calculados por la función  $h_{\theta}(x)$  precisamente corresponden a los valores de la función lógica AND cuya representación gráfica estaría dada por la figura 2.16 donde también se observa cual sería la disposición de la frontera de decisión.

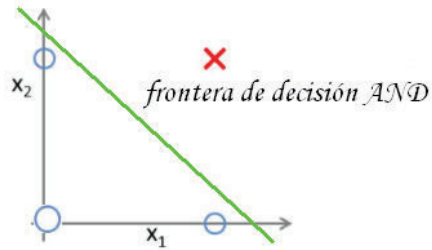


Figura 2.16: Frontera de decisión para una función lógica AND

De forma similar se puede observar como el mismo perceptrón entrenado para los valores de la función OR ajusta los valores de los pesos como se ve en la siguiente figura 2.17:

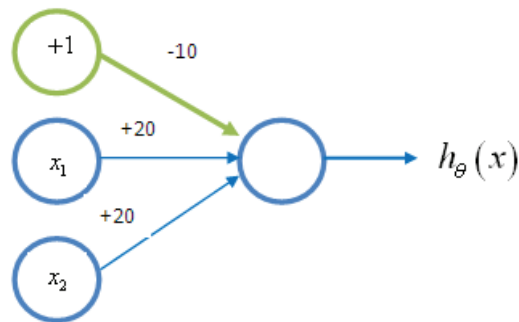


Figura 2.17: perceptrón para una función lógica OR

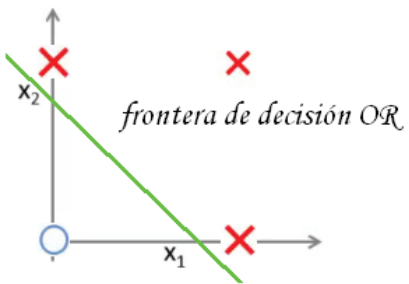
Por lo que se tiene que  $h_{\theta}(x)$  está dada por:

$$h_{\theta}(x) = g_1(-10 + 20x_1 + 20x_2)$$

Por lo tanto, para los cuatro posibles valores de  $x_1$  y  $x_2$ ,  $h_{\theta}(x)$  es igual a:

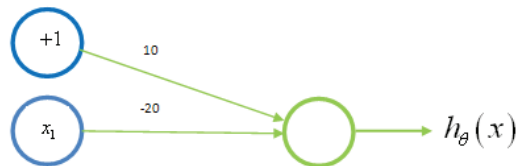
$x_1$	$x_2$	$h_{\theta}(x)$
0	0	$g_1(-10) \approx 0$
0	1	$g_1(+10) \approx 1$
1	0	$g_1(+10) \approx 1$
1	1	$g_1(30) \approx 1$

Su representación gráfica estaría dada por la figura 2.18 donde también se observa cual sería la disposición de la frontera de decisión.



**Figura 2.18:** Frontera de decisión para una función lógica OR

También se puede hacer que un perceptrón calcule la negación, para esto suponga se tiene una variable de entrada  $x_1$  y la unidad de oscilación  $+1$  y si se asocia esto con los pesos  $+10$  y  $-20$  como se muestra en la siguiente figura 2.19:



**Figura 2.19:** Perceptrón para función lógica NOT

Entonces la hipótesis sería:

$$h_{\theta}(x) = g_1(10 - 20x_1)$$

Por lo que se tendría:

$x_1$	$h_{\theta}(x)$
0	$g_1(10) \approx 1$
1	$g_1(-10) \approx 0$

Así que para incluir negaciones la idea general es poner un gran peso negativo delante de la variable que desea anular.

Ahora, para encontrar el límite de decisión no lineal dada por la función lógica XNOR bastaría unir las ideas dadas por los perceptrones que se obtuvo para las funciones lógicas AND, OR y la negación para obtener el perceptrón multicapa tal como se muestra en la siguiente figura 2.20:

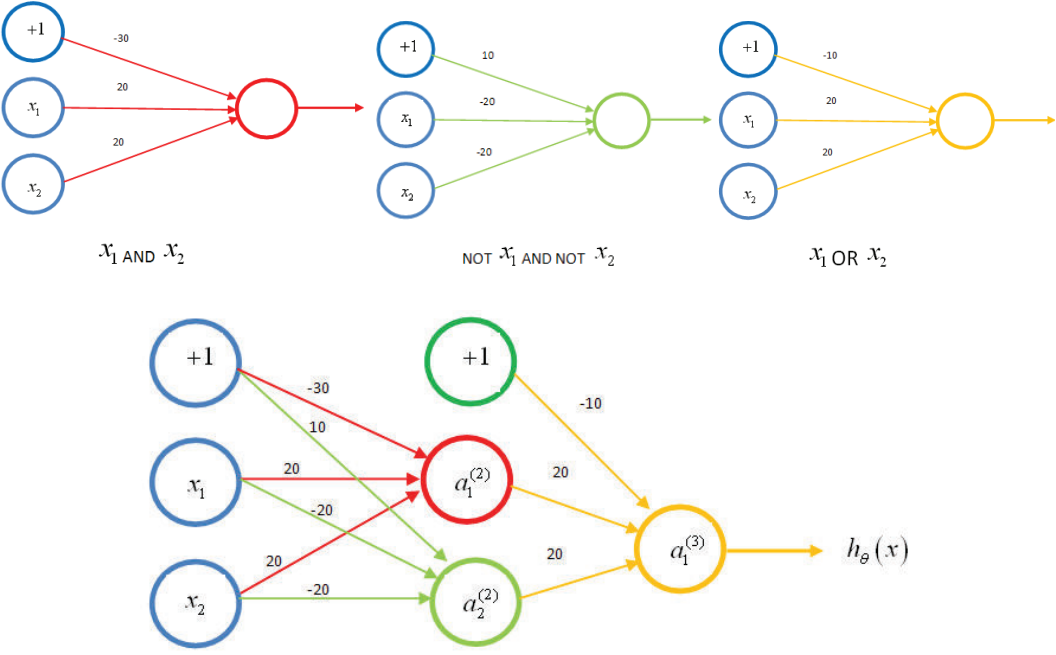


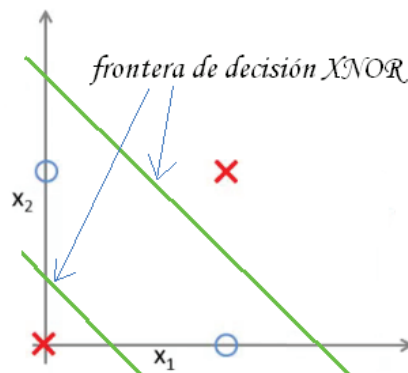
Figura 2.20: Perceptrón multicapa para la función XNOR

Por lo tanto,  $h_\theta(x)$  para todos los posibles valores de  $x_1$  y  $x_2$  será:

$x_1$	$x_2$	$a_1^{(2)}$	$a_2^{(2)}$	$h_\theta(x)$
0	0	0	1	1
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
1	1	1	0	1

Se puede observar que los valores dados por  $h_\theta(x)$  corresponden precisamente a la función lógica XNOR. Las fronteras de decisión superpuestas del perceptrón múltiple que forman la capa oculta están dadas como se indica en la siguiente figura 2.21:





**Figura 2.21:** Frontera de decisión para la función lógica no lineal XNOR

Con este perceptrón multicapa que tiene una capa de entrada, una capa oculta, y una capa de salida se termina con un límite de decisión no lineal que calcula esta función lógica XNOR, y la intuición más general es que en la capa de entrada solo se tiene entradas en bruto después se tiene una capa oculta que calcula algunas funciones un poco más complejas que de las entradas, añadiendo otra capa se termina con una función no lineal aún más compleja y esto es el tipo de intuición acerca del porque un perceptrón multicapa pueden calcular funciones bastante complicadas.

#### 2.3.4.1 REGLA DE APRENDIZAJE DEL PERCEPTRÓN MULTICAPA

El perceptrón multicapa sigue siendo un caso de aprendizaje supervisado en el que los parámetros de la red se modifican para que la salida sea la más próxima a la salida proporcionada por el supervisor.

Se puede definir algunas funciones costo en el modelo al igual que en la *DELTA*, pero en la mayoría de los casos la función error se define como:

$$E(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (J(m)) \quad (2.23)$$

Donde  $m$  es el número de ejemplos de entrenamiento y  $J(m)$  es el costo cometido por la red para el patrón  $m$ . (Pedro Isasi & Ines M. Galván, 2004, p 53).

De igual forma el costo  $J(m)$  puede ser definida de diferentes maneras, sin embargo, mayormente se utiliza el costo  $J(m)$  definida por la ecuación (2.13) (error cuadrático promedio).

Ahora, el aprendizaje del perceptrón multicapa es igual a encontrar el mínimo de la función costo  $E(\theta)$ , puesto que se tiene funciones de transferencia no lineales (ecuaciones: (2.17), (2.18)) la respuesta del sistema es no lineal respecto a los parámetros por lo que el problema de minimización es un problema no lineal, las técnicas de optimización no lineal consisten en la adaptación de los parámetros siguiendo una cierta dirección de búsqueda. Para el perceptrón multicapa la dirección de búsqueda más comúnmente usada es la dirección negativa del gradiente de la función  $E(\theta)$  (algoritmo del descenso del gradiente). Sin embargo existen otras técnicas para encontrar el mínimo de la función  $E(\theta)$ , por ejemplo: (Solis F. & west J., 1981) han desarrollado técnicas de minimización por búsqueda aleatoria, (David J. Montana & Laurence Davis) han utilizado técnicas evolutivas conocidas como algoritmos genéticos para ajustar los parámetros de la red, (David W. Opitz & Jude W. Shavlik, 1999) presenta el algoritmo ADDEMUP basado en algoritmos genéticos para buscar explícitamente un conjunto muy diverso de redes entrenadas de forma correcta.

El procedimiento más utilizado está basado en métodos del gradiente estocástico los cuales consisten en una minimización sucesiva de la función costo para cada ejemplo de entrenamiento  $J(m)$  en lugar de minimizar la función costo total  $E(\theta)$ .

Uno de los algoritmos de gradiente estocástico precisamente corresponde al algoritmo LMS que provee la regla de aprendizaje para la arquitectura *ADELIN* según la ecuación (2.16). Para el caso del perceptrón multicapa uno de los algoritmos del tipo gradiente estocástico que provee la regla de aprendizaje es el *algoritmo de retropropagación* el mismo que es una generalización del algoritmo LMS.

El algoritmo de retropropagación puede sufrir dos tipos de modificaciones con el propósito de aumentar la velocidad de convergencia, una de estas involucra el desarrollo de técnicas heurísticas que surgen de un estudio del rendimiento distintivo del algoritmo estándar de retropropagación, estas técnicas heurísticas incluyen ideas como por ejemplo: variar la velocidad de aprendizaje, usar

momentum, escalar variables, etc. Y la segunda de estas involucra técnicas de optimización numérica, como por ejemplo: el algoritmo de gradiente conjugado, el algoritmo Levenberg-Marquardt (una variación del método de Newton), etc. el algoritmo de retropropagación y las modificaciones mencionadas se puede encontrar en (Martin T. Hagan, Howard B. Demuth & Mark Beale, 2002, p 11-1 a 12-50).

## CAPITULO 3

### 3 OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo poder controlar los parámetros de todas las áreas ingenieriles involucradas es de vital importancia para evitar daños por derrame de petróleo, tal es el caso particular del área que involucra el control de los parámetros de unión de tubería por soldadura en donde se debe contar con procedimientos calificados (WPS calificado con PQR) en base a normas para garantizar el trabajo óptimo de la unión. Para establecer el procedimiento WPS se tiene involucrados tres actores que son: parámetros del procedimiento WPS, soldador y parámetros del PQR. Por lo que establecer los parámetros óptimos se convierte en un proceso iterativo entre estos actores. Para el caso de materiales con especificación API 5L la norma API 1104 provee los requisitos mínimos que debe cumplir la unión por soldadura, es así que, el objetivo principal de este capítulo es: *obtener los diferentes valores de los parámetros entre estos tres actores para la unión por soldadura SMAW de tubería API 5L grado X70 bajo el cumplimiento de la norma API 1104*. Se empieza estableciendo la metodología para alcanzar este objetivo y posteriormente se realiza el procedimiento en base a la metodología establecida, finalmente se presenta los resultados.

#### 3.2 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

Para alcanzar el objetivo principal de este capítulo se realizan las siguientes actividades:

##### 3.2.1 ACTIVIDAD 1: ELABORACIÓN DEL FORMATO DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA WPS

- 1) Identificar las características del material base.
- 2) Determinar el metal de aporte.
- 3) Esquematizar la junta.
- 4) Determinar la temperatura de precalentamiento.

- 5) Identificar parámetros del proceso SMAW para las características del material base.
- 6) Codificar probetas para la obtención de datos.

### **3.2.2 ACTIVIDAD 2: ELABORACIÓN DE LA SOLDADURA SEGÚN EL FORMATO WPS**

- 1) Preparar la junta.
- 2) Ubicar la posición de soldadura.
- 3) Precalentar el material base.
- 4) Realizar la soldadura.
- 5) Tomar datos con que se realiza la soldadura.

### **3.2.3 ACTIVIDAD 3: ELABORACIÓN DEL FORMATO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)**

- 1) Determinar los tipos de ensayos que establece la norma API 1104 según el material base especificado.

### **3.2.4 ACTIVIDAD 4: ELABORACIÓN DE ENSAYOS ESTABLECIDOS EN PQR**

- 1) Elaborar probetas de ensayos.
- 2) Realizar ensayos.
- 3) Tomar datos de los ensayos.

### **3.2.5 ACTIVIDAD 5: PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS**

- 1) Presentar datos con que se realiza la soldadura.
- 2) Presentar datos de los ensayos y datos geométricos.

## **3.3 ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)**

### **3.3.1 MATERIAL BASE**

El material base que se dispone son niples de tubería con especificación API 5L (figura 3.1) cuyas características están dadas según la tabla 3.1



**Figura 3.1** Niples de material base

**Tabla 3.1** Características del material base

<b>Producto</b>	PSL 2
<b>Grado</b>	X70 (70ksi)
<b>Longitud</b>	12 pulgadas (304.8 mm)
<b>Diámetro</b>	34 pulgadas (863.6 mm)
<b>Espesor</b>	0.502 pulgadas (12.751 mm)

### 3.3.2 METAL DE APORTE PARA TUBERÍA API 5L X 70

Para una resistencia mayor a la del material base (70ksi), la especificación AWS A5.5/A5.5M (2006) establece la serie de electrodos E8010-P1 con recubrimiento celulósico para soldadura de tubería en línea cuyas propiedades químicas están dadas según la tabla 3.2:

**Tabla 3.2** Propiedades químicas de E8010-P1

<b>A5.5</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>MO</b>	<b>V</b>
E8010-P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10

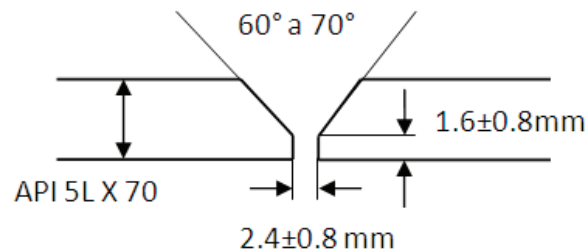
Del catálogo de electrodos Lincoln Electric (ANEXO 1) se opta por los electrodos E8010-P1 de diámetro 1/8 de pulgada para el pase de raíz y los electrodos E8010-P1 de diámetro 3/16 de pulgada para el resto de pases. La tabla 3.3 muestra los rangos de corriente para los diámetros seleccionados.

**Tabla 3.3** Rangos de corriente y polaridad para los electrodos a utilizar

Diámetro	Corriente	Polaridad
1/8" (3.2mm)	65-120	DC+
3/16"(5.0mm)	130-210	DC+

### 3.3.3 ESQUEMATIZACIÓN DE LA JUNTA

Se requiere un cordón de ranura para la unión por soldadura de la tubería, por lo tanto se tiene juntas a tope con bisel en V, Henry Hortwitz (1976) establece valores máximos y mínimos de biseles para soldadura de arco y soldadura a gas, obteniendo de esta manera la junta dada por la figura 3.2 cuyos valores están dentro de estos rangos.

**Figura 3.2** Junta para API 5L X 70

### 3.3.4 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

Para obtener la temperatura de precalentamiento de la tabla 3.2 se observa que el contenido de carbono es mayor a 0.12%, por lo tanto, según la ecuación (2.6) el equivalente químico en carbono será:

$$CE = 0.22 + \frac{1.65}{6} + \frac{0.15}{5} = 0.525 = [C]_c$$

Luego, según la ecuación (2.3) el carbono de la placa para un espesor de  $e = 0.502" = 12.751mm$  es:

$$[C]_r = [1 + 0.005(12.751)] = 1.064$$

Entonces según la ecuación (2.2) el carbono equivalente total es:

$$[C]_T = [0.525][1.064] = 0.559$$

Por último, la temperatura de precalentamiento dada por la ecuación (2.1) es:

$$T = 630 \left( \sqrt{0.559} - 0.25 \right)^{1/2} + 32 \cong 476.43 [^{\circ}F] \cong 246 [^{\circ}C]$$

### 3.3.5 PARÁMETROS DEL WPS

En la sección (2.2.2.2) se estableció que los parámetros para el proceso SMAW son la corriente (I), el voltaje (V) y la rapidez (S) y puesto que la tubería es de espesor 12.751 mm (ver tabla 3.1) se tiene como número mínimo de pases los siguientes: pase de raíz, pase en caliente, pase de relleno, pase intermedio y pase de recubrimiento.

Para el pase de raíz debido a la geometría del bisel se realiza con el electrodo de diámetro 1/8", por lo tanto, el rango de corriente difiere con respecto al rango de corriente del electrodo de diámetro 3/16" utilizado en el resto de pases, entonces, se establece los parámetros corriente de raíz y voltaje de raíz como parámetros separados de la corriente y voltaje para el resto de pases, además, puesto que la cantidad de material de aporte que hay que depositar varía en cada pase, la rapidez de avance también varía, por lo que se considera como parámetros del proceso de soldadura, en resumen se tiene las siguientes variables para la realización del proceso de soldadura:

- $x_1 =$  Corriente de raíz  $I_r$
- $x_2 =$  Voltaje de raíz  $V_r$
- $x_3 =$  Corriente  $I$
- $x_4 =$  Voltaje  $V$
- $x_5 =$  Rapidez de avance de raíz  $S_r$
- $x_6 =$  Rapidez de avance en caliente  $S_h$
- $x_7 =$  Rapidez de avance en relleno  $S_F$
- $x_8 =$  Rapidez de avance en pase intermedio  $S_s$
- $x_9 =$  Rapidez de avance en recubrimiento  $S_c$

### 3.3.6 ELABORACIÓN DEL FORMATO (WPS)

Con la información precedente se establece el siguiente WPS



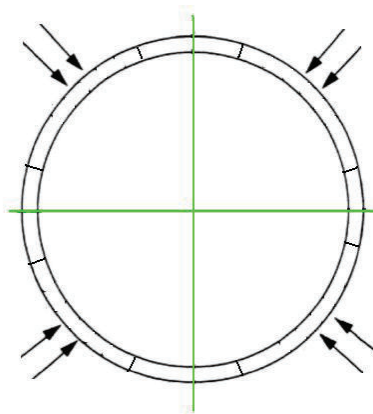
<b>Referencia</b>							
API 1104							
<b>Soporte PQR N°-</b>							
<b>WPS N°-</b>							
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>							
<b>Compañía</b>		Escuela Politécnica Nacional					
<b>Revisión N°-</b>		1	<b>Fecha:</b>		30/01/2015	<b>por:</b> Nelson Remache	
<b>Autorizado por</b>		Ing. Gabriel Velasteguí			<b>Fecha</b>		09/15/2015
<b>ESPECIFICACIONES GENERALES</b>							
<b>Aplicación</b>				Soldadura a tope			
<b>Proceso</b>				SMAW			
<b>Material</b>				API 5L X 70			
<b>Diámetro exterior de la tubería</b>		34"		<b>Espesor de la pared</b>		0.502"	
<b>Metal de aporte</b>		E8010 P1		<b>Número de cordones</b>		5	
<b>Diseño de junta</b>		A tope		<b>Tipo de Bisel</b>		En V	
<b>Posición</b>				6 G			
<b>Dirección de soldadura</b>				ascendente			
<b>Limpieza</b>				Herramientas fuertes			
<b>Temperatura de pre calentamiento</b>				246°C			
<b>Detalle de la junta</b>							
<b>CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS</b>							
<b>PASE</b>	<b>N°</b>	<b>AWS</b>	<b>DIÁMETRO</b>	<b>CORRIENTE</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>DC</b>	<b>RAPIDEZ</b>
raíz	1 <sup>st</sup>	E8010 P1	1/8"	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	+	x <sub>3</sub>
caliente	2 <sup>nd</sup>	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>6</sub>
relleno	3 <sup>th</sup> (n-1)	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>7</sub>
intermedio	n	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>8</sub>
cobertura	(n+1)	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>9</sub>
<b>OBSERVACIONES:</b>							

Los valores de los parámetros  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$  serán según la codificación que se les asigna en la siguiente sección.

