

# Desarrollo de un prototipo de equipo de corte semiautomático para alambres de alta y baja resistencia mecánica

A semiautomatic prototype cutting equipment developed for high and low mechanical resistant wires

Julio Uza<sup>1</sup>, Luis Cáceres<sup>2</sup>, Alden Sifuentes<sup>3</sup>, Óscar Granda<sup>4</sup>, Juan Zúñiga<sup>5</sup>, Gonzalo Tuesta<sup>6</sup>

RECIBIDO: 17/02/2015 - APROBADO: 06/03/2015

## RESUMEN

La mayoría de los equipos que existen en nuestro medio y se comercializan a nivel mundial están desarrollados para enderezar y cortar varillas de acero corrugadas, muy usadas en la industria de la construcción. Los tamaños y características de los equipos varían desde los más pequeños, con velocidad de corte de 20 m/minuto, hasta los más grandes y complejos, que pueden desarrollar velocidades de 0-210 m/minuto, cuya longitud final del producto varía de 9 a 12 m. Ciertamente la calidad de corte, precisión de ovalidad y longitud que cumpla con la norma americana de soldadura AWS (American Welding Society) difiere mucho de las exigencias para la fabricación de electrodos. En el proyecto desarrollado se logra mejorar el sistema de enderezado usando doble rodillos de alineación, colocados de forma horizontal y vertical. Esto facilita el alineamiento del alambre sobre superficies lisas.

**Palabras clave:** Equipo de corte, semiautomático, cable, enderezamiento.

## ABSTRACT

Most equipment types developed for corrugated steel rod straightening and cutting are used domestically. They are also marketed worldwide and widely used by the construction industry. Size and characteristics of these equipment vary from low 20 m/min. cutting speed to the highest and most complex developing velocities of 0-210 m/min. Product length vary from 9 to 12 m. Cut quality, ovality and length precision do not comply with the American Welding Standard (American Welding Society) "AWS" for electrode manufacturing. In this project we improve the straightening system by using double alignment rollers laid horizontally and vertically. This devise facilitates alignment of the wire on smooth surfaces.

**Keywords:** Cutting equipment, semi automatic, wire, straightening.

1-5 Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Lima, Perú.  
2-6 Nexsol SRL, Los Brillantes 343, La Victoria, Lima, Perú. E-mail: [aldemifu@yahoo.es](mailto:aldemifu@yahoo.es)

## I. INTRODUCCIÓN (Lange, 1981), (Hasford, 1993)

Nexsol SRL. es una empresa que, con el apoyo económico del Fincyt, y con la colaboración de la Universidad Nacional de Ingeniería, a través de su Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalurgia, ha desarrollado un prototipo de equipo de corte semiautomático para alambres de alta y baja resistencia mecánica, como acero de bajo y medio carbono, acero inoxidable y materiales no ferrosos como aluminio, cobre y níquel, para ser usados en la fabricación de electrodos de soldadura por arco eléctrico para la industria fabril del Perú.

Las normas AWS, tales como: SFA5.1, SFA5.5, SFA5.4, SFA5.10, SFA5.11 y SFA5.14, definen las características del alambre a emplear en la producción de electrodos: la superficie del alambre debe ser lisa, exento de lubricante, con una ovalidad del alambre para diámetros de alambre 1.6 a 6.4 mm  $<0.25$  mm y la longitud del corte de 200 a 450 mm y una precisión  $<0.5$  mm.

Ante este problema, planteamos desarrollar un equipo de corte que desarrolle velocidades de 50 a 150 m/minuto y corte alambres de longitudes de 300 a 450 mm, con un sistema de arrastre que permita efectuar el enderezado en forma simultánea. El sistema de enderezado estará compuesto por rodamientos colocados de forma vertical y horizontal, con un sistema de acopio donde se recogerán los alambres cortados.

El uso de los sistemas lógicos PLC en nuestro desarrollo cobra una vital importancia debido a que los motores eléctricos irán conectados con variadores de velocidad de frecuencia. El uso de un PLC (programador lógico) nos permitirá saber el número de cortes y variar las diferentes longitudes del alambre; esto incluye a su vez alertas de fallas que los diferentes sensores instalados enviarán (niveles de corriente) para certificar una producción de acuerdo a los parámetros requeridos en el alambre a ser cortado. Además también permitirá detectar las fallas en los motores cuando alguno no esté funcionando y otras señales de alerta para una buena producción y seguridad del operario.

En el Perú la industria de soldadura emplea diferentes variedades de electrodos, cuyas características van de alambres de acero de bajo y medio carbono, acero inoxidable y materiales no ferrosos, como aluminio, cobre y níquel. La principal característica física del alambre para fabricación de electrodos es que tiene que ser derecho y liso; esta característica de presentación es igual para todos los diámetros, que varían de 1.6 a 6.3 mm, con longitudes de 200 a 450 mm, y 1000 mm.

Nexsol desarrolló un prototipo de equipo de enderezado-corte para cualquier tipo de alambres. Este prototipo tiene las siguientes características: enderezar y cortar cualquier tipo de alambres mencionados y que la superficie del producto final sea lisa, que corte cualquier longitud hasta 1000 mm, con facilidad para regular manualmente la velocidad de corte, además de tener una función automática controlada a través de un PLC Siemens, visualizada en una pantalla HMI, que corte alambres delgados de

diámetros de 2.5 a 5.0 mm, precisión de corte  $<0.5$  mm, ovalidad de alambre  $<0.25$  mm y una eficiencia de 98% (baja pérdida en desperdicio).

Esto es debido a que localmente no existen fabricantes de equipos de corte y enderezado de alambre. La mayoría de máquinas están proyectadas para la fabricación de clavos, resortes para colchones o alambres para amarres en construcción.

Nexsol, con su equipo de profesionales calificados, analizó la tecnología hindú, china e italiana, que nos permitió adecuarla para la fabricación de electrodos.

El apoyo de la Universidad Nacional de Ingeniería fue de vital importancia para el estudio y modelamiento matemático en el empleo de software, test de pruebas y análisis finito de esfuerzos. Asimismo se consultaron varias patentes de invención, como la N° 2291225, N° 5375485 y N° 6272740, donde conservan el mismo principio de enderezado y corte de alambre, la diferencia entre cada patente, los mecanismos de enderezado y corte que emplean. En una de ellas se emplea un sistema de piñones y engranajes para asegurar la fuerza de arrastre del alambre y variar el mecanismo de corte, este proceso puede realizarse de forma transversal u horizontal, el sistema de corte frontal o por doble cuchilla orientado para barras de acero con alambres de  $\frac{1}{4}$  pulgada de diámetro a más.

El producto final es empleado en el proceso de fabricación de electrodos. De 1 kg de soldadura, el 70% representa el alambre cortado llamado núcleo de acero, incrementa la eficiencia del equipo y permite reducir las mermas. Con esto facilita su uso en la producción de diversos tipos de alambres cortados, de tipo ferrosos y no ferrosos, que pueden ser usados en el proceso productivo de electrodos. Por la versatilidad, Nexsol podría incursionar en otros mercados diferentes al de la soldadura.

Las características del producto obtenido en la cortadora de alambre cumplen con los estándares internacionales de soldadura. Este equipo nos permite obtener alambres cortados para ser empleados como insumo primordial para la fabricación de electrodos del tipo convencional de la clase E-6011, E7018, E308/E316L.

### I.1 Conformado por deformación plástica (Ilafa, 2010), (Ala, 2011), (Lange, 1976)

Resulta difícil encontrar ecuaciones adecuadas que permitan definir claramente nuestro requerimiento y para efectos del proyecto usaremos para conformado en frío:  $T < 0.35 T_f$  (K) (por debajo de la temperatura de recristalización del material).

### I.2 Enderezado por flexiones rotativas

Una de las principales dificultades del prototipo a desarrollar es el proceso de enderezado para conseguir que el material obtenga la forma recta deseada para su posterior utilización.

Los modernos equipos de enderezado están basados en la aplicación de una serie de momentos alternativos, es

decir, someter al material a una serie de giros alternativos de amplitud decreciente desde la entrada hasta la salida del alambre, utilizando los rodillos giratorios colocados en uno o dos planos. La construcción de este tipo de máquinas es simple, alcanzando una alta precisión en el acabado del producto. Figura N° 1.

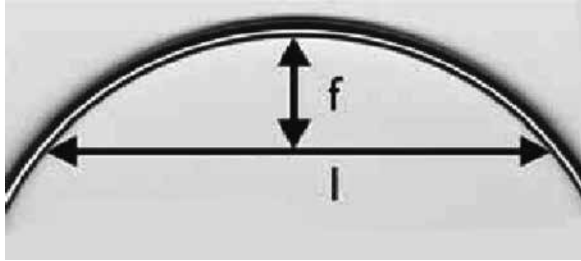


Figura N° 1. Parámetros principales

Los parámetros principales que rigen el proceso son los siguientes:

- Curvatura de partida con la que ha sido enrollado el alambre.
- Secuencia de curvaturas alternativas producidas por la máquina enderezadora.
- Comportamiento elastoplástico del material.