### 3.3.7 CODIFICACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

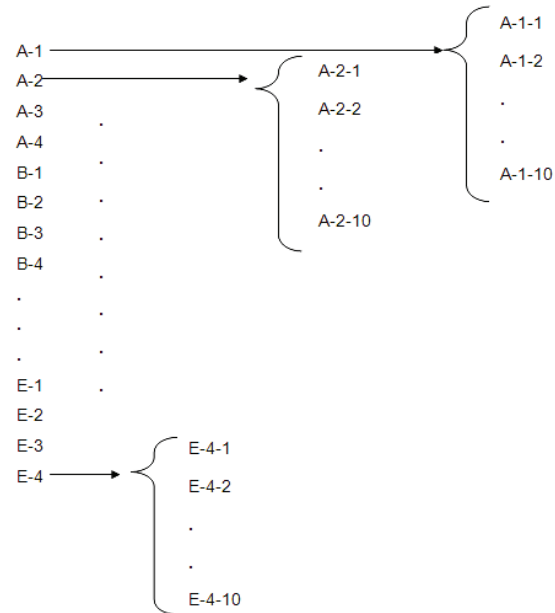
La norma API 1104 establece ensayos de resistencia a la tracción, rotura con entalla y doblado de lado para este tipo de tubería según el diámetro y espesor especificado en la tabla 3.1 *siendo los ensayos de resistencia a la tracción y doblado de lado los más determinantes* en el trabajo que realiza el cordón de soldadura al soportar cargas externas.

Para la obtención del mayor número de probetas posibles de las 5 juntas disponibles para la realización de ensayos, el diámetro de la tubería se divide en 4 partes iguales como indica la figura 3.3.



**Figura 3.3** División de la tubería para codificación

A cada parte de la tubería se asigna una codificación que va desde la A-x hasta la E-x en orden alfabético, donde  $x=1,2,3,4$  obteniendo un total de 20 códigos, y por cada código se obtienen 10 probetas para ensayos de resistencia a la tracción y 8 probetas para ensayos de doblado de lado, dando un total de 200 probetas para ensayos de tracción y 160 probetas para ensayo de doblado, es decir, la codificación de las probetas para ensayos de tracción será:



La codificación para las probetas de doblado de lado se realiza de forma similar. Y para los ensayos de rotura con entalla se toma 1 probeta por cada código obteniendo un total de 20 probetas.

Finalmente para cada código se le asigna el valor de corriente de soldadura dentro del rango de operación de los materiales de aporte en orden ascendente y se mide los valores correspondientes de voltaje y rapidez de avance.

### 3.4 ELABORACIÓN DE LA SOLDADURA SEGÚN WPS

La soldadura es realizada según WPS con soldadores calificados en procesos similares.

#### 3.4.1 EQUIPO DE SOLDADURA

Para la realización de la soldadura se usó los quipos de soldadura por arco INVERTEC V350-PRO que se observa en la figura 3.4



Figura 3.4 Equipo de soldadura por arco INVERTEC V350-PRO

Las especificaciones técnicas de estos equipos se detallan en la siguiente tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Especificaciones técnicas INVERTEC V350-PRO

Nombre del producto	Voltaje CA de entrada	Salida de CD nominal A/V/ciclo de trabajo	Rango de Circuito (continua)	Voltaje de abierto
Invertec V350-PRO 60/50 Hz	200 208-230/ 380-400/ 415-460/ 575	350A/34V/60% 300A/32V/100%	AMPS 5-425	80VCD

### 3.4.2 PREPARACIÓN DE LA JUNTA

Los biseles se preparan por un proceso de desgaste con material abrasivo tal como indica la figura 3.5a, luego se une los nipples biselados por medio de platinas como indica la figura 3.5b de tal forma que quede la junta alineada.



(a) Preparación del bisel



(b) Unión y alineación de nipples biselados

**Figura 3.5** Preparación de la junta

### 3.4.3 UBICACIÓN DE LA POSICIÓN DE SOLDADURA

La soldadura se realiza en la posición 6G como indica la figura 3.6 teniendo un total de 5 juntas.



**Figura 3.6** Posición 6G

#### 3.4.4 PRECALENTAMIENTO

El precalentamiento se realiza con un mechero de GLP y la medición de temperatura se realiza con la ayuda de un pirómetro óptico como muestra la siguiente figura 3.7.



**Figura 3.7** Pre calentamiento para la realización de la soldadura

#### 3.4.5 REALIZACIÓN DE LOS PASES DE SOLDADURA

Luego de fijar el valor del parámetro corriente se procede a realizar el pase de raíz para un valor de corriente previamente establecido como muestra la figura 3.8a y se toma el tiempo con la ayuda de un cronómetro para posteriormente determinar la rapidez de avance de la soldadura, luego de terminar el pase de raíz se realiza la limpieza del cordón removiendo la escoria como muestra la figura 3.8b y dejando listo para el siguiente pase como indica la figura 3.8c.

Para el resto de pases el procedimiento es el similar hasta obtener el cordón finalizado como indica la figura 3.8d.



a) Realización de pase de raíz



b) limpieza y remoción de escoria



c) bisel listo para otro pase



d) cordón terminado

**Figura 3.8** Elaboración del cordón de soldadura

### 3.5 REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR)

Una vez realizados los cordones de soldadura se procede a realizar el formato de registro de calificación de procedimiento (PQR) en el que se establece el parámetro cuantitativo correspondiente a la resistencia a la tracción como  $y_1$  (sección 3.3.7), siendo este formato el siguiente:

<b>Referencia</b>		API 1104								
<b>PQR N°-</b>										
<b>WPS N°-</b>										
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>										
<b>Compañía</b>	Escuela Politécnica Nacional									
<b>Revisión N°-</b>	1	<b>Fecha:</b>	30/01/2015 <b>por:</b> Nelson Remache							
<b>Autorizado por</b>	Ing. Gabriel Velasteguí		<b>fecha</b> 09/15/2015							
<b>Soldadores</b>	Sislema Maza Luis Francisco		<b>Doc. identificación</b> 171576773-5							
	Shunta Ronquillo Edgar Vinicio		171923136-5							
<b>Ensayos realizados por</b>	Nelson Remache		<b>Doc. identificación</b> 050267455-9							
<b>Proceso</b>	SMAW									
<b>Equipo de soldadura</b>	Lincoln INVERTEC V350-PRO									
<b>Material</b>	API 5L X 70									
<b>Diámetro exterior de la tubería</b>	34"	<b>Espesor de la pared</b>	0.502"							
<b>Metal de aporte</b>	E8010 P1	<b>Fabricante</b>	Lincoln							
<b>Diseño de junta</b>	A tope	<b>Tipo de Bisel</b>	En V							
<b>Posición</b>	6 G									
<b>Dirección de soldadura</b>	ascendente									
<b>Temperatura de pre calentamiento</b>	246°C									
<b>CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS</b>										
<b>PASE</b>	<b>N°</b>	<b>AWS</b>	<b>DIÁMETRO</b>	<b>CORRIENTE</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>DC</b>	<b>RAPIDEZ</b>			
raíz	1 <sup>st</sup>	E8010 P1	1/8"	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	+	X <sub>3</sub>			
caliente	2 <sup>nd</sup>	E8010 P1	3/16"	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	+	X <sub>6</sub>			
relleno	3 <sup>th</sup> (n-1)	E8010 P1	3/16"	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	+	X <sub>7</sub>			
intermedio	n	E8010 P1	3/16"	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	+	X <sub>8</sub>			
cobertura	(n+1)	E8010 P1	3/16"	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	+	X <sub>9</sub>			
<b>PRUEBA ENSAYO DE TRACCIÓN</b>										
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Cupón ensayado</b>	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód
<b>Ancho de la probeta [mm]</b>										
<b>Espesor de la probeta[mm]</b>										
<b>Área de la probeta [mm<sup>2</sup>]</b>										
<b>Carga máxima[lbf]</b>										
<b>Resistencia a la tracción [ksi]</b>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>
<b>DOBLADO DE LADO/ROTURA CON ENTALLA</b>										
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
	<b>D.L</b>								<b>R.E</b>	
<b>Cupón ensayado</b>	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	COD	N/A
<b>resultado</b>										
<b>Observaciones:</b> D.L=Doblado de Lado, R.E=Rotura con Entalla										
Los resultados de los ensayos se emiten por el Laboratorio del Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.(ANEXO 5).										

### 3.6 ELABORACIÓN DE ENSAYOS ESTABLECIDOS EN EL PQR

#### 3.6.1 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS

La preparación de las probetas para ensayos está especificado en la norma API 1104, entonces siguiendo estas especificaciones se realiza la señalización y corte oxiacetilénico de las probetas como muestra la figura 3.9



**Figura 3.9** Obtención de las probetas de ensayo

### 3.6.2 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Politécnica Nacional bajo la supervisión de los técnicos a cargo del manejo de los equipos de ensayo.

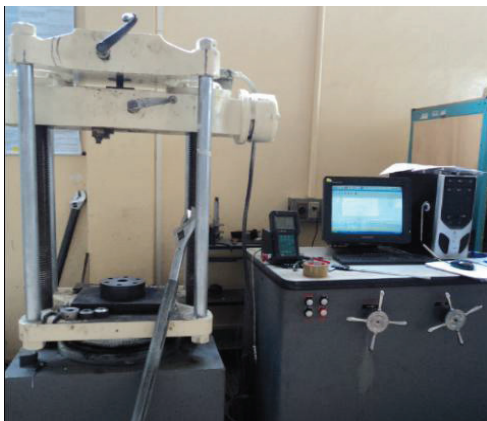


Para los ensayos se utilizó dos máquinas universales cuyas características se presentan en la tabla 3.5:

**Tabla 3.5** Características de las máquinas utilizadas

Marca	Tipo de Maquina	Capacidad kN [lb]	Tipo de control	Recopilación de datos
Tinius Olsen	Hidráulica	587 [132.000]	Digital	Digital
Tinius Olsen	Hidráulica	534 [120.000]	Manual	Analógico

La máquina de recopilación de datos digital (ver figura 3.10a) se utilizó para los ensayos de tracción y la máquina de recopilación de datos analógico (ver figura 3.10b) se usó para los ensayos de doblado de lado.



a) Digital



b) Análoga

**Figura 3.10** Máquina universal de ensayos de recopilación de datos a) y b)

### 3.7 DATOS OBTENIDOS

A los parámetros establecidos en el WPS y PQR se agregan los parámetros geométricos del cordón de soldadura (ver figura 3.11) como son: ancho de cara, altura de cara (sobremonta), penetración de raíz y ancho de raíz, es decir, se tiene los parámetros adicionales:

$y_2$  = ancho de cara

$y_3$  = sobremonta

$y_4$  = penetración de raíz

$y_5$  = ancho de raíz

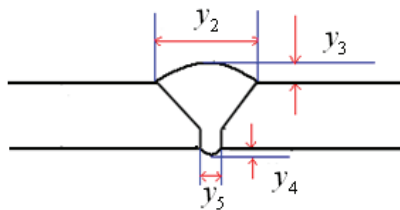


Figura 3.11 Parámetros geométricos del cordón de soldadura

Por lo tanto una vez realizada la soldadura según WPS seguido de los ensayos del PQR y medidos los parámetros geométricos se obtiene los datos que se muestran en la siguiente sección.

### 3.7.1 DATOS CON LOS QUE SE REALIZA EL PROCESO DE SOLDADURA

Los valores de los parámetros del WPS para cada código asignado se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores de los parámetros del WPS

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
A-1-1	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-2	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-3	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-4	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-5	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-6	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-7	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-8	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-9	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-1-10	104	30	140	26	27,86	25,58	16,54	16,54	24,51
A-2-1	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-2	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-3	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-4	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-5	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-6	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-7	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
A-2-9	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-2-10	110	32	143	25	26,25	23,25	16,60	14,74	22,48
A-3-1	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-2	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-3	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-4	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-5	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-6	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-7	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-8	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-9	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-3-10	102	31	146	24	23,11	30,59	16,27	15,89	24,51
A-4-1	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-2	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-3	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-4	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-5	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-6	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-7	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-8	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-9	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
A-4-10	100	29	149	25	24,65	26,25	15,95	15,41	24,65
B-1-1	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-2	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-3	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-4	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-5	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-6	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-7	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-8	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-9	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-1-10	103	30	152	25	28,06	26,08	14,37	15,35	28,85
B-2-1	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-2	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-3	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-4	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-5	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-6	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-7	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-2-8	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
B-2-10	103	30	155	28	23,38	24,21	14,63	13,65	18,83
B-3-1	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-2	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-3	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-4	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-5	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-6	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-7	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-8	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-9	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-3-10	105	31	158	27	24,51	24,51	14,13	13,88	26,25
B-4-1	105	31	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-2	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-3	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-4	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-5	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-6	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-7	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-8	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-9	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
B-4-10	104	32	161	26	30,13	30,13	16,54	15,18	24,51
C-1-1	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-2	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-3	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-4	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-5	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-6	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-7	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-8	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-9	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-1-10	106	31	164	27	26,76	29,84	16,74	19,19	26,08
C-2-1	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-2	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-3	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-4	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-5	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-6	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-7	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-8	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08
C-2-9	108	32	167	28	26,08	28,65	11,33	15,12	21,08

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
C-3-1	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-2	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-3	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-4	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-5	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-6	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-7	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-8	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-9	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-3-10	103	30	170	24	25,91	30,82	14,74	15,59	27,67
C-4-1	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-2	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-3	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-4	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-5	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-6	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-7	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-8	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-9	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
C-4-10	106	29	173	27	27,30	27,12	14,54	14,37	22,48
D-1-1	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-2	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-3	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-4	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-5	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-6	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-7	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-8	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-9	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-1-10	102	29	176	28	26,42	18,92	17,69	18,66	17,53
D-2-1	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-2	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-3	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-4	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-5	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-6	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-7	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-8	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-9	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24
D-2-10	104	31	179	29	30,13	34,47	20,97	18,58	20,24

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
D-3-2	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-3	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-4	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-5	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-6	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-7	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-8	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-9	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-3-10	107	32	182	30	29,91	24,65	17,31	19,84	25,43
D-4-1	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-2	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-3	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-4	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-5	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-6	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-7	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-8	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-9	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
D-4-10	105	30	185	27	26,25	30,13	17,69	20,34	28,06
E-1-1	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-2	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-3	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-4	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-5	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-6	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-7	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-8	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-9	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-1-10	109	32	188	27	26,08	28,06	16,02	26,42	19,84
E-2-1	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-2	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-3	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-4	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-5	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-6	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-7	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-8	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-9	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-2-10	106	29	191	29	24,51	31,78	16,27	27,30	24,96
E-3-1	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-2	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53

Cód.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
	[A]	[V]	[A]	[V]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]	[cm/min]
E-3-4	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-5	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-6	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-7	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-8	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-9	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-3-10	108	30	194	30	25,58	26,59	26,08	27,49	31,53
E-4-1	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-2	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-3	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-4	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-5	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-6	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-7	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-8	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-9	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94
E-4-10	110	32	197	32	25,75	23,93	18,00	20,04	26,94

### 3.7.2 DATOS OBTENIDOS DEL CORDÓN DE SOLDADURA

El informe técnico de los datos de los ensayos de tracción son remitidos por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (ver anexo 2) estos datos se unen a los datos de las medidas geométricas del cordón de soldadura realizados a las probetas, los mismos que se presentan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Datos de los parámetros del cordón de soldadura

cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A-1-1	85,4	588,6	17,08	2,63	1,43	4,33
A-1-2	91,5	630,7	15,67	3,08	1,38	4,92
A-1-3	90,3	622,3	18,12	2,76	1,19	4,85
A-1-4	94,7	652,7	16,33	2,95	1,42	5,48
A-1-5	90,6	624,7	16,01	3,38	1,05	4,43
A-1-6	89,6	617,9	16,92	2,71	0,81	4,77
A-1-7	88,9	612,7	16,60	3,02	1,11	4,05
A-1-8	88,7	611,5	17,04	2,48	1,55	4,48
A-1-9	89,8	619,3	16,79	2,85	1,22	4,75
A-1-10	91,1	628,0	17,12	2,54	1,34	3,99
A-2-1	90,6	624,8	14,33	2,28	1,58	5,97
A-2-2	88,9	612,8	18,44	1,53	1,25	3,71

cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A-2-3	89,3	615,4	16,58	2,51	1,52	4,49
A-2-4	90,9	626,9	18,20	2,63	1,74	3,32
A-2-5	92,5	637,5	15,97	2,97	1,34	4,54
A-2-6	90,8	626,0	17,73	1,97	1,76	3,99
A-2-7	91,0	627,2	17,29	1,65	1,42	6,69
A-2-8	90,7	625,4	16,92	1,85	1,46	4,73
A-2-9	93,0	641,3	18,33	2,28	1,31	3,88
A-2-10	91,6	631,7	17,71	3,03	1,06	5,89
A-3-1	87,9	605,9	15,70	2,27	2,07	4,83
A-3-2	92,3	636,2	18,13	2,23	1,11	3,94
A-3-3	78,0	537,7	13,38	1,86	1,49	3,77
A-3-4	90,2	621,8	15,79	2,40	2,21	5,01
A-3-5	94,9	654,2	14,45	2,64	1,70	4,19
A-3-6	92,0	634,0	17,44	2,11	2,11	4,73
A-3-7	93,4	644,1	17,16	1,72	1,73	3,63
A-3-8	89,2	615,2	16,29	2,91	1,56	5,11
A-3-9	89,6	617,9	16,59	2,42	1,53	5,13
A-3-10	93,8	647,1	17,01	2,29	1,22	5,51
A-4-1	92,7	639,0	17,97	2,68	0,94	2,74
A-4-2	88,6	610,7	18,56	2,02	1,73	2,99
A-4-3	94,7	653,1	19,37	2,88	1,32	2,73
A-4-4	82,8	571,1	18,92	3,20	1,77	5,52
A-4-5	87,8	605,7	19,30	2,54	1,47	3,21
A-4-6	92,2	635,4	19,66	2,19	1,01	4,83
A-4-7	92,7	639,3	20,51	2,61	1,32	3,91
A-4-8	94,4	650,9	18,55	3,07	1,18	3,76
A-4-9	94,9	654,4	18,08	2,70	1,78	5,30
A-4-10	87,6	603,7	19,52	1,91	1,31	4,08
B-1-1	94,7	653,0	15,96	3,36	1,55	4,58
B-1-2	94,5	651,3	17,13	2,16	1,43	5,05
B-1-3	93,6	645,3	15,86	1,53	1,86	5,73
B-1-4	91,0	627,6	16,08	2,19	1,57	5,51
B-1-5	93,0	641,4	17,84	1,65	1,43	4,38
B-1-6	93,9	647,5	17,40	2,03	1,48	4,80
B-1-7	94,6	652,3	15,51	2,13	1,56	4,40
B-1-8	91,7	632,2	16,67	1,67	1,05	4,08
B-1-9	90,8	625,7	17,03	3,09	1,26	6,25
B-1-10	91,4	630,5	15,92	1,78	1,21	4,28
B-2-1	95,6	659,0	18,55	3,43	1,88	5,27
B-2-2	93,9	647,2	17,82	2,73	1,60	4,71



cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
B-2-3	92,6	638,5	17,03	2,10	1,59	5,13
B-2-4	95,3	657,1	15,90	2,55	1,38	4,36
B-2-5	94,5	651,5	16,78	2,66	0,93	5,01
B-2-6	92,5	638,0	17,35	2,13	1,94	5,07
B-2-7	94,6	652,2	16,54	2,88	1,88	6,07
B-2-8	93,4	643,9	16,80	2,04	1,55	3,92
B-2-9	95,4	657,7	16,45	1,59	1,67	4,75
B-2-10	91,3	629,3	17,24	2,12	1,27	5,14
B-3-1	95,4	658,1	16,31	2,91	1,31	5,76
B-3-2	96,0	661,9	17,85	2,88	1,33	5,37
B-3-3	94,4	650,8	18,80	2,68	1,42	4,15
B-3-4	94,9	654,1	16,97	2,28	1,11	5,61
B-3-5	93,0	641,0	18,40	2,51	1,30	5,17
B-3-6	97,3	670,8	16,61	2,90	0,97	4,77
B-3-7	117,4	809,5	18,61	1,85	0,75	6,33
B-3-8	89,2	615,0	19,57	1,76	1,04	5,38
B-3-9	94,2	649,7	19,13	2,01	1,48	4,84
B-3-10	95,6	659,2	18,04	3,41	1,56	5,89
B-4-1	92,7	639,3	18,11	2,50	1,17	5,99
B-4-2	90,1	621,5	19,10	2,39	1,18	4,88
B-4-3	98,0	675,5	18,75	1,85	1,36	5,53
B-4-4	91,6	631,6	19,73	2,28	1,08	5,55
B-4-5	93,3	643,1	18,52	2,22	0,88	5,21
B-4-6	91,8	632,8	19,12	3,01	1,31	5,16
B-4-7	91,9	633,9	20,35	2,92	1,21	5,45
B-4-8	91,0	627,8	19,81	3,08	0,96	5,63
B-4-9	90,6	624,4	20,06	2,95	1,56	5,53
B-4-10	93,8	646,5	19,92	2,38	1,92	5,67
C-1-1	92,0	634,1	16,61	1,73	1,97	3,39
C-1-2	92,6	638,3	17,58	1,88	0,94	3,91
C-1-3	92,2	635,5	17,73	2,41	1,80	5,41
C-1-4	92,7	639,3	18,66	1,83	1,45	5,26
C-1-5	90,4	623,5	16,35	1,80	1,34	4,68
C-1-6	88,9	613,0	16,04	1,74	1,23	4,71
C-1-7	90,7	625,2	16,32	1,12	1,33	4,89
C-1-8	88,6	611,2	16,79	2,50	1,42	4,49
C-1-9	92,3	636,2	16,15	1,78	0,99	4,94
C-1-10	93,7	645,7	16,21	2,21	1,40	5,37
C-2-1	90,5	623,9	19,16	3,05	0,81	5,44
C-2-2	87,8	605,1	17,49	2,66	1,23	4,22

cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
C-2-3	91,1	627,9	16,82	2,39	1,71	4,66
C-2-4	87,5	603,6	17,32	1,72	1,71	4,86
C-2-5	92,0	634,4	16,30	1,12	1,52	4,40
C-2-6	93,9	647,3	18,05	1,91	1,09	4,80
C-2-7	90,1	621,4	18,38	2,58	1,30	4,75
C-2-8	91,9	633,8	18,04	2,60	1,29	4,92
C-2-9	91,0	627,7	18,59	2,44	1,10	5,54
C-2-10	87,4	602,8	17,08	3,57	0,72	4,37
C-3-1	92,4	637,3	17,16	3,14	1,39	4,64
C-3-2	91,4	630,3	18,04	1,42	1,33	4,36
C-3-3	88,6	610,9	18,86	1,25	1,11	5,22
C-3-4	90,0	620,8	17,53	1,22	1,76	4,80
C-3-5	90,2	621,6	22,09	2,14	1,38	6,05
C-3-6	89,2	615,1	22,62	1,49	1,64	3,75
C-3-7	87,1	600,5	19,78	1,79	1,03	5,12
C-3-8	91,0	627,7	18,58	1,25	1,35	6,43
C-3-9	88,9	612,9	17,93	2,99	1,04	5,17
C-3-10	88,2	608,3	15,97	1,72	1,12	4,48
C-4-1	89,8	619,3	20,27	1,62	1,77	5,94
C-4-2	93,2	642,3	19,21	1,29	1,88	6,95
C-4-3	92,8	639,6	21,50	1,40	1,46	4,80
C-4-4	90,9	626,8	21,75	1,53	1,79	5,84
C-4-5	94,6	651,9	21,04	1,08	1,83	4,75
C-4-6	93,2	642,5	21,58	1,66	1,63	4,82
C-4-7	90,4	623,5	17,07	1,76	1,88	4,05
C-4-8	91,1	628,3	15,25	1,85	1,85	3,85
C-4-9	89,3	615,8	14,83	1,70	1,19	5,27
C-4-10	88,1	607,3	15,67	1,66	1,54	2,95
D-1-1	91,6	631,7	16,99	3,06	1,05	5,80
D-1-2	88,3	609,0	15,91	2,52	1,40	5,72
D-1-3	92,5	638,0	14,82	2,74	1,37	4,13
D-1-4	92,0	634,3	17,07	2,56	1,19	4,15
D-1-5	90,7	625,2	15,41	2,48	0,77	4,73
D-1-6	93,3	643,4	16,62	2,78	1,26	5,28
D-1-7	89,8	619,2	16,09	2,89	1,31	4,85
D-1-8	93,0	641,5	17,41	2,21	1,25	4,87
D-1-9	94,5	651,7	16,24	2,36	1,04	4,17
D-1-10	89,9	620,1	17,38	1,97	1,17	4,33
D-2-1	88,8	612,2	18,60	2,03	1,23	4,65
D-2-2	91,9	633,6	21,14	2,34	1,35	5,09

cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
D-2-3	92,0	634,4	18,97	2,45	1,59	5,55
D-2-4	93,6	645,6	18,61	2,18	1,01	4,90
D-2-5	94,1	648,5	19,97	2,78	1,45	4,79
D-2-6	91,7	632,1	17,78	2,20	1,40	5,12
D-2-7	91,9	633,3	17,47	1,86	2,04	4,95
D-2-8	90,7	625,7	17,22	2,01	1,47	4,60
D-2-9	90,3	622,3	16,92	1,72	1,52	5,04
D-2-10	96,0	662,2	19,40	2,03	1,88	5,33
D-3-1	92,8	639,5	20,32	2,60	0,91	4,12
D-3-2	91,1	628,1	14,29	1,92	1,40	5,57
D-3-3	90,5	624,0	16,93	2,13	1,16	5,56
D-3-4	90,8	626,0	17,95	2,11	1,21	4,45
D-3-5	90,1	621,6	19,11	2,71	1,58	5,59
D-3-6	90,7	625,3	16,91	2,98	1,68	5,54
D-3-7	91,0	627,4	17,76	2,80	1,43	4,21
D-3-8	93,5	644,6	18,12	2,90	1,30	4,57
D-3-9	90,8	625,7	18,45	1,99	1,24	4,44
D-3-10	90,7	625,3	16,61	1,77	1,34	4,73
D-4-1	89,9	619,9	17,88	2,11	1,52	4,50
D-4-2	89,4	616,2	19,38	1,24	1,68	4,08
D-4-3	81,7	563,6	17,94	1,97	1,59	4,60
D-4-4	92,9	640,5	17,88	2,74	1,65	4,71
D-4-5	91,6	631,2	20,43	2,19	1,71	4,22
D-4-6	92,0	634,0	19,27	1,61	1,41	4,01
D-4-7	87,8	605,1	16,15	1,74	1,36	4,23
D-4-8	90,7	625,4	16,11	2,46	1,57	4,32
D-4-9	92,9	640,3	20,49	2,22	1,31	4,92
D-4-10	90,2	621,7	16,52	1,99	1,68	4,05
E-1-1	90,3	622,7	19,08	2,20	1,56	5,93
E-1-2	91,6	631,7	23,12	2,06	1,73	6,28
E-1-3	91,9	633,8	22,01	2,90	1,16	5,89
E-1-4	95,8	660,5	24,32	2,02	1,10	6,35
E-1-5	92,5	637,6	22,72	2,15	2,14	6,52
E-1-6	90,1	621,0	21,89	2,53	1,49	6,63
E-1-7	86,8	598,6	20,04	2,65	1,47	5,92
E-1-8	90,6	624,8	21,50	3,38	1,30	5,65
E-1-9	90,0	620,8	23,37	2,15	1,11	5,84
E-1-10	91,3	629,1	22,54	2,09	1,29	5,57
E-2-1	90,9	626,4	19,37	2,62	1,71	4,98
E-2-2	90,2	622,2	20,50	2,43	1,28	5,14
E-2-3	91,0	627,5	21,67	2,58	1,94	4,31

cód.	$y_1$		$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
	[ksi]	[Mpa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
E-2-4	93,6	645,7	20,83	2,13	2,18	6,55
E-2-5	92,2	635,9	22,43	2,97	1,55	4,69
E-2-6	88,0	606,7	22,50	2,50	1,67	5,51
E-2-7	92,0	634,5	21,25	2,79	1,69	5,86
E-2-8	93,0	641,3	21,28	2,76	1,85	5,80
E-2-9	86,2	594,5	19,84	3,62	1,69	6,17
E-2-10	94,0	648,2	22,87	2,69	1,94	5,97
E-3-1	87,8	605,3	17,55	2,99	1,77	5,65
E-3-2	82,9	571,2	15,37	2,87	1,70	3,52
E-3-3	89,9	619,9	15,23	3,23	1,22	5,34
E-3-4	91,9	633,4	16,32	2,09	1,47	5,54
E-3-5	87,9	605,7	18,11	2,08	1,18	4,47
E-3-6	91,0	627,5	17,61	2,22	1,34	5,96
E-3-7	89,9	620,0	19,52	1,78	1,22	5,42
E-3-8	88,0	607,0	18,50	1,40	1,65	5,51
E-3-9	90,0	620,6	17,47	2,07	1,57	5,30
E-3-10	89,0	613,8	16,54	2,03	1,58	5,18
E-4-1	89,6	617,8	16,35	2,56	1,69	4,30
E-4-2	98,7	680,7	17,65	2,50	1,49	5,07
E-4-3	91,1	628,1	16,61	2,25	2,00	3,91
E-4-4	87,9	605,9	16,46	2,15	1,74	5,01
E-4-5	90,3	622,9	16,23	2,87	1,46	3,98
E-4-6	89,0	613,5	17,48	2,59	1,14	3,17
E-4-7	92,6	638,7	15,84	3,04	1,95	5,42
E-4-8	88,8	612,3	17,89	2,32	1,12	3,65
E-4-9	83,1	573,3	15,96	2,53	1,14	4,05
E-4-10	82,0	565,3	17,09	2,08	1,46	4,70

## CAPITULO 4

### 4 MODELAMIENTO DEL CASO POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez establecido un conjunto de valores posibles para los parámetros de soldadura presentados en el capítulo 3, se procede a modelar el sistema de unión por soldadura mediante el uso de redes neuronales artificiales con el objetivo de *obtener un modelo que aproxime el sistema de unión por soldadura SMAW para la tubería API 5L X70 y que sirva como una herramienta de precalificación de soldadores*. El alcanzar este objetivo ayudará a encontrar los valores del dominio de las variables que intervienen en el proceso de soldadura y ayudarán a ahorrar costos en tiempo y dinero precalificando de forma rápida la habilidad de los soldadores para realizar el WPS, incorporándolos de forma breve a realizar trabajos de montaje y mantenimiento en el campo en donde se esté trabajando con este tipo de tubería. Para alcanzar este objetivo se establece una metodología, la misma que ayudará a implementar a quien interese los modelos de RNA de forma rápida y sencilla con los datos obtenidos.

#### 4.2 METODOLOGÍA

##### 4.2.1 ACTIVIDAD 1: DEFINIR VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA RNA

- 1) Identificar parámetros involucrados en el sistema de unión por soldadura en análisis.
- 2) Definir vectores de entrada y de salida de la RNA en base a los parámetros involucrados.

##### 4.2.2 ACTIVIDAD 2: DETERMINAR ESTRUCTURA DE LA RNA.

- 1) Identificar el tipo de aprendizaje en base a los datos de entrenamiento.
- 2) Determinar arquitectura de la RNA.
- 3) Determinar regla u algoritmo de aprendizaje.

### 4.2.3 ACTIVIDAD 3: PROCESAMIENTO DE DATOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO

- 1) Dividir los datos en datos de entrenamiento y datos de validación.
- 2) Determinar el número óptimo de neuronas ocultas mediante prueba y error.
- 3) Validar modelo.

## 4.3 VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA RNA

### 4.3.1 PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL SISTEMA DE UNIÓN POR SOLDADURA

En la tabla 3.6 se tiene establecido los valores correspondientes a los parámetros de soldadura como:

$x_1$  = Corriente de pase de raíz  $I_r$

$x_2$  = Voltaje de pase de raíz  $V_r$

$x_3$  = Corriente  $I$  para los demás pases

$x_4$  = Voltaje  $V$  para los demás pases

$x_5$  = Rapidez de avance en pase de raíz  $S_r$

$x_6$  = Rapidez de avance en pase caliente  $S_h$

$x_7$  = Rapidez de avance en pase de relleno  $S_F$

$x_8$  = Rapidez de avance en pase intermedio  $S_s$

$x_9$  = Rapidez de avance en pase de recubrimiento  $S_c$ .

Y de la tabla 3.7 se tiene establecido los valores correspondientes a los parámetros del cordón de soldadura como:

$y_1$  = resistencia a la tracción

$y_2$  = ancho de cara

$y_3$  = sobremonta

$y_4$  = penetración de raíz

$y_5$  =ancho de raíz

#### 4.3.2 VECTORES DE ENTRADA Y SALIDA

Dado que, los valores de los parámetros de soldadura cambian según la codificación de la probeta, se define los posibles valores del vector de entrada como:

$$(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, x_4^{(i)}, x_5^{(i)}, x_6^{(i)}, x_7^{(i)}, x_8^{(i)}, x_9^{(i)}) \quad (4.1)$$

Donde el superíndice  $i \in \{1, 2, 3, \dots, 200\}$  indica el número de fila y/o ejemplo al que pertenece.

De igual forma, se define los posibles valores del vector de salida como:

$$(y_1^{(i)}, y_2^{(i)}, y_3^{(i)}, y_4^{(i)}, y_5^{(i)}) \quad (4.2)$$

De la literatura revisada en donde se han utilizado modelos de inteligencia artificial basados en RNA aplicadas a procesos de soldadura se pueden agrupar como:

(K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian (2008), Y. K. Yousif, K. M. Daws & B. I. Kazem (2008), Mohsen Ghofrani, Hamid Shahabi & Farhad Kolahan (2014), I. U Abhulimen & J.I. Achevo (2014)) adaptaron modelos de redes neuronales para predecir las *cualidades mecánicas* del cordón de soldadura.

(Abdullah Al-Faruk, et al. (2010), Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir (2011), S. W. Campbell, A. M. Galloway & N.A. McPherson (2012), R. P. Singh, et al. (2012), Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada (2013)) usaron modelos de redes neuronales para predecir las *cualidades geométricas* del cordón de soldadura.

Con este precedente, se propone definir vectores de entrada y salida que permitan obtener dos modelos de redes neuronales, es decir, obtener vectores para:

- 1) Entrenar un modelo de RNA que permite predecir cualidades mecánicas.
- 2) Entrenar un modelo de RNA que permite predecir cualidades geométricas.

Entonces, dado que el conjunto 4.1 representa los valores con que se realiza la soldadura y son los valores representativos del WPS, se define el vector de entrada como:

$$x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, x_4^{(i)}, x_5^{(i)}, x_6^{(i)}, x_7^{(i)}, x_8^{(i)}, x_9^{(i)}) \quad (4.3)$$

El conjunto de posibles valores del vector de salida dado por (4.2) involucra al valor del parámetro mecánico  $y_1^{(i)}$  el mismo que consta en el PQR, por lo tanto se define el vector de salida correspondiente al parámetro mecánico como:

$$y^{(i)} = (y_1^{(i)}) \quad (4.4)$$

Los demás valores involucrados en (4.2)  $(y_2^{(i)}, y_3^{(i)}, y_4^{(i)}, y_5^{(i)})$  corresponden a los parámetros geométricos, entonces, se define los valores del vector de salida correspondientes a los parámetros geométricos como:

$$y^{(i)} = (y_2^{(i)}, y_3^{(i)}, y_4^{(i)}, y_5^{(i)}) \quad (4.5)$$

Por lo tanto, se tiene los dos siguientes casos:

**Caso 1:** Vectores que forman el conjunto de entrenamiento de una RNA para determinar la cualidad mecánica:

$$x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, x_4^{(i)}, x_5^{(i)}, x_6^{(i)}, x_7^{(i)}, x_8^{(i)}, x_9^{(i)}) \text{ Vector de entrada.}$$

$$y^{(i)} = (y_1^{(i)}) \text{ Vector de salida.}$$

**Caso 2:** vectores que forman el conjunto de entrenamiento de una RNA para determinar cualidades geométricas:

$$x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, x_3^{(i)}, x_4^{(i)}, x_5^{(i)}, x_6^{(i)}, x_7^{(i)}, x_8^{(i)}, x_9^{(i)}) \text{ Vector de entrada.}$$

$$y^{(i)} = (y_2^{(i)}, y_3^{(i)}, y_4^{(i)}, y_5^{(i)}) \text{ Vector de salida.}$$

## 4.4 ESTRUCTURA DE LA RNA

### 4.4.1 TIPO DE APRENDIZAJE

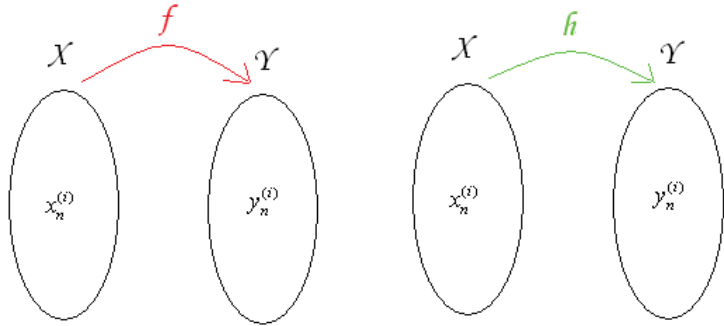
Para determinar la estructura de la RNA se define el conjunto  $X$  como el conjunto de valores con que se realiza la soldadura, es decir, el conjunto de valores  $x^{(i)}$ . Y el conjunto  $Y$  como el conjunto de valores  $y^{(i)}$  correspondientes



a los parámetros del cordón de soldadura. Por lo tanto, se tiene un *aprendizaje de tipo supervisado* dado por el conjunto de datos de entrenamiento:

$$\{(x^{(i)}, y^{(i)}), i = 1, \dots, m / x^{(i)} \in X, y^{(i)} \in Y\} \tag{4.6}$$

El conjunto dado por (4.6) construye una función  $h$  que mapea los dos conjuntos mediante un algoritmo de aprendizaje, tal que,  $h(x^{(i)})$  aproxima los valores de  $f(x^{(i)}) \in Y$  de la función objetivo desconocida bajo la supervisión de los elementos del conjunto  $Y$  como se ilustra en la figura 4.1.



(a) Función desconocida o no observable (b) Función de hipótesis conocida

Figura 4.1 Función objetivo y función hipótesis

**4.4.2 ARQUITECTURA DE LA RNA**

Para los dos casos de vectores definidos se tiene el mismo vector de entrada, sin embargo, los vectores de salida cambian, entonces, se tendrá dos arquitecturas de redes neuronales.

El vector de entrada es un vector de 9 dimensiones  $(x^{(i)} \in \mathbb{R}^9 = X)$

El vector de salida para el modelo de RNA 1 es de dimensión 1  $(y^{(i)} \in \mathbb{R} = Y)$

El vector de salida para el modelo de RNA 2 es de dimensión 4  $(y^{(i)} \in \mathbb{R}^4 = Y)$

Por lo tanto, las funciones de hipótesis  $h$  se definen como:

Función de hipótesis para modelo de RNA 1

$$\begin{aligned}
 h_1 : \mathbb{R}^9 &\rightarrow \mathbb{R} \\
 x^{(i)} &\rightarrow y^{(i)} = h_1(x^{(i)})
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Función de hipótesis para modelo de RNA 2

$$\begin{aligned}
 h_2 : \mathbb{R}^9 &\rightarrow \mathbb{R}^4 \\
 x^{(i)} &\rightarrow y^{(i)} = h_2(x^{(i)})
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Puesto que, no se sabe la naturaleza de la función de hipótesis para ninguno de los casos, es decir, no se sabe si son lineales o no lineales se opta por la *arquitectura del perceptrón multicapa*.

Kur Hornik, Maxell Stinchcombe & Halber White (1989), han demostrado que la arquitectura correspondiente al perceptrón multicapa es un aproximador universal, es decir, es capaz de aproximar alguna función medible de un espacio dimensional finito a otro con la precisión que se desee, para esto, basta proveer un número suficiente de neuronas a las capas ocultas.

#### 4.4.3 REGLA DE APRENDIZAJE

La regla de aprendizaje para el perceptrón multicapa debe ser capaz de minimizar la función costo de esta arquitectura. De la literatura revisada se tiene que:

(A. K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian (2008), Abdullah Al-Faruk, et al. (2010); Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir (2011); Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada (2013); I. U Abhulimen & J.I. Achevo (2014)) utilizaron el algoritmo de retropropagación obteniendo buenos resultados.

Con este precedente y puesto que el algoritmo de retropropagación es el más común del tipo gradiente estocástico (sección 2.3.4.1) se opta por la implementación de este algoritmo para ajustar los parámetros del perceptrón multicapa.

En el APÉNDICE 1 se realiza la formulación formal del algoritmo de retropropagación con el propósito de aclarar como trabaja el algoritmo para ajustar la función de hipótesis, esta formulación fue realizada con la ayuda de las notas de las clases CS229 dictadas por el profesor Andrew Ng en la universidad Stanford.

## 4.5 PROCESAMIENTO DE DATOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO

### 4.5.1 DATOS DE ENTRENAMIENTO Y DATOS DE VALIDACIÓN.

Uno de los requisitos principales de redes neuronales es que los modelos tengan capacidades de generalización, para esto se debe optar por un mecanismo que permita decidir si un modelo es un buen aproximador del sistema en estudio o no. Es decir, se tiene un conjunto finito de modelos  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_p\}$  en el que se tiene que seleccionar uno de ellos. (Andrew Ng. CS229) expone uno de los métodos más sencillos para realizar esta selección, la misma que se conoce como *validación cruzada simple*, y consiste en:

- 1) Dividir aleatoriamente el conjunto de datos de tal forma que las muestras son seleccionadas al azar sobre una distribución uniforme en donde cada muestra tiene la misma probabilidad de selección, de esta división se tiene los datos de entrenamiento (70% de los datos) y los datos de validación cruzada (30% restante).
- 2) Entrenar cada modelo  $M_i$  con el conjunto de datos de entrenamiento obteniendo algunas hipótesis.
- 3) Seleccionar la hipótesis cuya salida presenta el mínimo error con los datos de validación cruzada

Los porcentajes expuestos son típicos, tal como se puede observar en el ejemplo aplicativo de un perceptrón multicapa como un aproximador universal expuesto por Bernhard Lang. (2005). Entonces se tiene:

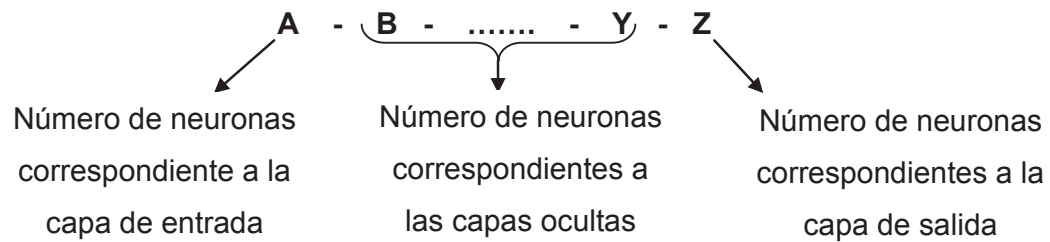
Entrenamiento 70% = 140 datos

Validación cruzada 30%=60 datos

### 4.5.2 NUMERO ÓPTIMO DE NEURONAS

El número óptimo de neuronas en las capas ocultas está determinado por el modelo  $M_i$  de RNA seleccionado, se define el error relativo porcentual como la medida del error entre la hipótesis y los datos de validación cruzada, para la

implementación de los modelos se usa *lenguaje de programación R* (APÉNDICE 2), la nomenclatura del modelo estará dada como:



### Modelo de RNA 1:

**Tabla 4.1** Arquitecturas de RNA implementadas para determinar parámetro mecánico de resistencia a la tracción.

Modelo	Algoritmo de Aprendizaje	Error de ajuste Del modelo	Umbral	Pasos	Observaciones
9-54-1	retropropagación	No converge			
9-18-18-1	retropropagación	920.8632501	0.00546813071	80	Subajuste +
9-18-18-18-1	retropropagación	841.1154304	0.00771194162	11084	Subajuste
9-27-27-1	retropropagación	No converge			
9-36-36-1	retropropagación	656.5771747	0.008881524403	3108	Óptimo
9-36-36-36-1	retropropagación	656-5771746	0.008262323128	515	Sobreajuste
9-180-180-180-180-1	retropropagación	No converge			

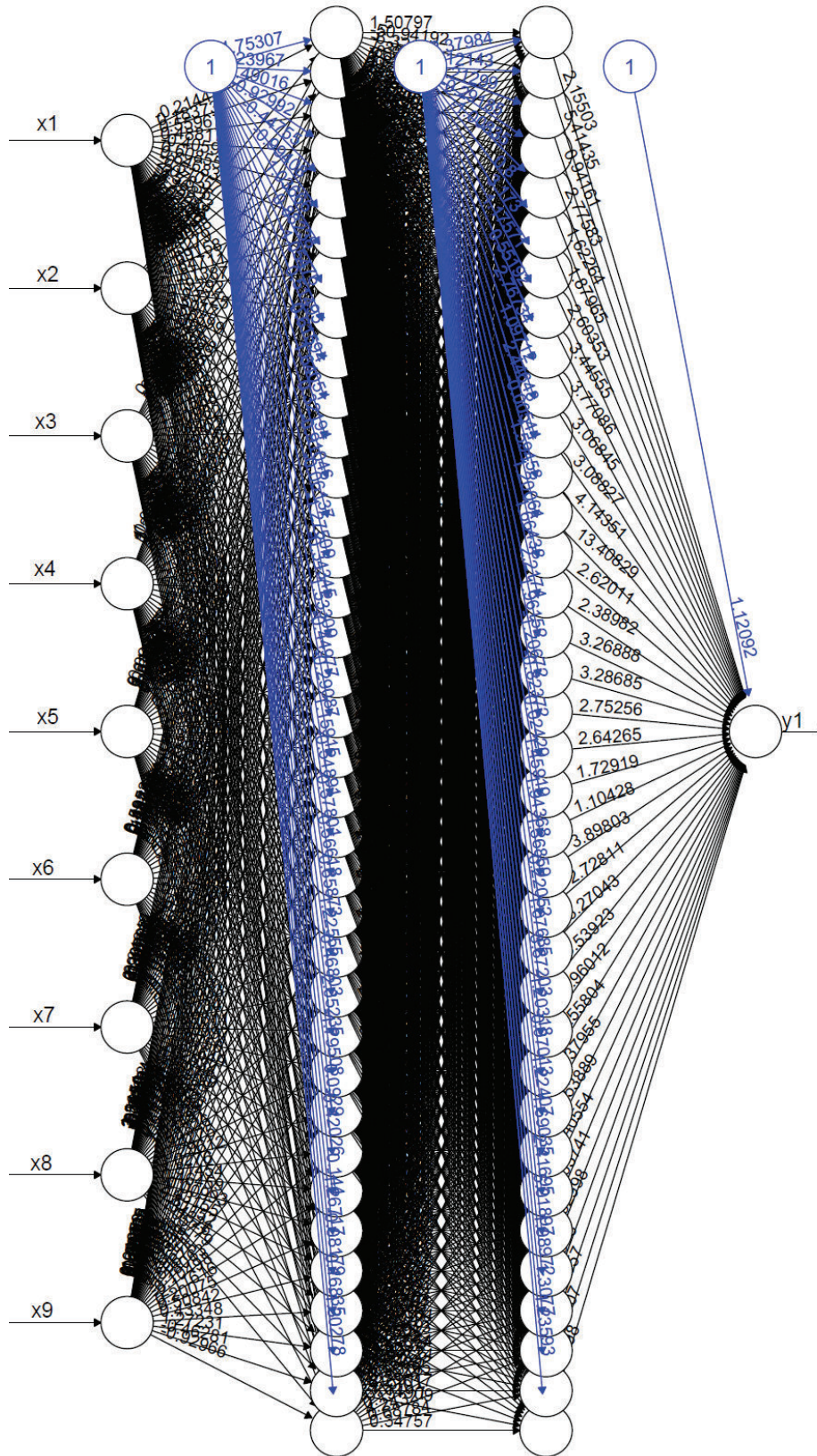


Figura 4.2 Arquitectura de RNA óptima para determinar parámetro mecánico de resistencia a la tracción

## Modelo de RNA 2:

**Tabla 4.2** Arquitecturas de RNA implementadas para determinar características geométricas.

Modelo	Algoritmo de Aprendizaje	Error de ajuste Del modelo	Umbral	Pasos	Observaciones
9-9-9-9-4	retropropagación	No converge			
9-18-18-4	retropropagación	No converge			
9-18-18-18-4	retropropagación	143.845229	0.0076767730899	5006	Óptimo
9-18-18-18-18-4	retropropagación	143.8452189	0.009217905548	3539	Sobreajuste
9-27-27-27-4	retropropagación	143.848218	0.008606085285	1483	Sobreajuste+
9-36-36-36	retropropagación	143.8452176	0.007589054927	885	Sobreajuste++
9-90-90-90-90-4	retropropagación	143.845217	0.009094851133	246	Sobreajuste+++
9-180-180-180-180-4	retropropagación	No converge			

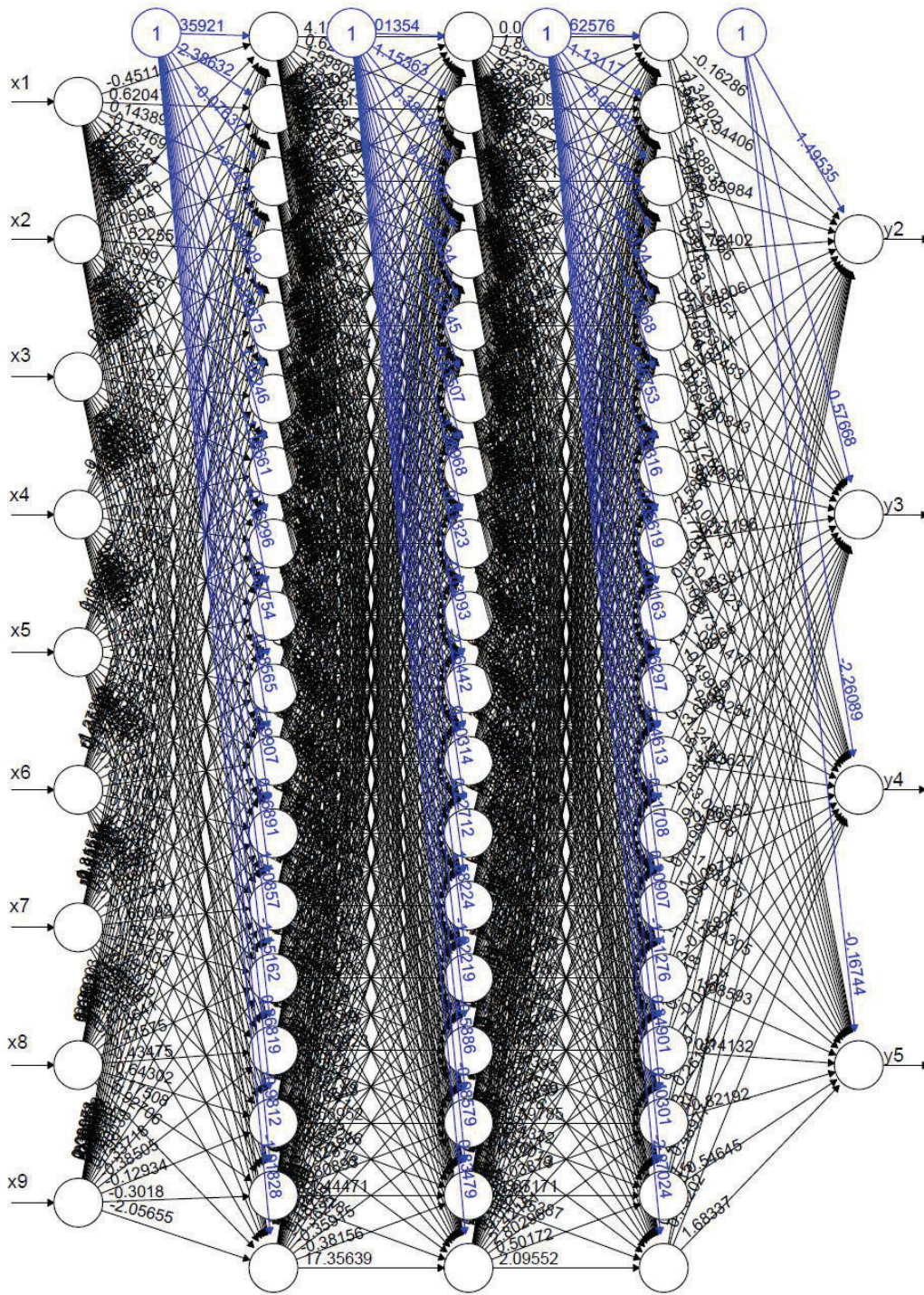
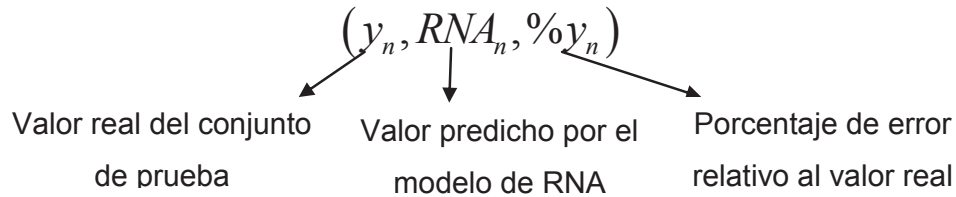


Figura 4.3 Arquitectura de RNA óptima para determinar características geométricas

### 4.5.3 VALIDACIÓN DE MODELOS

Para la validación del modelo en base al error relativo porcentual. Los resultados se presentan según la siguiente nomenclatura:



Además, Para considerar el modelo aceptable y/o representativo del sistema en estudio se define una precisión  $\varepsilon=10\%$ , es decir, si el porcentaje de error es menor al 10% se considera al modelo aceptable, por el contrario, si el error es mayor al 10% el modelo se rechaza.

#### RNA 1

En la tabla 4.3 se observa que los errores están por debajo del 10%. Por lo tanto el modelo es aceptable.

**Tabla 4.3** Valores del vector entra y salida según nomenclatura especificada para predecir parámetro mecánico de resistencia a la tracción.

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	y1	RNA <sub>1</sub>	%y1
1	106	31	164	27	26.76	29.84	16.74	19.19	26.08	92.60	91.33	1.4
2	104	32	161	26	30.13	30.13	16.54	15.18	24.51	91.00	93.23	2.5
3	104	30	140	26	27.86	25.58	16.54	16.54	24.51	89.80	90.60	0.9
4	110	32	143	25	26.25	23.25	16.60	14.74	22.48	90.70	91.01	0.3
5	109	32	188	27	26.08	28.06	16.02	26.42	19.84	95.80	91.10	4.9
6	106	29	191	29	24.51	31.78	16.27	27.30	24.96	93.00	91.39	1.7
7	108	32	167	28	26.08	28.65	11.33	15.12	21.08	87.80	91.00	3.6
8	108	32	167	28	26.08	28.65	11.33	15.12	21.08	87.40	91.00	4.1
9	106	29	173	27	27.30	27.12	14.54	14.37	22.48	89.80	91.90	2.3
10	103	30	152	25	28.06	26.08	14.37	15.35	28.85	90.80	93.37	2.8
11	107	32	182	30	29.91	24.65	17.31	19.84	25.43	92.80	91.05	1.9
12	104	30	140	26	27.86	25.58	16.54	16.54	24.51	91.50	90.60	1.0
13	106	29	191	29	24.51	31.78	16.27	27.30	24.96	86.20	91.39	6.0
14	105	30	185	27	26.25	30.13	17.69	20.34	28.06	92.00	88.68	3.6



	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	y1	RNA <sub>1</sub>	%y1
15	106	31	164	27	26.76	29.84	16.74	19.19	26.08	88.90	91.33	2.7
16	104	32	161	26	30.13	30.13	16.54	15.18	24.51	91.60	93.23	1.8
17	102	29	176	28	26.42	18.92	17.69	18.66	17.53	93.30	91.17	2.3
18	103	30	170	24	25.91	30.82	14.74	15.59	27.67	90.00	89.54	0.5
19	103	30	170	24	25.91	30.82	14.74	15.59	27.67	89.20	89.54	0.4
20	106	29	173	27	27.30	27.12	14.54	14.37	22.48	88.10	91.90	4.3
21	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	90.70	90.73	0.0
22	107	32	182	30	29.91	24.65	17.31	19.84	25.43	90.80	91.05	0.3
23	105	30	185	27	26.25	30.13	17.69	20.34	28.06	92.90	88.68	4.5
24	103	30	170	24	25.91	30.82	14.74	15.59	27.67	91.00	89.54	1.6
25	102	31	146	24	23.11	30.59	16.27	15.89	24.51	89.60	90.19	0.7
26	110	32	197	32	25.75	23.93	18.00	20.04	26.94	88.80	88.96	0.2
27	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	93.00	99.05	6.5
28	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	96.00	99.05	3.2
29	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	95.60	99.05	3.6
30	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	94.10	90.73	3.6
31	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	96.00	90.73	5.5
32	104	30	140	26	27.86	25.58	16.54	16.54	24.51	85.40	90.60	6.1
33	108	30	194	30	25.58	26.59	26.08	27.49	31.53	91.00	88.69	2.5
34	105	30	185	27	26.25	30.13	17.69	20.34	28.06	90.70	88.68	2.2
35	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	93.60	90.73	3.1
36	106	31	164	27	26.76	29.84	16.74	19.19	26.08	92.20	91.33	0.9
37	106	29	173	27	27.30	27.12	14.54	14.37	22.48	93.20	91.90	1.4
38	109	32	188	27	26.08	28.06	16.02	26.42	19.84	90.60	91.10	0.6
39	104	30	140	26	27.86	25.58	16.54	16.54	24.51	90.30	90.60	0.3
40	105	30	185	27	26.25	30.13	17.69	20.34	28.06	89.90	88.68	1.4
41	110	32	143	25	26.25	23.25	16.60	14.74	22.48	90.60	91.01	0.5
42	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	94.90	99.05	4.4
43	105	30	185	27	26.25	30.13	17.69	20.34	28.06	90.20	88.68	1.7
44	102	29	176	28	26.42	18.92	17.69	18.66	17.53	91.60	91.17	0.5
45	104	32	161	26	30.13	30.13	16.54	15.18	24.51	90.10	93.23	3.5

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	y1	RNA <sub>1</sub>	%y1
46	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	91.70	90.73	1.1
47	106	31	164	27	26.76	29.84	16.74	19.19	26.08	92.70	91.33	1.5
48	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	94.40	99.05	4.9
49	110	32	143	25	26.25	23.25	16.60	14.74	22.48	90.90	91.01	0.1
50	102	29	176	28	26.42	18.92	17.69	18.66	17.53	92.50	91.17	1.4
51	103	30	152	25	28.06	26.08	14.37	15.35	28.85	91.40	93.37	2.2
52	109	32	188	27	26.08	28.06	16.02	26.42	19.84	86.80	91.10	5.0
53	100	29	149	25	24.65	26.25	15.95	15.41	24.65	82.80	91.73	10.8
54	110	32	197	32	25.75	23.93	18.00	20.04	26.94	92.60	88.96	3.9
55	106	29	173	27	27.30	27.12	14.54	14.37	22.48	90.90	91.90	1.1
56	106	29	191	29	24.51	31.78	16.27	27.30	24.96	92.20	91.39	0.9
57	104	31	179	29	30.13	34.47	20.97	18.58	20.24	92.00	90.73	1.4
58	108	30	194	30	25.58	26.59	26.08	27.49	31.53	87.80	88.69	1.0
59	105	31	158	27	24.51	24.51	14.13	13.88	26.25	97.30	99.05	1.8
60	103	30	155	28	23.38	24.21	14.63	13.65	18.83	95.40	93.74	1.7

## RNA 2

En la tabla 4.4 se observa que los errores superan el 10%. Por lo tanto el modelo no es aceptable (se rechaza).

**Tabla 4.4** Valores del vector de salida según nomenclatura especificada para predecir parámetros geométricos.

	y2	nny2	%y2	y3	nny3	%y3	y4	nny4	%y4	y5	nny5	%y5
1	17.58	19.00	8.10	1.88	2.25	19.70	0.94	1.53	62.80	3.91	6.33	61.90
2	19.81	18.31	7.60	3.08	2.08	32.50	0.96	1.58	64.60	5.63	6.21	10.30
3	16.79	18.49	10.10	2.85	2.02	29.10	1.22	1.38	13.10	4.75	5.85	23.20
4	16.92	18.12	7.10	1.85	1.69	8.60	1.46	1.37	6.20	4.73	6.10	29.00
5	24.32	14.57	40.10	2.02	2.86	41.60	1.10	1.49	35.50	6.35	5.19	18.30
6	21.28	10.87	48.90	2.76	2.65	4.00	1.85	3.39	83.20	5.80	4.46	23.10
7	17.49	18.16	3.80	2.66	2.03	23.70	1.23	1.59	29.30	4.22	6.18	46.40
8	17.08	18.16	6.30	3.57	2.03	43.10	0.72	1.59	120.80	4.37	6.18	41.40

	y2	nny2	%y2	y3	nny3	%y3	y4	nny4	%y4	y5	nny5	%y5
9	20.27	18.18	10.30	1.62	2.04	25.90	1.77	1.59	10.20	5.94	6.18	4.00
10	17.03	18.45	8.30	3.09	2.10	32.00	1.26	1.59	26.20	6.25	6.25	0.00
11	20.32	18.28	10.00	2.60	2.05	21.20	0.91	1.57	72.50	4.12	6.20	50.50
12	15.67	18.49	18.00	3.08	2.02	34.40	1.38	1.38	0.00	4.92	5.85	18.90
13	19.84	10.87	45.20	3.62	2.65	26.80	1.69	3.39	100.60	6.17	4.46	27.70
14	19.27	18.36	4.70	1.61	1.95	21.10	1.41	1.58	12.10	4.01	6.25	55.90
15	16.04	19.00	18.50	1.74	2.25	29.30	1.23	1.53	24.40	4.71	6.33	34.40
16	19.73	18.31	7.20	2.28	2.08	8.80	1.08	1.58	46.30	5.55	6.21	11.90
17	16.62	19.17	15.30	2.78	2.19	21.20	1.26	1.05	16.70	5.28	6.08	15.20
18	17.53	19.67	12.20	1.22	2.39	95.90	1.76	1.54	12.50	4.80	6.46	34.60
19	22.62	19.67	13.00	1.49	2.39	60.40	1.64	1.54	6.10	3.75	6.46	72.30
20	15.67	18.18	16.00	1.66	2.04	22.90	1.54	1.59	3.20	2.95	6.18	109.50
21	17.22	10.47	39.20	2.01	4.98	147.80	1.47	3.52	139.50	4.60	4.59	0.20
22	17.95	18.28	1.80	2.11	2.05	2.80	1.21	1.57	29.80	4.45	6.20	39.30
23	20.49	18.36	10.40	2.22	1.95	12.20	1.31	1.58	20.60	4.92	6.25	27.00
24	18.58	19.67	5.90	1.25	2.39	91.20	1.35	1.54	14.10	6.43	6.46	0.50
25	16.59	18.59	12.10	2.42	2.24	7.40	1.53	1.60	4.60	5.13	6.25	21.80
26	17.89	18.74	4.80	2.32	2.12	8.60	1.12	1.17	4.50	3.65	6.05	65.80
27	18.40	17.92	2.60	2.51	1.91	23.90	1.30	1.59	22.30	5.17	6.13	18.60
28	17.85	17.92	0.40	2.88	1.91	33.70	1.33	1.59	19.50	5.37	6.13	14.20
29	18.04	17.92	0.70	3.41	1.91	44.00	1.56	1.59	1.90	5.89	6.13	4.10
30	19.97	10.47	47.60	2.78	4.98	79.10	1.45	3.52	142.80	4.79	4.59	4.20
31	19.40	10.47	46.00	2.03	4.98	145.30	1.88	3.52	87.20	5.33	4.59	13.90
32	17.08	18.49	8.30	2.63	2.02	23.20	1.43	1.38	3.50	4.33	5.85	35.10
33	17.61	19.45	10.40	2.22	1.98	10.80	1.34	1.27	5.20	5.96	6.24	4.70
34	16.11	18.36	14.00	2.46	1.95	20.70	1.57	1.58	0.60	4.32	6.25	44.70
35	18.61	10.47	43.70	2.18	4.98	128.40	1.01	3.52	248.50	4.90	4.59	6.30
36	17.73	19.00	7.20	2.41	2.25	6.60	1.80	1.53	15.00	5.41	6.33	17.00
37	21.58	18.18	15.80	1.66	2.04	22.90	1.63	1.59	2.50	4.82	6.18	28.20
38	21.50	14.57	32.20	3.38	2.86	15.40	1.30	1.49	14.60	5.65	5.19	8.10
39	18.12	18.49	2.00	2.76	2.02	26.80	1.19	1.38	16.00	4.85	5.85	20.60

	y2	nny2	%y2	y3	nny3	%y3	y4	nny4	%y4	y5	nny5	%y5
40	17.88	18.36	2.70	2.11	1.95	7.60	1.52	1.58	3.90	4.50	6.25	38.90
41	14.33	18.12	26.40	2.28	1.69	25.90	1.58	1.37	13.30	5.97	6.10	2.20
42	16.97	17.92	5.60	2.28	1.91	16.20	1.11	1.59	43.20	5.61	6.13	9.30
43	16.52	18.36	11.10	1.99	1.95	2.00	1.68	1.58	6.00	4.05	6.25	54.30
44	16.99	19.17	12.80	3.06	2.19	28.40	1.05	1.05	0.00	5.80	6.08	4.80
45	19.10	18.31	4.10	2.39	2.08	13.00	1.18	1.58	33.90	4.88	6.21	27.30
46	17.78	10.47	41.10	2.20	4.98	126.40	1.40	3.52	151.40	5.12	4.59	10.40
47	18.66	19.00	1.80	1.83	2.25	23.00	1.45	1.53	5.50	5.26	6.33	20.30
48	18.80	17.92	4.70	2.68	1.91	28.70	1.42	1.59	12.00	4.15	6.13	47.70
49	18.20	18.12	0.40	2.63	1.69	35.70	1.74	1.37	21.30	3.32	6.10	83.70
50	14.82	19.17	29.40	2.74	2.19	20.10	1.37	1.05	23.40	4.13	6.08	47.20
51	15.92	18.45	15.90	1.78	2.10	18.00	1.21	1.59	31.40	4.28	6.25	46.00
52	20.04	14.57	27.30	2.65	2.86	7.90	1.47	1.49	1.40	5.92	5.19	12.30
53	18.92	18.18	3.90	3.20	2.02	36.90	1.77	1.60	9.60	5.52	6.20	12.30
54	15.84	18.74	18.30	3.04	2.12	30.30	1.95	1.17	40.00	5.42	6.05	11.60
55	21.75	18.18	16.40	1.53	2.04	33.30	1.79	1.59	11.20	5.84	6.18	5.80
56	22.43	10.87	51.50	2.97	2.65	10.80	1.55	3.39	118.70	4.69	4.46	4.90
57	18.97	10.47	44.80	2.45	4.98	103.30	1.59	3.52	121.40	5.55	4.59	17.30
58	17.55	19.45	10.80	2.99	1.98	33.80	1.77	1.27	28.20	5.65	6.24	10.40
59	16.61	17.92	7.90	2.90	1.91	34.10	0.97	1.59	63.90	4.77	6.13	28.50
60	16.45	18.11	10.10	1.59	1.76	10.70	1.67	1.44	13.80	4.75	6.12	28.80

## CAPITULO 5

### 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 WPS PARA TUBERÍA API 5L X 70

Puesto que, aproximadamente el 90% de los ensayos realizados a las probetas durante la obtención de datos cumplen los requerimientos de la norma API 1104 (ver ANEXO 5), se puede tener un rango amplio para los valores de las variables del WPS, por lo tanto, se establece el WPS N°-1 (ANEXO 2) calificado con PQR N°-1 (ANEXO 3) junto con los ensayos del ANEXO 5.

#### 5.2 ANÁLISIS DE LOS MODELOS

**Modelo RNA1: modelo para predecir cualidad mecánica de resistencia a la tracción.**

Como se pudo observar los resultados que predice el modelo RNA 1 (ver tabla 4.3) se encuentran dentro del valor épsilon definido  $\varepsilon=10\%$  por lo que se considera un modelo exacto. Por lo tanto, el parámetro de resistencia a la tracción de la unión de soldadura es un parámetro físico determinante del sistema.

**Modelo RNA2: modelo para predecir cualidades geométricas del cordón de soldadura.**

Similarmente, como se pudo observar los resultados que predice el modelo RNA 2 (ver tabla 4.4) se encuentran fuera del valor épsilon definido  $\varepsilon=10\%$  por lo que no se considera un modelo exacto. Por lo tanto, los parámetros geométricos no son determinantes del sistema.

#### 5.3 PRECALIFICACIÓN

El modelo aceptable correspondiente a la RNA1 se considera representativo del sistema de unión por soldadura SMAW para la tubería API 5L X70, el mismo que tiene la capacidad de predecir el valor del parámetro mecánico de resistencia a la tracción. Por lo tanto, el modelo RNA1 junto con el formato WPQ del ANEXO 4 es la herramienta que servirá para precalificar a los soldadores.

## CAPITULO 6

### 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo en el que propone el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para modelar el sistema de unión por soldadura SMAW de tubería API 5L X70 de transporte de crudo, se obtiene las siguientes conclusiones:

#### 6.1 CONCLUSIONES

- 1) De los modelos presentados se concluye que el modelo de RNA1 para determinar el parámetro mecánico de resistencia a la tracción es el modelo que representa el sistema de unión por soldadura SMAW para la tubería API 5L X 70, el mismo que permitirá simular la interacción entre las variables involucradas. Por el contrario, el modelo de RNA2 que involucra parámetros geométricos no representa el sistema de unión por soldadura SMAW para la tubería API 5L X 70, por lo que no se tiene un modelo que permita simular la interacción de los parámetros que involucran características geométricas.
- 2) Se utilizó el concepto de error relativo porcentual para determinar el poder de generalización de los modelos planteados, el error relativo porcentual es una medida del valor absoluto de la diferencia entre el valor calculado por el modelo y el valor experimental dividida para el valor experimental y expresada en porcentaje.
- 3) El modelo de RNA1 que permite simular la interacción de los parámetros de soldadura junto con el WPQ del ANEXO 4 constituyen una herramienta para precalificar soldadores de tubería API 5L X 70 de fácil implementación en la industria del petróleo.
- 4) El WPQ para precalificación que se provee es un aproximado bastante cercano a un WPQ de calificación.
- 5) El WPS presentado está calificado con un PQR que anexa aproximadamente el 90% de aceptación de los resultados de un total de 200 ensayos de tracción y 160 ensayos de doblado de lado.

- 6) El proceso experimental de obtención de datos se realizó con personal calificado en procesos similares, por lo tanto se puede decir que los datos obtenidos son confiables.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- 1) Se debe realizar un análisis previo de las características que formarán los vectores de entrada y salida para obtener un modelo o modelos que aproximen el sistema. Las redes neuronales artificiales son una herramienta bastante sencilla a modo aplicativo, sin embargo, los modelos matemáticos que hacen posible su funcionamiento podrían complicar en mayor o menor medida la implementación de esta herramienta a los usuarios, por lo que se recomienda usar las librerías de los lenguajes de programación que permitan la implementación de estos modelos de forma fácil.
- 2) Se debe establecer un indicador de la medida del error para validar el problema, de tal forma que ayude a determinar el número óptimo de neuronas capaces de realizar el trabajo, evitando el sub ajuste y el sobre ajuste del modelo.
- 3) Para la precalificación de los soldadores se recomienda realizar un cordón y dividirlo en 4 partes, obteniendo las 4 medidas que indica el WPQ.
- 4) La toma de datos experimentales se debe realizar siguiendo metodologías y/o estrategias que estén acorde a normas.

## 7 REFERENCIAS

- Abdullah Al-Faruk, et al. (2010). Prediction of Weld Bead Geometry and Penetration in Electric Arc Welding using Artificial Neural Networks. IJMME-IJENS.
- A. K. Lakshminarayanan & V. Balasubramanian. (2008). Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints. Elsevier. India; 2008.
- Amit Kumar, Vikas Chauhan & Ankur Singh Bist. (2013). Role of Artificial Neural Network in Welding Technology; International Journal of Computer Applications. India.
- Andrew Ng. (CS229). Lectures Notes-Regularization and model selection.
- Asif Iqbal, Saeed M. Khan & H. Sahir. (2011). ANN Assisted Prediction of Weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding of HSLA Steels; WCE; London.
- ANSI/AWS A3.0 (1994) Standard Welding Terms and Definition;.
- API 5L (2014); specification for Line Pipe; Forty-third edition
- API 1104 (2013), Welding of Pipelines and Related Facilities.
- AWS A5.5/A5.5M (2006) Specification for Low-Allow Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.
- Bernahard Lang. (2005). Monotonic Multi-layer Perceptron Networks as universal approximators. D-81730 Munich, Germany.
- David J. Montana, Bolt Beranek & Newman Inc. Neuronal Network Using Genetic Algorithms. Cambridge. MA 02138.
- David W. Opitz & Jude W. Shavlik. (1999). A genetic Algorithm Approach for Creating Neuronal Network Ensembles. Ed. Springer-Verlag. London. Pp 79-97.
- Francisco J. Solis & Roger J-B west. (1981). Minimization By Random Search Techniques. University of Kentucky.



- Henry Hortwitz. (1976). soldadura aplicaciones y práctica. Alfaomega. Mexico
- I. U Abhulimen & J.I. Acevo. (2014). Application Of Artificial Neural Network In Predicting The Weld Quality Of A Tungsten Inert Gas Welded Mild Steel Pipe Joint. IJSTR.
- Kurt Hornik, Maxwell Stinchcombe & Halber White. (1989). Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. 359-366.
- Mohd Idris, Yasuhira Okamoto & Akira Ocada. (2013). Neural Network Modeling for Prediction of Weld Bead Geometry in Laser Microwelding. Hindawi Publishing Corporation.
- Mohsen Ghofrani, Hamid Shahabi & Farhad Kolahan. (2014). Evaluate and Control the Weld Quality, using Acoustic Data and Artificial Neural Network Modeling. Department of Mechanical Engineering. University of Mashhad. Iran.
- Martin T. Hagan, Howard B. Demuth & Mark Beale. (2002). Neuronal Network Design.
- Pedro Isasi & Ines M. Galván (2004); Redes de Neuronas Artificiales. Un Enfoque Práctico. Ed. PEARSON Printece Hall. Madrid.
- R. P. Singh, et al. (2012). The Effect of Process Parameters on Penetration in Shielded Metal Arc Welding under Magnetic Field using Artificial Neural Networks. IJAIEM.
- S. W. Campbell, A. M. Galloway & N.A. McPherson. (2012). Artificial Neural Network Prediction of Weld Geometry Performed Using GMAW with Alternating Shielding Gases; Welding Journal.
- Y. K. Yousif, K. M. Daws & B. I. Kazem (2008). Prediction of Friction Stir Welding Characteristic Using Neural Network. JJMIE. Iraq.

## **APÉNDICE**

## APÉNDICE 1: ALGORITMO DE RETROPROPAGACIÓN

### Función costo de RNA

Para determinar los parámetros de la RNA se empieza estableciendo la función costo que es la mediada del error de aproximación, en la sección (2.3.4.1) se definió la función costo según la ecuación (2.23) como:

$$E(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (J(m)) \quad (1)$$

Donde  $J(m)$  representa el error cuadrático promedio dado por la métrica para regresión logística como:

$$J(m) = \text{Cost}(h_\theta(x), y) = -y \log(h_\theta(x)) - (1-y) \log(1-h_\theta(x)) \quad (2)$$

Para una RNA la métrica va ser una generalización de esta, donde en lugar de tener básicamente solo una unidad de salida de regresión logística se puede tener  $K$  de estas, entonces *la métrica para una capa* estará dada por:

$$\begin{aligned} \text{Cost}(h_\theta(x), y) &= \sum_{k=1}^K \text{Cost}([h_\theta(x)]_k, y_k) \\ &= \sum_{k=1}^K \left[ -y_k \log([h_\theta(x)]_k) - (1-y_k) \log(1-[h_\theta(x)]_k) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (1) para  $m$  ejemplos de entrenamiento la función de costo será:

$$\begin{aligned} E(\theta) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \text{Cost}(h_\theta(x^{(i)}), y^{(i)}) \right) \\ &= -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \left[ y_k^{(i)} \log(h_\theta(x^{(i)}))_k + (1-y_k^{(i)}) \log(1-h_\theta(x^{(i)}))_k \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

$$h_\theta(x^{(i)}) \in \mathbb{R}^K \text{ y } (h_\theta(x^{(i)}))_k = g(\theta^T x)_k = k^{\text{th}} \text{ salida}$$

Ahora la RNA muestra vectores en  $\mathbb{R}^K$  en donde  $K$  podría ser igual a 1 si se tiene el problema de clasificación binaria, se denota  $(h_\theta(x^{(i)}))_k$  la salida

$k$ -ésima, es decir  $h_{\theta}(x^{(i)})$  es un vector de  $K$  dimensiones, y así el subíndice  $k$  solo selecciona el elemento  $k$ -ésimo del vector. Además, Para el caso de una capa la matriz de pesos es:

$$\theta_{ki} = [\theta^{(k)}]_i \quad (5)$$

Donde  $\theta^{(k)}$  es el vector para la  $k^{th}$  salida.

Para el caso de múltiples capas, la matriz de pesos es:

$$\theta_{ki}^{(l)} = [\theta^{(k;l)}]_i \quad (6)$$

Es decir, esto  $[\theta^{(k)}]_i$  es solo para la capa  $l$ , por lo tanto la matriz  $\theta^{(k)}$  es la matriz de parámetros que se asocia con la capa  $l$ .

$E(\theta)$  Es  $1/m$  de la suma de un término similar a lo que se tenía en la regresión logística excepto que se tiene esta suma de  $k=1$  hasta  $K$ , la sumatoria es básicamente una suma sobre la unidad de salida  $K$ .

Ahora ¿cuáles son los rangos de los subíndices en  $\theta_{ki}^{(l)}$ ? Considere  $l=1$  entonces se tiene  $\theta_{ki}^{(1)}$  para el caso de una sola capa, note que  $S_1 = S_l = n+1 =$  número de entradas en el vector  $x$  sumadas las oscilaciones, entonces  $i = 1, 2, \dots, S_l$ , luego para  $k$  se tiene  $S_2 = S_{l+1} = k =$  número de salidas, entonces  $k = 1, 2, \dots, S_{l+1}$  por lo tanto podemos mejorar la notación de la matriz de parámetros dada por la ecuación (2.81) como:

$$\theta_{ki}^{(l)} = [\theta^{(k;l)}]_i \quad l = 1, 2, 3 \quad i = 0, 1, 2, \dots, S_l \quad k = 1, 2, 3, \dots, S_{l+1}$$

Y en general para una RNA es similar excepto que  $l = 1, 2, \dots, L-1$ .

*Para aclarar el panorama y poder generalizar luego sus resultados para una red neuronal cualesquiera, suponga que se tiene una red como la que se muestra en la figura A1.*

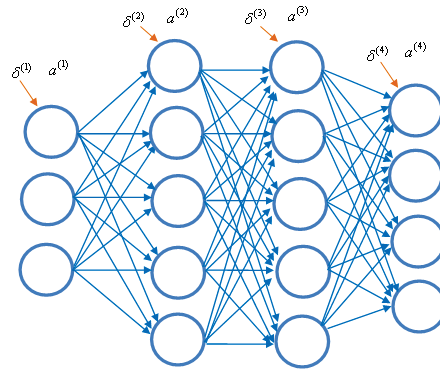


Figura A1: Ejemplo de RNA

Donde  $a^{(1)} = x$  y  $a^{(4)} = y$ , Y suponga que se tiene un conjunto de entrenamiento:

$$\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$$

Se nota  $L$  como el número total de capas en la red, así para la red que se muestra en la figura A1 se tendría que  $L=4$ , se va usar  $S_l$  para denotar el número de unidades o neuronas en la capa  $l$  sin contar la unidad de oscilación, entonces para el ejemplo se tendría  $S_1 = 3$ ,  $S_2 = 5$ ,  $S_3 = 5$  y  $S_4 = S_L = 4$ .

Ahora, adaptando la métrica dada por la ecuación (3) a la capa 4 del ejemplo de la figura A1 se tiene:

$$Cost(h_\theta(a^{(3,i)}), y^{(i)}) = \sum_{k=1}^{S_4} \left[ -y_k^{(i)} \log(h_\theta(a^{(3,i)})_k) - (1 - y_k^{(i)}) \log(1 - h_\theta(a^{(3,i)})_k) \right] \quad (7)$$

Luego para realizar la dependencia de  $a^{(3,i)}$  en  $x$  se va usar la convención de sumatoria de Einstein el mismo que especifica que los índices repetidos denotan sumatoria, por ejemplo el término:

$$\left[ \theta^{(2)} a^{(2)} \right]_k = \sum_{\alpha=0}^{S_2} \theta_{k\alpha}^{(2)} a_\alpha^{(2)}$$

Usando la convención queda:

$$\left[ \theta^{(2)} a^{(2)} \right]_k = \theta_{k\alpha}^{(2)} a_\alpha^{(2)}$$

Donde se entiende que la sumatoria aplica sobre el índice repetido  $\alpha$ .

Entonces las activaciones de la RNA del ejemplo de la figura A1 estarán dadas por:

$$a_a^{(4)} = g\left(\left[\theta^{(3)} a^{(3)}\right]_a\right) = g\left(\theta_{aa}^{(3)} a_a^{(3)}\right) \quad (8)$$

$$a_b^{(3)} = g\left(\left[\theta^{(2)} a^{(2)}\right]_b\right) = g\left(\theta_{bb}^{(2)} a_b^{(2)}\right) \quad (9)$$

$$a_c^{(2)} = g\left(\left[\theta^{(1)} a^{(1)}\right]_c\right) = g\left(\left[\theta^{(1)} x\right]_c\right) = g\left(\theta_{c\gamma}^{(1)} x_\gamma\right) \quad (10)$$

La ecuación (10) puede ser escrita como:

$$a_\beta^{(2)} = g\left(\theta_{\beta\gamma}^{(1)} x_\gamma\right) \quad (11)$$

Combinando las ecuaciones (9) y (11) se tiene:

$$a_b^{(3)} = g\left(\theta_{bb}^{(2)} g\left(\theta_{\beta\gamma}^{(1)} x_\gamma\right)\right) \quad (12)$$

Y esto muestra la dependencia de  $a^{(3)}$  en  $x$  sin ambigüedad.

Se puede ahora adherir un superíndice ( $i$ ) si se está hablando sobre  $a^{(3)}$  que surge del ejemplo de entrenamiento  $i$ .

Entonces la ecuación (12) queda:

$$a_b^{(3,i)} = g\left(\theta_{bb}^{(2)} g\left(\theta_{\beta\gamma}^{(1)} x_\gamma^{(i)}\right)\right) \quad (13)$$

Por lo tanto se tiene:

$$\left[h_\theta\left(a^{(3,i)}\right)\right]_k = g\left(\theta_{kb}^{(3)} g\left(\theta_{bb}^{(2)} g\left(\theta_{\beta\gamma}^{(1)} x_\gamma^{(i)}\right)\right)\right) \quad (14)$$

Finalmente se tiene un estado completo de la función costo para  $m$  ejemplos en términos de la métrica para la topología particular del ejemplo representado por la figura A1 como:

$$E\left(\theta^{(3)}, \theta^{(2)}, \theta^{(1)}\right) = \sum_{i=1}^m Cost\left(h_\theta\left(a^{(3,i)}\right), y^{(i)}\right) \\ = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \log\left(h_\theta\left(a^{(3,i)}\right)_k\right) + \left(1 - y_k^{(i)}\right) \log\left(1 - h_\theta\left(a^{(3,i)}\right)_k\right) \right] \quad (15)$$

Donde:

$$\left[ h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right) \right]_k = g \left( \theta_{kb}^{(3)} g \left( \theta_{b\beta}^{(2)} g \left( \theta_{\beta\gamma}^{(1)} x_{\gamma}^{(i)} \right) \right) \right)$$

Para una red arbitraria de **múltiples capas** cuya última capa es  $L$  se puede ver que **la función costo** como resultado de generalizar las ecuaciones (14) y (15) será:

$$\begin{aligned} E \left( \theta^{(L-1)}, \theta^{(L-2)}, \dots, \theta^{(1)} \right) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Cost \left( h_{\theta} \left( a^{(L-1,i)} \right), y^{(i)} \right) \\ &= -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{S_L=K} \left[ y_k^{(i)} \log \left( h_{\theta} \left( a^{(L-1,i)} \right)_k \right) + \left( 1 - y_k^{(i)} \right) \log \left( 1 - h_{\theta} \left( a^{(L-1,i)} \right)_k \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Donde:

$$\left[ h_{\theta} \left( a^{(L-1,i)} \right) \right]_k = g \left( \theta_{ka}^{(L-1)} g \left( \theta_{ab}^{(L-2)} g \left( \theta_{bc}^{(L-3)} \dots g \left( \theta_{wx}^{(2)} g \left( \theta_{xy}^{(1)} x_{yz}^{(i)} \right) \dots \right) \right) \right) \right) \quad (17)$$

*La función costo para una RNA es una función no convexa cuya demostración no se realiza y se toma este hecho como un corolario, entonces teóricamente puede ser susceptible a mínimos locales.*

### Algoritmo de retropropagación

Una vez establecida la función costo para la RNA ahora se debe buscar un algoritmo para minimizar la función costo, en particular se va hablar del algoritmo de retropropagación cuyo objetivo es encontrar los valores de los parámetros  $\theta_{ki}^{(l)}$  que minimiza el valor de la función costo  $E(\theta)$ .

Entonces, puesto que los valores de activación  $a^{(L-1,i)}$  es de hecho una función de  $x^{(i)}$ , se puede escribir:

$$h_{\theta} \left( a^{(L-1,i)} \left( x^{(i)} \right) \right)_k = h_{\theta} \left( x^{(i)} \right)_k \quad (18)$$

Donde  $h_{\theta}$  tiene una forma funcional diferente de estos argumentos  $h_{\theta}$ . Por ejemplo suponga  $y = x^2$  y se tiene:

$$f(y(x)) = f(x) = f(x^2) \quad y = x^2$$

Porque  $f(2) = f(4) \neq f(2)$  así técnicamente uno puede tener algunas etiquetas para distinguir la forma funcional, entonces solo se menciona que  $f(2) \neq f(2)$ .

Aplicando la ecuación (18) al ejemplo de la figura A1 para un ejemplo de entrenamiento  $i$  se tiene:

$$h_{\theta}(a^{(3)})_k = h_{\theta}(x)_k$$

Por lo tanto se debe calcular las derivadas del gradiente de descenso:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \{h_{\theta}(a^{(3)})_k\} = \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \{h_{\theta}(x)_k\}$$

Para esto, empezando con  $l = 3$  se tiene

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{h_{\theta}(a^{(3)})_k\} &= \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{a_k^{(4)}\} = \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{g(z_k^{(4)})\} \\ &= g'(z_k^{(4)}) * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{z_k^{(4)}\} = g'(z_k^{(4)}) * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{[\theta^{(3)} a^{(3)}]_k\} \\ &= g'(z_k^{(4)}) * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{\theta_{k\alpha}^{(3)} a_{\alpha}^{(3)}\} \quad (*) \\ &= g'(z_k^{(4)}) * \delta_{m,k} \delta_{n,\alpha} a_{\alpha}^{(3)} \\ \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \{h_{\theta}(a^{(3)})_k\} &= g'(z_k^{(4)}) * \delta_{m,k} a_n^{(3)} \end{aligned} \quad (19)$$

Ahora para  $l = 2$  se puede empezar desde (\*) entonces se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \{h_{\theta}(a^{(3)})_k\} = g'(z_k^{(4)}) * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \{\theta_{k\alpha}^{(3)} a_{\alpha}^{(3)}\}$$



$$\begin{aligned}
&= g'(z_k^{(4)}) * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ \theta_{k\alpha}^{(3)} g(z_\alpha^{(3)}) \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ g(z_\alpha^{(3)}) \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ z_\alpha^{(3)} \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ \theta_{\alpha\beta}^{(2)} a_\beta^{(2)} \right\} \quad (**) \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) \delta_{m,\alpha} \delta_{n,\beta} a_\beta^{(2)}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ h_\theta(a^{(3)})_k \right\} = g'(z_k^{(4)}) * \theta_{km}^{(3)} * g'(z_m^{(3)}) a_n^{(2)} \quad (20)$$

Ahora para  $l=1$  se empieza desde (\*\*)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^1} \left\{ h_\theta(a^{(3)})_k \right\} &= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^1} \left\{ \theta_{\alpha\beta}^{(2)} a_\beta^{(2)} \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} \left\{ \theta_{\alpha\beta}^{(2)} g(z_\beta^{(2)}) \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) * \theta_{\alpha\beta}^{(2)} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} \left\{ g(z_\beta^{(2)}) \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) * \theta_{\alpha\beta}^{(2)} g'(z_\beta^{(2)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} \left\{ z_\beta^{(2)} \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) * \theta_{\alpha\beta}^{(2)} g'(z_\beta^{(2)}) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} \left\{ \theta_{\beta\gamma}^{(1)} a_\gamma^{(1)} \right\} \\
&= g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) * \theta_{\alpha\beta}^{(2)} g'(z_\beta^{(2)}) \delta_{m,\beta} \delta_{n,\gamma} a_\gamma^{(1)}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^1} \left\{ h_\theta(a^{(3)})_k \right\} = g'(z_k^{(4)}) * \theta_{k\alpha}^{(3)} * g'(z_\alpha^{(3)}) * \theta_{\alpha m}^{(2)} g'(z_m^{(2)}) a_n^{(1)} \quad (21)$$

Resumiendo los tres resultados dados por las ecuaciones (19), (20) y (21) y restaurando el índice de entrenamiento  $i$  (para  $m$  ejemplos de entrenamiento) se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} \left\{ h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right\} = \left[ g' \left( z_k^{(4,i)} \right) \delta_{m,k} \right] a_n^{(3,i)} \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} \left\{ h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right\} = \left[ g' \left( z_k^{(4,i)} \right) \theta_{km}^{(3)} g' \left( z_m^{(3,i)} \right) \right] a_n^{(2,i)} \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} \left\{ h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right\} = \left[ g' \left( z_k^{(4,i)} \right) \theta_{k\alpha}^{(3)} g' \left( z_{\alpha}^{(3,i)} \right) \theta_{\alpha m}^{(2)} g' \left( z_m^{(2,i)} \right) \right] a_n^{(1,i)} \quad (24)$$

Fíjese que la última línea tiene una sumatoria implícita sobre el índice repetido  $\alpha$ . Entonces el patrón parece claro y se podría escribir estas derivadas para una red arbitraria. Es decir, para una red más grande aparecerán más índices repetidos. *El tipo de patrón visto anteriormente es típico de los patrones que implican relación de recursividad.*

Armados con los resultados dados por las ecuaciones (22), (23), (24) ahora se puede calcular las derivadas del gradiente de descenso reales.

Primero, aquí está la función costo dado por la ecuación (15) donde el número total de ejemplos de entrenamiento es temporalmente fijado a  $M$ :

$$E \left( \theta^{(3)}, \theta^{(2)}, \theta^{(1)} \right) = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \log \left( h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right) + \left( 1 - y_k^{(i)} \right) \log \left( 1 - h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right) \right]$$

Esto es porque  $m$  se utiliza posteriormente como un índice en  $\theta_{mn}^{(l)}$ , también se está de acuerdo en pasar por alto el hecho de que  $n$  es también el número de entidades de entrada. Entonces las derivadas del gradiente son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} [E] &= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \log \left( h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right) + \left( 1 - y_k^{(i)} \right) \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \log \left( 1 - h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right) \right] \\ &= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \left( h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right\} \right. \\ &\quad \left. + \left( 1 - y_k^{(i)} \right) \left( 1 - h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ 1 - h_{\theta} \left( a^{(3,i)} \right)_k \right\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \left( h_\theta(a^{3,i})_k \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{3,i})_k \right\} \right. \\
&\quad \left. - (1 - y_k^{(i)}) \left( 1 - h_\theta(a^{3,i})_k \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{3,i})_k \right\} \right] \\
&= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \left( h_\theta(a^{3,i})_k \right)^{-1} - (1 - y_k^{(i)}) \left( 1 - h_\theta(a^{3,i})_k \right)^{-1} \right] \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{3,i})_k \right\}
\end{aligned}$$

Remplazando  $h_\theta(a^{3,i})_k = g(z_k^{(4,i)}) = g(z_k)$  para reducir:

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \left( g(z_k) \right)^{-1} - (1 - y_k^{(i)}) \left( 1 - g(z_k) \right)^{-1} \right] \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{3,i})_k \right\} \\
\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} [E] &= -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} \left( g(z_k) \right)^{-1} - (1 - y_k^{(i)}) \left( 1 - g(z_k) \right)^{-1} \right] \\
&\quad g'(z_k) * \frac{1}{g'(z_k)} \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{3,i})_k \right\}
\end{aligned} \tag{25}$$

Del grupo de términos de términos que aparece en la ecuación (25) se tiene:

$$A = \left[ y_k^{(i)} \left( g(z_k) \right)^{-1} - (1 - y_k^{(i)}) \left( 1 - g(z_k) \right)^{-1} \right] g'(z_k) \tag{26}$$

Abreviando:

$$A = \left[ \frac{y}{g(z)} - \frac{(1-y)}{(1-g(z))} \right] g'(z) \tag{a}$$

De la ecuación previa (2.34) se tiene que:

$$g(z) = (1 - e^{-z})^{-1} \tag{b}$$

$$g'(z) = e^{-z} g^2(z) \tag{b}$$

$$g^2(z) / (1 - g(z)) = g(z) e^z \tag{c}$$

Entonces remplazando (b) en (a) se tiene:

$$A = \left[ \frac{y}{g(z)} - \frac{(1-y)}{(1-g(z))} \right] e^{-z} g^2(z) \quad (d)$$

Luego reemplazando (c) en (d) queda:

$$A = \left[ yg(z) - \frac{(1-y)g^2(z)}{(1-g(z))} \right] e^{-z}$$

$$A = [yg(z) - (1-y)g(z)e^z] e^{-z}$$

$$A = [ye^{-z} - (1-y)]g(z) \quad (e)$$

También puesto que  $y = 0$  o  $y = 1$ , la cantidad anterior ecuación (e) puede ser escrita como:

$$A = (y - g(z))$$

Deshaciendo abreviaturas temporales

$$A = [y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)})] \quad (f)$$

Insertando esta versión simplificada de la ecuación (26) (ecuación (f)) dentro de las derivadas dadas por las ecuaciones (25) se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} [E] = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} [y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)})] * \left[ \frac{1}{g'(z_k^{(4,i)})} \right] \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} \left\{ h_\theta(a^{(3,i)})_k \right\} \quad (27)$$

Rescribiendo las ecuaciones (22), (23) y (24) de la siguiente forma

$$\left[ 1/g'(z_k^{(4,i)}) \right] \partial / \partial \theta_{mn}^{(3)} \left\{ h_\theta(a^{(3,i)})_k \right\} = a_n^{(3,i)} [\delta_{m,k}]$$

$$\left[ 1/g'(z_k^{(4,i)}) \right] \partial / \partial \theta_{mn}^{(2)} \left\{ h_\theta(a^{(3,i)})_k \right\} = a_n^{(2,i)} \left[ \theta_{mn}^{(3)} g'(z_m^{(3,i)}) \right]$$

$$\left[ 1/g'(z_k^{(4,i)}) \right] \partial / \partial \theta_{mn}^{(1)} \left\{ h_\theta(a^{(3,i)})_k \right\} = a_n^{(1,i)} \left[ \theta_{k\alpha}^{(3)} g'(z_\alpha^{(3,i)}) \theta_{am}^{(2)} g'(z_m^{(2,i)}) \right]$$

He insertando en la ecuación (27) se obtiene los resultados finales para las tres derivadas del gradiente:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} [E] = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] a_n^{(3,i)} [\delta_{m,k}] \quad (28)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} [E] = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] a_n^{(2,i)} \left[ \theta_{km}^{(3)} g'(z_m^{(3,i)}) \right] \quad (29)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} [E] = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] a_n^{(1,i)} \left[ \theta_{k\alpha}^{(3)} g'(z_\alpha^{(3,i)}) \theta_{am}^{(2)} g'(z_m^{(2,i)}) \right] \quad (30)$$

De igual forma se podría generalizar las expresiones anteriores para una red de capa arbitraria  $L$ .

Si se define las siguientes cantidades:

$$\delta_m^{(4,i)} = -\sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] [\delta_{m,k}] \quad (31)$$

$$\delta_m^{(3,i)} = -\sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] \left[ \theta_{km}^{(3)} g'(z_m^{(3,i)}) \right] \quad (32)$$

$$\delta_m^{(2,i)} = -\sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] \left[ \theta_{k\alpha}^{(3)} g'(z_\alpha^{(3,i)}) \theta_{am}^{(2)} g'(z_m^{(2,i)}) \right] \quad (33)$$

Entonces las ecuaciones (28), (29) y (30) se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(3)}} [E] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_n^{(3,i)} \delta_m^{(4,i)} \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(2)}} [E] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_n^{(2,i)} \delta_m^{(3,i)} \quad (35)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(1)}} [E] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_n^{(1,i)} \delta_m^{(2,i)} \quad (36)$$

Luego considere:

$$\theta_{ma}^{(2)T} \delta_a^{(3,i)} g'(z_m^{(2,i)}) = \theta_{am}^{(2)} \left\{ -\sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] \left[ \theta_{ka}^{(3)} g'(z_a^{(3,i)}) \right] \right\} g'(z_m^{(2,i)})$$

$$\theta_{ma}^{(2)T} \delta_a^{(3,i)} g'(z_m^{(2,i)}) = -\sum_{k=1}^{S_4} \left[ y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)}) \right] \left[ \theta_{ka}^{(3)} g'(z_a^{(3,i)}) \theta_{am}^{(2)} g'(z_m^{(2,i)}) \right]$$

$$\theta_{ma}^{(2)T} \delta_a^{(3,i)} g'(z_m^{(2,i)}) = \delta_m^{(2,i)} \quad (37)$$

Siguiente, considere:

$$\theta_{ma}^{(3)T} \delta_a^{(4,i)} g'(z_m^{(3,i)}) = \theta_{am}^{(3)} \left\{ -\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{S_4} [y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)})] [\delta_{a,k}] \right\} g'(z_m^{(3,i)})$$

$$\theta_{ma}^{(3)T} \delta_a^{(4,i)} g'(z_m^{(3,i)}) = -\frac{1}{M} \sum_{k=1}^{S_4} [y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)})] [\delta_{a,k} \theta_{am}^{(3)} g'(z_m^{(3,i)})]$$

$$\theta_{ma}^{(3)T} \delta_a^{(4,i)} g'(z_m^{(3,i)}) = \delta_m^{(3,i)} \quad (38)$$

Así se demuestra estos dos hechos (ecuaciones (37) y (38)) explícitamente como:

$$\delta_m^{(3,i)} = [\theta^{(3)T} \delta^{(4,i)}]_m g'(z_m^{(3,i)}) \quad (39)$$

$$\delta_m^{(2,i)} = [\theta^{(2)T} \delta^{(3,i)}]_m g'(z_m^{(2,i)}) \quad (40)$$

Ahora para  $\delta_m^{(4)}$  se tiene:

$$\delta_m^{(4,i)} = -\sum_{k=1}^{S_4} [y_k^{(i)} - g(z_k^{(4,i)})] [\delta_{m,k}]$$

$$\delta_m^{(4,i)} = -[y_m^{(i)} - g(z_m^{(4,i)})]$$

$$\delta_m^{(4,i)} = -[y_m^{(i)} - a_m^{(4,i)}]$$

$$\delta_m^{(4,i)} = [a_m^{(4,i)} - y_m^{(i)}] \quad (41)$$

Resumiendo los resultados dados por las ecuaciones (39), (40) y (41):

$$\delta_m^{(4,i)} = [a_m^{(4,i)} - y_m^{(i)}] \quad a_m^{(4,i)} = h_\theta(x^{(i)})_m$$

$$\delta_m^{(3,i)} = [\theta^{(3)T} \delta^{(4,i)}]_m g'(z_m^{(3,i)})$$

$$\delta_m^{(2,i)} = [\theta^{(2)T} \delta^{(3,i)}]_m g'(z_m^{(2,i)})$$

Se observa la recursividad, es decir,  $\delta^{(3)}$  se calcula a partir de  $\delta^{(4)}$  y  $\delta^{(2)}$  se calcula a partir de  $\delta^{(3)}$  y así sucesivamente (imagine una red con muchas capas L)

La función de activación que corresponde a la función logística está definida como:

$$h_{\theta}(x) = g(\theta^T x) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T x}} = gz = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (42)$$

De donde se tiene:

$$g'(z) = g(z)(1 - g(z)) \quad (43)$$

Se puede ver por ejemplo que:

$$g'(z_m^{(3,i)}) = g(z_m^{(3,i)})(1 - g(z_m^{(3,i)}))$$

Pero  $g(z_m^{(3,i)}) = a_m^{(3,i)}$ , de modo que:

$$g'(z_m^{(3,i)}) = a_m^{(3,i)}(1 - a_m^{(3,i)})$$

Y similarmente para alguna otra capa. Por lo que es de uso más común escribir las secuencias  $\delta$ 's como:

$$\delta_m^{(4,i)} = [a_m^{(4,i)} - y_m^{(i)}]; \quad a_m^{(4,i)} = h_{\theta}(x^{(i)})_m \quad (44)$$

$$\delta_m^{(3,i)} = [\theta^{(3)T} \delta^{(4,i)}]_m a_m^{(3,i)} (1 - a_m^{(3,i)}) \quad (45)$$

$$\delta_m^{(2,i)} = [\theta^{(2)T} \delta^{(3,i)}]_m a_m^{(2,i)} (1 - a_m^{(2,i)}) \quad (46)$$

**Observación:** no hay  $\delta_m^{(1,i)}$  puesto que la primera capa corresponde a la capa de entrada.

Por lo tanto, la intuición del algoritmo de retropropagación es que por cada nodo se va a calcular el término  $\delta_j^{(l)}$  y eso de algún modo va representar el error del nodo  $j$  en la capa  $l$ , así que este término delta en cierto sentido va capturar el error en la activación de ese dúo neuronal, se dice entonces que se está retro propagando los errores de la capa de salida hacia la capas ocultas.

**Con los resultados precedentes y generalizando se obtiene el siguiente algoritmo de retropropagación:**

**El paso cero** es establecer algunos valores (se sugiere valores aleatorios) de inicio para todos los parámetros  $\theta_{ij}^{(l)}$ .

**El primer paso** es hacer la propagación hacia adelante para calcular todos los valores de activación  $a_m^{(l,i)}$  para la red.

$$a_k^{(1,i)} = x_k^{(i)}$$

$$a_k^{(l,i)} = g\left(\theta_{kb}^{(l)} a_b^{(l,i)}\right); l = 2, \dots, L-1$$

$$a_k^{(L,i)} = g\left(\theta_{kb}^{(L)} a_b^{(L,i)}\right) = h_\theta\left(x^{(i)}\right)_k$$

**El segundo paso** es calcular los objetos  $\delta$  que van en la dirección hacia atrás (retropropagación del error).

$$\delta_m^{(L,i)} = \left[ a_m^{(L,i)} - y_m^{(i)} \right]; a_m^{(L,i)} = h_\theta\left(x^{(i)}\right)_m$$

$$\delta_m^{(l,i)} = \left[ \theta^{(l)T} \delta^{(l+1,i)} \right]_m a_m^{(l,i)} \left(1 - a_m^{(l,i)}\right); l = L-1, \dots, 2$$

**El tercer paso** es calcular las derivadas del gradiente de descenso, ahora que se tiene los valores de los  $a_m^{(l,i)}$  y las  $\delta_m^{(l,i)}$ .

$$\frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} [E] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_n^{(l,i)} \delta_m^{(l+1,i)}; l = L-1, \dots, 1$$

**El cuarto paso** corresponde hacer la actualización del gradiente descendente usando estas derivadas que causa las actualizaciones para todos los valores  $\theta_{ij}^{(l)}$  y una reducción resultante de la función costo, este paso es:

$$\theta_{mn}^{(l)} := \theta_{mn}^{(l)} - \alpha \left[ \frac{\partial}{\partial \theta_{mn}^{(l)}} [E] \right]; l = L-1, \dots, 1$$

**El quinto paso** es iterar los pasos desde el paso 1 al paso 4 observando decrecer  $J$  hasta estabilizar en un valor mínimo, entonces se termina con el mejor conjunto de pesos  $\theta_{ij}^{(l)}$  para adaptarse a los datos de entrenamiento.



Con respecto al gradiente de descenso hay que tener en cuenta que para una RNA la función costo  $E(\theta)$  no es convexa y así puede ser susceptible teóricamente a los mínimos locales y de echo los algoritmos como el gradiente de descenso y los métodos de optimización avanzada en teoría se atorán en los óptimos locales, pero resulta que en la práctica esto no representa normalmente un gran problema y aun cuando no se pueda garantizar que estos algoritmos encuentren un óptimo global normalmente los algoritmos como el gradiente de descenso harán un buen trabajo minimizando esta función de costo  $E(\theta)$  y se conseguirá un mínimo local muy bueno incluso si no llega al óptimo global (en esto ayuda mucho empezar desde un punto inicial aleatorio).

## APÉNDICE 2: LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN R.

### Que es R?

R es un lenguaje de programación de distribución libre, bajo la licencia GNU, y se mantiene como un sistema totalmente planificado y coherente para el cómputo estadístico y gráfico, este software corre en distintas plataformas Linux, Windows, MacOS. Depende del sistema operativo pero todo se puede encontrar en:

<https://www.r-project.org/>

El sistema R consta de un sistema base y de paquetes adicionales que extienden su funcionalidad.

Para la instalación de paquetes adicionales según el sistema operativo se tiene:

#### Windows

- Desde la “GUI” o desde la interfaz de XEmacs.
- Desde R, con “install.packages()” como en GNU/Linux.

#### GNU/Linux

- “R CMD INSTALL paquete-x.y.z.tar.gz”
- Desde R, “install.packages()”, “update.packages()”,etc.

### Que es R Studio?

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R, este incluye una consola, editor de sintaxis, así como herramientas para el trazado, la depuración y la gestión de espacio de trabajo. Está disponible para Windows, Mac y Linux. Se puede descargar en:

<https://www.rstudio.com/products/rstudio/>

## Redes neuronales en R

R tiene pocos paquetes para crear modelos de redes neuronales (`neuralnet`, `nnet`, `RSNNS`) uno de ellos que se ha utilizado es el paquete *neuralnet* que me permite entrenar redes neuronales del tipo perceptrón multicapa usando el algoritmo de retropropagación.

### Uso

```
neuralnet(formula, data, hidden = 1, threshold = 0.01,
          stepmax = 1e+05, rep = 1, startweights = NULL,
          learningrate.limit = NULL,
          learningrate.factor = list(minus = 0.5, plus = 1.2),
          learningrate=NULL, lifesign = "none",
          lifesign.step = 1000, algorithm = "rprop+",
          err.fct = "sse", act.fct = "logistic",
          linear.output = TRUE, exclude = NULL,
          constant.weights = NULL, likelihood = FALSE)
```

ARGUMENTOS	DESCRIPCIÓN
<code>formula</code>	Descripción simbólica del modelo a ser ajustado.
<code>data</code>	Una trama de datos que contiene las variables especificadas en la formula.
<code>hidden</code>	Un vector de enteros que especifica el número de neuronas ocultas en cada capa.
<code>threshold</code>	Un valor numérico que especifica el umbral para las derivadas parciales de la función costo.
<code>stepmax</code>	Las medidas máximas para el entrenamiento de la RNA. Alcanzar este máximo conduce a una parada del proceso de entrenamiento.
<code>rep</code>	El número de repeticiones para el entrenamiento de la RNA
<code>startweights</code>	Un vector que contiene valores iniciales para los pesos, los pesos no se inicializan al azar.
<code>learningrate.limit</code>	Un vector o una lista que contiene el limite más bajo y el más alto para la velocidad de aprendizaje. Usado solo para RPROP y GPROP
<code>learningrate.factor</code>	Un vector o una lista que contiene los factores de multiplicación para la taza de aprendizaje superior e inferior

ARGUMENTOS	DESCRIPCIÓN
<code>learningrate</code>	Un valor numérico que especifica la tasa de aprendizaje utilizado por retropropagación tradicional. Usado solo para retropropagación tradicional.
<code>lifesign.step</code>	Un entero que especifica el tamaño de paso para imprimir el umbral mínimo en el modelo LifeSign completa.
<code>algorithm</code>	Una cadena que contiene el tipo de algoritmo para calcular la red neuronal: 'backprop' se refiere a backpropagation 'rprop+' y 'rprop-' se refiere a la retropropagación recilente con y sin retroceso de peso 'sag' y 'slr' induce el uso del algoritmo globalmente convergente modificado.
<code>err.fct</code>	Una función diferenciable que se utiliza para el cálculo del error, alternativamente las cuerdas 'sse' y 'ce' que destacan por la suma de los errores al cuadrado y cross-entropy pueden ser utilizados
<code>act.fct</code>	Una función diferenciable que se utiliza para visualizar el resultado del producto transversal de la covariable o neuronas y los pesos, adicionalmente las cuerdas 'logistic' y 'tanh' son posibles para la función logística y tangente hiperbólica.
<code>linear.output</code>	Logico. Si act.fct no debe aplicarse a las neuronas de salida. Establecida salida lineal a TRUE de lo contrario FALSE.
<code>exclude</code>	Un vector o una matriz que especifica los valores de los pesos que están excluidos del proceso de formación y tratados como solución.
<code>constant.weights</code>	Un vector que especifica los valores de los pesos que son excluidos del proceso de entrenamiento y tratados como fijos.
<code>likelihood</code>	Logico, si la funcion de error es igual a la funcion log-likelihood se calcularan los criterios de información AIC y BIC. Además, el uso del coefidence.interval es significativo

## Código implementado

### RNA1

```

#directorio de trabajo R

rm(list=ls())
setwd("~/R")

#librerías requeridas

library("RSNNS")
library("neuralnet")
library(devtools)

#base de datos .csv de entrenamiento y validacion

trainingdata<-read.csv("DATA1.csv", header = TRUE, sep = ";")
testdata<-read.csv("TEST.csv",header = TRUE, sep = ";")

x<-trainingdata[,c("x1", "x2", "x3", "x4", "x5", "x6", "x7", "x8", "x9")]
y<-trainingdata[,c("y1")]
X<-testdata[,c("x1", "x2", "x3", "x4", "x5", "x6", "x7", "x8", "x9")]
Y<-testdata[,c("y1")]

#modelo RNA1

model<-neuralnet(y1~x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9,
                 trainingdata,hidden = c(36,36),threshold = 0.01)

#grafico de modelo

source_url('https://gist.githubusercontent.com/
plot(model)

#resumen del modelo

summary(model)
model

#validacion

net.results<- compute(model,x)
ls(net.results)

redon<-net.results$net.result
r<-round(redon, digits = 2)
colnames(r)<-c("nny1")

e<-abs(y-r)*100/y
error<-round(e, digits =1)
colnames(error)<-c("%y1")

```

```
#resultados de validacion
salidas<-cbind(y,r,error)
a<-salidas[,c("y1","nny1","%y1")]
print(x)
write.csv(x,file='inputdata.csv')

print(a)
write.csv(a,file='resultdata.csv')
```

**Nota:** para graficar el modelo se realiza directamente desde la fuente del autor a través de la especificación de la dirección web:

[https://gist.githubusercontent.com/fawda123/7471137/raw/466c1474d0a505ff044412703516c34f1a4684a5/nnet\\_plot\\_update.r](https://gist.githubusercontent.com/fawda123/7471137/raw/466c1474d0a505ff044412703516c34f1a4684a5/nnet_plot_update.r)

O se puede implementar el correspondiente código en la consola.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1: CATALOGO DE ELECTRODOS LINCOLN ELECTRIC

STICK (SMAW) ELECTRODE

## Pipeliners® 8P+

Low Alloy, Cellulosic, Pipe • AWS E8010-P1

### Key Features

- ▶ High productivity in vertical down and out-of-position pipe welding
- ▶ Deep penetration
- ▶ Q2 Lot® - Certificate showing actual deposit chemistry available online
- ▶ Clean, visible weld puddle
- ▶ Superior puddle control

### Typical Applications

- ▶ Root pass welding of up to X80 grade pipe
- ▶ Hot, fill and cap pass of up to X70 grade pipe

### Conformances

AWS A5.5/A5.5M: 2006	E8010-P1, E8010-G
ASME SFA-A5.5:	E8010-P1, E8010-G
ABS:	E8010-P1
CSA/CWB W48-06:	E5510-P1

### Welding Positions

All

### DIAMETERS / PACKAGING

Diameter mm (in)	Length in (mm)	50 lb (22.7 kg) Easy Open Can
3.2 (1/8)	14 (350)	ED030826
4.0 (5/32)	14 (350)	ED030827
5.0 (3/16)	14 (350)	ED030828

### MECHANICAL PROPERTIES<sup>(1)</sup> – As Required per AWS A5.5/A5.5M: 2006

	Yield Strength <sup>(2)</sup> MPa (ksi)	Tensile Strength MPa (ksi)	Elongation %	Charpy V-Notch J (ft•lb)	
				@ -29°C (-20°F)	@ -40°C (-40°F)
Requirements - AWS E8010-P1	460 (67) min.	550 (80) min.	19 min.	27 (20) min.	Not Specified
Typical Results <sup>(3)</sup> - As-Welded	475-545 (69-79)	560-670 (81-97)	19-32	49-149 (36-110)	41-119 (30-88)

### DEPOSIT COMPOSITION<sup>(1)</sup> – As Required per AWS A5.5/A5.5M: 2006

	%C	%Mn	%Si	%P	%S
Requirements - AWS E8010-P1	0.20 max.	1.20 max.	0.60 max.	0.03 max.	0.03 max.
Typical Results <sup>(3)</sup>	0.09-0.20	0.55-0.98	0.07-0.27	0.01-0.02	0.01-0.02
	%Ni	%Cr	%Mo	%V	
Requirements - AWS E8010-P1	1.00 max.	0.30 max.	0.50 max.	0.10 max.	
Typical Results <sup>(3)</sup>	0.73-1.00	0.02-0.05	0.13-0.22	0.01 max.	

### TYPICAL OPERATING PROCEDURES

Polarity	Current (Amps)		
	3.2 mm (1/8 in)	4.0 mm (5/32 in)	5.0 mm (3/16 in)
DC+	65-120	100-165	130-210

<sup>(1)</sup>Typical all weld metal. <sup>(2)</sup>Measured with 0.2% offset. <sup>(3)</sup>See test results disclaimer below.  
NOTE: This product contains micro-alloying elements. Additional information available on request.



## ANEXO 2: WPS CALIFICADO

<b>Referencia</b>							
API 1104							
<b>WPS N°-</b>		<b>OCP_EPN 1</b>					
<b>Soporte PQR N°-</b>		<b>OCP_EPN 1</b>					
INFORMACIÓN GENERAL							
<b>Compañía</b>		Escuela Politécnica Nacional					
<b>Revisión N°-</b>		1	<b>Fecha:</b>		30/01/2015	<b>por:</b>	Nelson Remache
<b>Autorizado por</b>		Ing. Gabriel Velasteguí			<b>fecha</b>	09/15/2015	
ESPECIFICACIONES GENERALES							
<b>Aplicación</b>				Soldadura a tope			
<b>Proceso</b>				SMAW			
<b>Material</b>				API 5L X 70			
<b>Diámetro exterior de la tubería</b>		34"		<b>Espesor de la pared</b>		0.502"	
<b>Metal de aporte</b>		E8010 P1		<b>Número de cordones</b>		5	
<b>Diseño de junta</b>		A tope		<b>Tipo de Bisel</b>		En V	
<b>Posición</b>				6 G			
<b>Dirección de soldadura</b>				Ascendente			
<b>Limpieza</b>				Herramientas fuertes			
<b>Temperatura de pre calentamiento</b>				246°C			
<b>Detalle de la junta</b>							
CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS							
PASE	N°	AWS	DIÁMETRO	CORRIENTE	VOLTAJE	DC	RAPIDEZ
raíz	1 <sup>st</sup>	E8010 P1	1/8"	104/110	29/32	+	23.11/30.13
caliente	2 <sup>nd</sup>	E8010 P1	3/16"	140/197	24/32	+	18.92/34.47
relleno	3 <sup>th</sup> (n-1)	E8010 P1	3/16"	140/197	24/32	+	11.33/26.08
intermedio	n	E8010 P1	3/16"	140/197	24/32	+	13.65/27.49
cobertura	(n+1)	E8010 P1	3/16"	140/197	24/32	+	17.53/31.53
<b>OBSERVACIONES:</b>							

## ANEXO 3: PQR SOPORTE

<b>Referencia</b>		API 1104								
<b>PQR N°-</b>	OCP_EPN 1									
<b>WPS N°-</b>	OCP-EPN 1									
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>										
<b>Compañía</b>	Escuela Politécnica Nacional									
<b>Revisión N°-</b>	1	<b>Fecha:</b>	30/01/2015 <b>por:</b> Nelson Remache							
<b>Autorizado por</b>	Ing. Gabriel Velasteguí		<b>fecha</b> 09/15/2015							
<b>Soldadores</b>	Sislema Maza Luis Francisco		<b>Doc. identificación</b> 171576773-5							
	Shunta Ronquillo Edgar Vinicio		171923136-5							
<b>Ensayos realizados por</b>	Nelson Remache		<b>Doc. identificación</b> 050267455-9							
<b>Proceso</b>	SMAW									
<b>Equipo de soldadura</b>	Lincoln INVERTEC V350-PRO									
<b>Material</b>	API 5L X 70									
<b>Diámetro exterior de la tubería</b>	34"	<b>Espesor de la pared</b>	0.502"							
<b>Metal de aporte</b>	E8010 P1	<b>Fabricante</b>	Lincoln							
<b>Diseño de junta</b>	A tope	<b>Tipo de Bisel</b>	En V							
<b>Posición</b>	6 G									
<b>Dirección de soldadura</b>	ascendente									
<b>Temperatura de pre calentamiento</b>	246°C									
<b>CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS</b>										
<b>PASE</b>	<b>N°</b>	<b>AWS</b>	<b>DIÁMETRO</b>	<b>CORRIENTE</b>	<b>VOLTAJE</b>	<b>DC</b>	<b>RAPIDEZ</b>			
raíz	1 <sup>st</sup>	E8010 P1	1/8"	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	+	x <sub>3</sub>			
caliente	2 <sup>nd</sup>	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>6</sub>			
relleno	3 <sup>th</sup> (n-1)	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>7</sub>			
intermedio	n	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>8</sub>			
cobertura	(n+1)	E8010 P1	3/16"	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	+	x <sub>9</sub>			
<b>PRUEBA ENSAYO DE TRACCIÓN</b>										
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Cupón ensayado</b>	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód
<b>Ancho de la probeta [mm]</b>										
<b>Espesor de la probeta[mm]</b>										
<b>Área de la probeta [mm<sup>2</sup>]</b>										
<b>Carga máxima[lbf]</b>										
<b>Resistencia a la tracción [ksi]</b>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>
<b>DOBLADO DE LADO/ROTURA CON ENTALLA</b>										
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
	<b>D.L</b>								<b>R.E</b>	
<b>Cupón ensayado</b>	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	Cód	COD	N/A
<b>resultado</b>										
<b>Observaciones:</b> D.L=Doblado de Lado, R.E=Rotura con Entalla										
Los resultados de los ensayos se emiten por el Laboratorio del Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. (ANEXO 5)										

## ANEXO 4: WPQ DE PRECALIFICACIÓN

<b>Referencia</b>																				
API 1104																				
WPQ N°-																				
WPS N°-	OCP-EPN 1																			
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>																				
Compañía																				
Revisión N°-	Fecha: <input type="text"/>																			
Autorizado por	por: <input type="text"/>																			
Soldador	fecha <input type="text"/>																			
	Doc. identificación <input type="text"/>																			
<b>CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS</b>																				
PASE	N°	AWS	Ø	CORRIENTE				VOLTAJE				RAPIDEZ								
				1	2	3	4	1	2	3	4	min	cm	1	2	3	4			
raíz	1 <sup>st</sup>	E8010 P1	1/8"	<b>X1:</b>					<b>X2:</b>					t:	d:	<b>X3:</b>				
caliente	2 <sup>nd</sup>	E8010 P1	3/16"	<b>X4:</b>					<b>X5:</b>					t:	d:	<b>X6:</b>				
relleno	3 <sup>th</sup> (n-1)	E8010 P1	3/16"	<b>X4:</b>					<b>X5:</b>					t:	d:	<b>X7:</b>				
intermedio	n	E8010 P1	3/16"	<b>X4:</b>					<b>X5:</b>					t:	d:	<b>X8:</b>				
cobertura	(n+1)	E8010 P1	3/16"	<b>X4:</b>					<b>X5:</b>					t:	d:	<b>X9:</b>				
<b>RESULTADOS DE INSPECCIÓN VISUAL</b>																				
Fisuras				Poros																
Falta de penetración				Altura sobremonta de cara																
Falta de fusión				Altura de sobremonta de raíz																
Mordeduras				Apariencia																
<b>RESULTADOS DE TRACCIÓN</b>																				
<b>Predicción RNA1</b>				1				2				3				4				
<b>Y1</b>																				
<b>RESULTADO GENERAL</b>																				
<p><b>Aprobado por:</b></p>																				

## ANEXO 5: ENSAYOS REALIZADOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



### INFORME TÉCNICO

LAEV-MAR.04.15

Quito, 31 de marzo de 2015

**TRABAJO SOLICITADO POR:** Sr. Nelson Oswaldo Remache Valverde

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de juntas soldadas pertenecientes al Sr. Nelson Oswaldo Remache Valverde para el desarrollo del proyecto de titulación "Modelos Basados en Inteligencia Artificial para Análisis y Simulación de WPS, PQR, Y WPQ de Tubería API 5L X-70 De Transporte de Crudo". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional.

#### RESULTADOS

- MUESTRAS:** Doscientas (200) probetas para ensayo de tracción y ciento sesenta (160) probetas para ensayo de doblado de raíz para calificación de acuerdo con la norma API 1104.
- ENSAYO DE TRACCIÓN BAJO LA NORMA API 1104.**

En la tabla 1 se observan los resultados del ensayo de tracción realizados en las probetas. La resistencia mínima especificada para el material API 5L X70 es: 82 ksi (483 MPa).

Tabla 1. Resistencia a la tracción medida en las probetas.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.	Calificación
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa		
A-1-1	27,61	14,59	53.300	237.090	85,4	588,6	FMB	Aprueba
A-1-2	26,71	14,39	54.500	242.428	91,5	630,7	FMB	Aprueba
A-1-3	24,94	14,56	50.800	225.970	90,3	622,3	FMB	Aprueba
A-1-4	25,79	14,35	54.300	241.538	94,7	652,7	FMB	Aprueba
A-1-5	26,15	14,35	52.700	234.421	90,6	624,7	FMB	Aprueba
A-1-6	26,17	14,47	52.600	233.976	89,6	617,9	FMB	Aprueba
A-1-7	25,62	14,48	51.100	227.304	88,9	612,7	FMB	Aprueba



LAEV-EPN

ESCUOLA POLITÉCNICA NACIONAL  
Página 1 de 10

A-1-8	26,59	14,39	52.600	233.976	88,7	611,5	FMB	Aprueba
A-1-9	27,33	14,56	55.400	246.431	89,8	619,3	FMB	Aprueba
A-1-10	26,72	14,50	54.700	243.318	91,1	628,0	FMB	Aprueba
A-2-1	26,34	14,38	53.200	236.645	90,6	624,8	FJS	Aprueba
A-2-2	26,75	14,49	53.400	237.535	88,9	612,8	FJS	Aprueba
A-2-3	25,35	14,37	50.400	224.190	89,3	615,4	FMB	Aprueba
A-2-4	25,54	14,42	51.900	230.863	90,9	626,9	FMB	Aprueba
A-2-5	24,03	14,46	49.800	221.521	92,5	637,5	FMB	Aprueba
A-2-6	23,93	14,49	48.800	217.073	90,8	626,0	FMB	Aprueba
A-2-7	26,12	14,50	53.400	237.535	91,0	627,2	FJS	Aprueba
A-2-8	24,23	14,56	49.600	220.632	90,7	625,4	FMB	Aprueba
A-2-9	26,24	14,67	55.500	246.876	93,0	641,3	FMB	Aprueba
A-2-10	24,54	14,49	50.500	224.635	91,6	631,7	FMB	Aprueba
A-3-1	26,81	14,65	53.500	237.980	87,9	605,9	FMB	Aprueba
A-3-2	26,40	14,38	54.300	241.538	92,3	636,2	FMB	Aprueba
A-3-3	24,44	14,25	42.100	187.270	78,0	537,7	FMB	No Aprueba
A-3-4	25,59	14,34	51.300	228.194	90,2	621,8	FMB	Aprueba
A-3-5	24,29	14,22	50.800	225.970	94,9	654,2	FMB	Aprueba
A-3-6	25,29	14,26	51.400	228.639	92,0	634,0	FMB	Aprueba
A-3-7	24,31	14,26	50.200	223.301	93,4	644,1	FMB	Aprueba
A-3-8	25,48	14,33	50.500	224.635	89,2	615,2	FMB	Aprueba
A-3-9	29,28	14,21	57.800	257.107	89,6	617,9	FMB	Aprueba
A-3-10	23,77	14,20	49.100	218.408	93,8	647,1	FMB	Aprueba
A-4-1	25,82	14,37	53.300	237.090	92,7	639,0	FMB	Aprueba
A-4-2	24,16	14,41	47.800	212.625	88,6	610,7	FJS	Aprueba
A-4-3	26,39	14,35	55.600	247.321	94,7	653,1	FMB	Aprueba
A-4-4	24,44	14,31	44.900	199.725	82,8	571,1	FJS	Aprueba
A-4-5	24,99	14,40	49.000	217.963	87,8	605,7	FJS	Aprueba
A-4-6	22,12	14,40	45.500	202.394	92,2	635,4	FMB	Aprueba
A-4-7	25,40	14,30	52.200	232.197	92,7	639,3	FMB	Aprueba
A-4-8	25,58	14,32	53.600	238.425	94,4	650,9	FMB	Aprueba
A-4-9	26,07	14,47	55.500	246.876	94,9	654,4	FMB	Aprueba
A-4-10	25,60	14,39	50.000	222.411	87,6	603,7	FJS	Aprueba
B-1-1	25,77	14,46	54.700	243.318	94,7	653,0	FMB	Aprueba
B-1-2	23,81	14,37	50.100	222.856	94,5	651,3	FMB	Aprueba
B-1-3	25,69	14,49	54.000	240.204	93,6	645,3	FMB	Aprueba
B-1-4	25,18	14,58	51.800	230.418	91,0	627,6	FMB	Aprueba
B-1-5	22,48	14,53	47.100	209.511	93,0	641,4	FMB	Aprueba
B-1-6	23,69	14,47	49.900	221.966	93,9	647,5	FMB	Aprueba
B-1-7	25,90	14,56	55.300	245.987	94,6	652,3	FMB	Aprueba
B-1-8	26,82	14,56	55.500	246.876	91,7	632,8	FMB	Aprueba
B-1-9	25,33	14,79	52.700	234.421	90,8	625,7	FMB	Aprueba



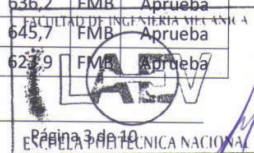
LAEV-EPN

 Página 2 de 10  
 EN LA POLITECNICA NACIONAL

B-1-10	27,02	14,57	55.800	248.211	91,4	630,5	FMB	Aprueba
B-2-1	24,25	14,39	51.700	229.973	95,6	659,0	FMB	Aprueba
B-2-2	27,07	14,37	56.600	251.769	93,9	647,2	FMB	Aprueba
B-2-3	26,75	14,35	55.100	245.097	92,6	638,5	FMB	Aprueba
B-2-4	26,52	14,27	55.900	248.655	95,3	657,1	FMB	Aprueba
B-2-5	27,14	14,34	57.000	253.549	94,5	651,5	FMB	Aprueba
B-2-6	25,23	14,48	52.400	233.087	92,5	638,0	FMB	Aprueba
B-2-7	26,54	14,52	56.500	251.324	94,6	652,2	FMB	Aprueba
B-2-8	26,00	14,48	54.500	242.428	93,4	643,9	FMB	Aprueba
B-2-9	26,05	14,41	55.500	246.876	95,4	657,7	FMB	Aprueba
B-2-10	27,68	14,48	56.700	252.214	91,3	629,3	FMB	Aprueba
B-3-1	26,99	14,35	57.300	254.883	95,4	658,1	FMB	Aprueba
B-3-2	27,86	14,45	59.900	266.448	96,0	661,9	FMB	Aprueba
B-3-3	28,44	14,30	59.500	264.669	94,4	650,8	FMB	Aprueba
B-3-4	25,88	14,32	54.500	242.428	94,9	654,1	FMB	Aprueba
B-3-5	26,29	14,28	54.100	240.649	93,0	641,0	FMB	Aprueba
B-3-6	26,19	14,33	56.600	251.769	97,3	670,8	FMB	Aprueba
B-3-7	26,19	14,33	68.300	303.813	117,4	809,5	FMB	Aprueba
B-3-8	28,34	14,65	57.400	255.328	89,2	615,0	FMB	Aprueba
B-3-9	25,21	14,23	52.400	233.087	94,2	649,7	FMB	Aprueba
B-3-10	27,57	14,27	58.300	259.331	95,6	659,2	FMB	Aprueba
B-4-1	25,41	14,54	53.100	236.200	92,7	639,3	FMB	Aprueba
B-4-2	27,23	14,51	55.200	245.542	90,1	621,5	FMB	Aprueba
B-4-3	23,13	14,52	51.000	226.859	98,0	675,5	FJS	Aprueba
B-4-4	25,30	14,53	52.200	232.197	91,6	631,6	FMB	Aprueba
B-4-5	25,92	14,41	54.000	240.204	93,3	643,1	FMB	Aprueba
B-4-6	26,07	14,48	53.700	238.869	91,8	632,8	FMB	Aprueba
B-4-7	25,30	14,45	52.100	231.752	91,9	633,9	FMB	Aprueba
B-4-8	24,71	14,51	50.600	225.080	91,0	627,8	FMB	Aprueba
B-4-9	26,66	14,59	54.600	242.873	90,6	624,4	FMB	Aprueba
B-4-10	29,27	14,48	61.600	274.010	93,8	646,5	FMB	Aprueba
C-1-1	26,47	14,31	54.000	240.204	92,0	634,1	FMB	Aprueba
C-1-2	28,72	14,39	59.300	263.779	92,6	638,3	FMB	Aprueba
C-1-3	27,35	14,46	56.500	251.324	92,2	635,5	FMB	Aprueba
C-1-4	27,93	14,45	58.000	257.997	92,7	639,3	FMB	Aprueba
C-1-5	27,92	14,59	57.100	253.993	90,4	623,5	FMB	Aprueba
C-1-6	28,49	14,67	57.600	256.217	88,9	613,0	FMB	Aprueba
C-1-7	25,11	14,48	51.100	227.304	90,7	625,2	FMB	Aprueba
C-1-8	25,16	14,55	50.300	223.745	88,6	611,2	FMB	Aprueba
C-1-9	22,05	14,49	45.700	203.284	92,3	636,2	FMB	Aprueba
C-1-10	25,91	14,49	54.500	242.428	93,7	645,7	FMB	Aprueba
C-2-1	25,55	14,40	51.600	229.528	90,5	627,9	FMB	Aprueba



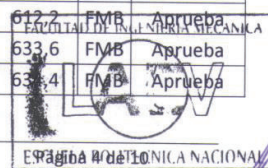
LAEV-EPN

Página 3 de 10  
ESCUELA DE INGENIERIA NACIONAL

C-2-2	22,65	14,41	44.400	197.501	87,8	605,1	FMB	Aprueba
C-2-3	24,74	14,49	50.600	225.080	91,1	627,9	FJS	Aprueba
C-2-4	26,68	14,53	52.600	233.976	87,5	603,6	FMB	Aprueba
C-2-5	24,85	14,39	51.000	226.859	92,0	634,4	FMB	Aprueba
C-2-6	23,75	14,38	49.700	221.077	93,9	647,3	FMB	Aprueba
C-2-7	25,11	14,51	50.900	226.414	90,1	621,4	FMB	Aprueba
C-2-8	25,46	14,39	52.200	232.197	91,9	633,8	FMB	Aprueba
C-2-9	22,98	14,34	46.500	206.842	91,0	627,7	FMB	Aprueba
C-2-10	26,47	14,44	51.800	230.418	87,4	602,8	FMB	Aprueba
C-3-1	28,91	14,39	59.600	265.114	92,4	637,3	FMB	Aprueba
C-3-2	27,82	14,41	56.800	252.659	91,4	630,3	FMB	Aprueba
C-3-3	27,15	14,51	54.100	240.649	88,6	610,9	FMB	Aprueba
C-3-4	24,46	14,50	49.500	220.187	90,0	620,8	FJS	Aprueba
C-3-5	24,15	14,52	49.000	217.963	90,2	621,6	FJS	Aprueba
C-3-6	26,67	14,48	53.400	237.535	89,2	615,1	FJS	Aprueba
C-3-7	24,69	14,49	48.300	214.849	87,1	600,5	FJS	Aprueba
C-3-8	25,03	14,44	51.000	226.859	91,0	627,7	FJS	Aprueba
C-3-9	28,47	14,53	57.000	253.549	88,9	612,9	FJS	Aprueba
C-3-10	25,22	14,44	49.800	221.521	88,2	608,3	FMB	Aprueba
C-4-1	25,03	14,72	51.300	228.194	89,8	619,3	FMB	Aprueba
C-4-2	24,50	14,36	50.800	225.970	93,2	642,3	FMB	Aprueba
C-4-3	22,78	14,35	47.000	209.066	92,8	639,6	FMB	Aprueba
C-4-4	25,90	14,44	52.700	234.421	90,9	626,8	FMB	Aprueba
C-4-5	24,19	14,16	50.200	223.301	94,6	651,9	FMB	Aprueba
C-4-6	24,71	14,29	51.000	226.859	93,2	642,5	FMB	Aprueba
C-4-7	24,73	14,54	50.400	224.190	90,4	623,5	FMB	Aprueba
C-4-8	24,17	14,44	49.300	219.297	91,1	628,3	FMB	Aprueba
C-4-9	23,48	14,46	47.000	209.066	89,3	615,8	FMB	Aprueba
C-4-10	24,38	14,54	48.400	215.294	88,1	607,3	FMB	Aprueba
D-1-1	25,64	14,50	52.800	234.866	91,6	631,7	FMB	Aprueba
D-1-2	27,65	14,45	54.700	243.318	88,3	609,0	FMB	Aprueba
D-1-3	25,65	14,46	53.200	236.645	92,5	638,0	FMB	Aprueba
D-1-4	26,86	14,62	56.000	249.100	92,0	634,3	FMB	Aprueba
D-1-5	26,04	14,48	53.000	235.756	90,7	625,2	FMB	Aprueba
D-1-6	27,77	14,49	58.200	258.886	93,3	643,4	FMB	Aprueba
D-1-7	26,77	14,49	54.000	240.204	89,8	619,2	FMB	Aprueba
D-1-8	28,63	14,58	60.200	267.783	93,0	641,5	FMB	Aprueba
D-1-9	25,45	14,51	54.100	240.649	94,5	651,7	FMB	Aprueba
D-1-10	25,41	14,51	51.400	228.639	89,9	620,1	FMB	Aprueba
D-2-1	25,59	14,51	51.100	227.304	88,8	612,2	FMB	Aprueba
D-2-2	24,29	14,48	50.100	222.856	91,9	633,6	FMB	Aprueba
D-2-3	25,71	14,40	52.800	234.866	92,0	633,4	FMB	Aprueba



LAEV-EPN



Escuela Nacional de Ingeniería Mecánica

D-2-4	28,14	14,47	59.100	262.890	93,6	645,6	FMB	Aprueba
D-2-5	22,55	14,51	47.700	212.180	94,1	648,5	FMB	Aprueba
D-2-6	24,99	14,53	51.600	229.528	91,7	632,1	FMB	Aprueba
D-2-7	25,51	14,51	52.700	234.421	91,9	633,3	FMB	Aprueba
D-2-8	24,63	14,49	50.200	223.301	90,7	625,7	FMB	Aprueba
D-2-9	25,96	14,51	52.700	234.421	90,3	622,3	FMB	Aprueba
D-2-10	27,70	14,55	60.000	266.893	96,0	662,2	FMB	Aprueba
D-3-1	26,74	14,54	55.900	248.655	92,8	639,5	FMB	Aprueba
D-3-2	27,35	14,63	56.500	251.324	91,1	628,1	FMB	Aprueba
D-3-3	27,37	14,56	55.900	248.655	90,5	624,0	FMB	Aprueba
D-3-4	27,98	14,50	57.100	253.993	90,8	626,0	FMB	Aprueba
D-3-5	27,97	14,61	57.100	253.993	90,1	621,6	FMB	Aprueba
D-3-6	26,67	14,75	55.300	245.987	90,7	625,3	FMB	Aprueba
D-3-7	28,03	14,62	57.800	257.107	91,0	627,4	FMB	Aprueba
D-3-8	23,16	14,54	48.800	217.073	93,5	644,6	FMB	Aprueba
D-3-9	27,83	14,56	57.000	253.549	90,8	625,7	FMB	Aprueba
D-3-10	27,59	14,49	56.200	249.990	90,7	625,3	FMB	Aprueba
D-4-1	27,18	14,15	53.600	238.425	89,9	619,9	FJS	Aprueba
D-4-2	24,78	14,45	49.600	220.632	89,4	616,2	FJS	Aprueba
D-4-3	24,73	14,49	45.400	201.949	81,7	563,6	FJS	No Aprueba
D-4-4	25,77	14,39	53.400	237.535	92,9	640,5	FMB	Aprueba
D-4-5	25,00	14,46	51.300	228.194	91,6	631,2	FMB	Aprueba
D-4-6	26,89	14,48	55.500	246.876	92,0	634,0	FMB	Aprueba
D-4-7	24,64	14,32	48.000	213.515	87,8	605,1	FJS	Aprueba
D-4-8	24,20	14,43	49.100	218.408	90,7	625,4	FMB	Aprueba
D-4-9	25,83	14,39	53.500	237.980	92,9	640,3	FMB	Aprueba
D-4-10	22,81	14,46	46.100	205.063	90,2	621,7	FMB	Aprueba
E-1-1	22,54	14,42	45.500	202.394	90,3	622,7	FJS	Aprueba
E-1-2	26,69	14,51	55.000	244.652	91,6	631,7	FMB	Aprueba
E-1-3	26,96	14,37	55.200	245.542	91,9	633,8	FJS	Aprueba
E-1-4	25,22	14,42	54.000	240.204	95,8	660,5	FMB	Aprueba
E-1-5	28,57	14,48	59.300	263.779	92,5	637,6	FMB	Aprueba
E-1-6	27,95	14,48	56.500	251.324	90,1	621,0	FJS	Aprueba
E-1-7	25,67	14,56	50.300	223.745	86,8	598,6	FMB	Aprueba
E-1-8	28,48	14,50	58.000	257.997	90,6	624,8	FMB	Aprueba
E-1-9	26,33	14,64	53.800	239.314	90,0	620,8	FJS	Aprueba
E-1-10	25,99	14,69	54.000	240.204	91,3	629,1	FMB	Aprueba
E-2-1	27,91	14,40	56.600	251.769	90,9	626,4	FMB	Aprueba
E-2-2	24,06	14,59	49.100	218.408	90,2	622,2	FMB	Aprueba
E-2-3	25,64	14,46	52.300	232.642	91,0	627,5	FMB	Aprueba
E-2-4	24,07	14,34	50.100	222.856	93,6	645,7	FMB	Aprueba
E-2-5	28,02	14,28	57.200	254.438	92,2	635,9	FMB	Aprueba



LAEV-EPN

Página 5 de 10 FACULTAD DE INGENIERIA NACIONAL



E-2-6	25,50	14,52	50.500	224.635	88,0	606,7	FMB	Aprueba
E-2-7	26,38	14,35	54.000	240.204	92,0	634,5	FMB	Aprueba
E-2-8	25,60	14,36	53.000	235.756	93,0	641,3	FMB	Aprueba
E-2-9	27,09	14,28	51.700	229.973	86,2	594,5	FMB	Aprueba
E-2-10	25,36	14,26	52.700	234.421	94,0	648,2	FMB	Aprueba
E-3-1	26,64	14,40	52.200	232.197	87,8	605,3	FMB	Aprueba
E-3-2	26,83	14,86	51.200	227.749	82,9	571,2	FMB	Aprueba
E-3-3	28,98	14,46	58.400	259.776	89,9	619,9	FMB	Aprueba
E-3-4	28,09	14,45	57.800	257.107	91,9	633,4	FMB	Aprueba
E-3-5	25,73	14,47	50.700	225.525	87,9	605,7	FMB	Aprueba
E-3-6	26,99	14,42	54.900	244.207	91,0	627,5	FMB	Aprueba
E-3-7	25,98	14,36	52.000	231.307	89,9	620,0	FMB	Aprueba
E-3-8	27,46	14,49	54.300	241.538	88,0	607,0	FMB	Aprueba
E-3-9	26,41	14,33	52.800	234.866	90,0	620,6	FMB	Aprueba
E-3-10	28,08	14,35	55.600	247.321	89,0	613,8	FMB	Aprueba
E-4-1	24,92	14,36	49.700	221.077	89,6	617,8	FMB	Aprueba
E-4-2	25,17	14,54	56.000	249.100	98,7	680,7	FMB	Aprueba
E-4-3	25,02	14,38	50.800	225.970	91,1	628,1	FMB	Aprueba
E-4-4	24,03	14,42	47.200	209.956	87,9	605,9	FMB	Aprueba
E-4-5	27,96	14,43	56.500	251.324	90,3	622,9	FMB	Aprueba
E-4-6	24,15	14,38	47.900	213.070	89,0	613,5	FJS	Aprueba
E-4-7	21,57	14,40	44.600	198.391	92,6	638,7	FJS	Aprueba
E-4-8	26,65	14,42	52.900	235.311	88,8	612,3	FMB	Aprueba
E-4-9	24,09	15,59	48.400	215.294	83,1	573,3	FMB	Aprueba
E-4-10	25,78	14,53	47.600	211.735	82,0	565,3	FMB	No Aprueba

\* FMB = Falla en el material base.

FJS = Falla en la junta soldada.

### 3. ENSAYO DE DOBLADO LATERAL BAJO LA NORMA API 1104.

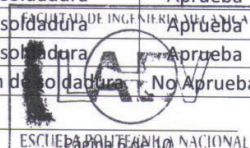
En la tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de doblado realizados en las muestras.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de doblado realizados en las probetas.

Id.	Observaciones	Calificación
A-1-1	Se observa una discontinuidad de 3,2 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-1-2	Se observa una discontinuidad de 1,6 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-1-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-1-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-1-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-1-6	Se observa una discontinuidad de 3,2 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba



LAEV-EPN



A-1-7	Se observa una discontinuidad de 2,5 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-1-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-2-1	Se observa una discontinuidad de 5,3 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-2-2	Se observa una discontinuidad de 2,4 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-2-3	Se observa una discontinuidad de 5,7 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-2-4	Se observa una discontinuidad de 3,4 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-2-5	Se observa una discontinuidad de 3,6 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-2-6	Se observa una discontinuidad de 3,0 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-2-7	Se observa una discontinuidad de 1,7 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-2-8	Se observa una discontinuidad de 1,0 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-3-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-2	Se observa una discontinuidad de 2,1 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
A-3-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-3-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-1	Se observa una discontinuidad de 13 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-4-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
A-4-7	Se observa una discontinuidad de 12,0 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
A-4-8	Se observa una discontinuidad de 1,8 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
B-1-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-1-7	Se observa una discontinuidad de 3,1 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
B-1-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-2-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba



LAEV-EPN



Página 7 de 10

B-3-1	Se observa una discontinuidad de 3,1 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
B-3-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-3-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
B-4-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-2	Se observa una discontinuidad de 6,4 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
C-1-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-1-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-2-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-3-1	Se observa una discontinuidad de 14,5 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
C-3-2	Se observa una discontinuidad de 3,8 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
C-3-3	Se observa una discontinuidad de 13,8 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
C-3-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-3-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-3-6	Se observa una discontinuidad de 2,4 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
C-3-7	Se observa una discontinuidad de 1,7 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
C-3-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba



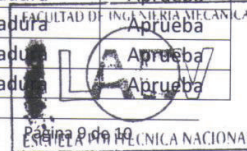
LAEV-EPN

 Página 8 de 10  
 ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

C-4-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-6	Se observa una discontinuidad de 3,4 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
C-4-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
C-4-8	Se observa una discontinuidad de 13,0 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
D-1-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-1-7	Se observa una discontinuidad de 2,3 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
D-1-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-1	Se observa una discontinuidad de 2,3 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
D-2-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-6	Se observa una discontinuidad de 3,9 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
D-2-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-2-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-3-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-4-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-4-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-4-3	Se observa una discontinuidad de 2,4 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
D-4-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-4-5	Se observa una discontinuidad de 1,3 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
D-4-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
D-4-7	Se observa una discontinuidad de 1,5 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
D-4-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-1-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-1-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-1-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba



LAEV-EPN



E-1-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-1-5	Se observa una discontinuidad de 4,0 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
E-1-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-1-7	Se observa una discontinuidad de 2,1mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
E-1-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-2	Se observa una discontinuidad de 3,1 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
E-2-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-4	Se observa una discontinuidad de 6,4 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
E-2-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-2-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-1	Se observa una discontinuidad de 0,7 mm en el cordón de soldadura.	Aprueba
E-3-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-6	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-3-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-1	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-2	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-3	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-4	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-5	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-6	Se observa una discontinuidad de 3,3 mm en el cordón de soldadura.	No Aprueba
E-4-7	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba
E-4-8	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura	Aprueba



  
 Ing. Salvatore Reina M.Sc.  
**JEFE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES**