Esto depende del radio de curvatura, la altura de la sección transversal de material (para alambre redondo el diámetro del alambre  $d$ ). Podemos emplear el punto de fluencia  $R_p$  y el módulo de elasticidad  $E$ . Ecuación 1 y (2.0) se pueden utilizar para calcular el diámetro mínimo y máximo del rodillo guía ( $D_{min}$ ,  $D_{max}$ ).

$$D_{min} = 2 \left[ \frac{d \cdot E \cdot r}{d \cdot E + 2 \cdot R_p \cdot r} \right] \quad (1.0)$$

$$D_{max} = 2 \left[ \frac{d \cdot E \cdot r}{d \cdot E - 2 \cdot R_p \cdot r} \right] \quad (2.0)$$

El requisito mínimo para el diseño y la integración de un enderezamiento y la integración de un proceso de enderezamiento es determinar la curvatura y el radio de curvatura en relación con una dimensión. Dada la deflexión de los materiales siempre la longitud  $l$  como se muestra en la Figura N° 1, la ecuación (3.0) muestra también que la curvatura  $k$  es el valor recíproco de radio de curvatura  $r$ .

$$r = \frac{1}{k} = \frac{f^2 + \frac{l^2}{4}}{2 \cdot f} \quad (3.0)$$

$k(x)$  en un elemento que permite el cálculo de la característica de la curva para ser enderezado. Pudiendo utilizarse para calcular las posiciones de los rodillos  $a_{Ri} = y(x)$  por integración numérica de la ecuación de segundo orden diferencial, que se aplica a la deformación causada por la flexión.

$$k(x) = \frac{y''(x)}{\sqrt{(1 + y'(x)^2)^3}} \quad (4.0)$$

Para crear una simulación del proceso, se requiere el conocimiento de las características del material de proceso y las características geométricas de la unidad de enderezamiento en particular.

La diferencia entre la curvatura máxima y la curvatura  $K_{max}$  mínimo  $K_{min}$  resultados en el rango de curvatura  $\Delta K$  de la ecuación 5.

$$\Delta k = |k_{max} - k_{min}| = \left| \frac{1}{r_{min}} - \frac{1}{r_{max}} \right| \quad (5.0)$$

Normalmente se suponía que las tensiones residuales generadas en el proceso de enderezado eran pequeñas y no era necesario tenerlas en cuenta. No obstante, durante el enrollado y enderezado del alambre se generan tensiones suficientes como para provocar la plastificación del material, especialmente en las zonas cercanas a la superficie (Laue, 1981), (Paech, 1999).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Proceso de simulación del sistema de arrastre

En muchos casos los procesos de deformación del alambre todavía existen para la optimización con respecto a la calidad del producto terminado. Enderezar en unidades de enderezado de rodillos puede ser considerado como una alternativa para este grupo de procesos.

Los esfuerzos para obtener material de proceso con un grado aceptable de la rectitud se han centrado hasta ahora en un método de ensayo y error. Con respecto a los métodos modernos de fabricación con una necesidad de un producto final de calidad constante y alta, este enfoque tradicional puede resultar insostenible. Por otra parte, se requiere mucho trabajo, tiempo y material de proceso Figura N° 2.

Un conocimiento del comportamiento elastoplástico del material bajo alterna cargas, una representación adecuada de este comportamiento y una descripción de la relación entre el movimiento de flexión y curvatura son elementos importantes en los que el modelo se basa.

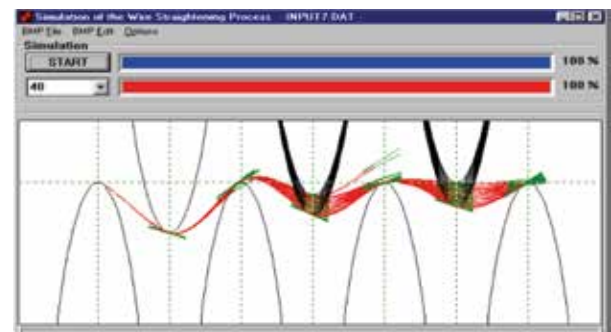


Figura N° 2. Compartimiento del material.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

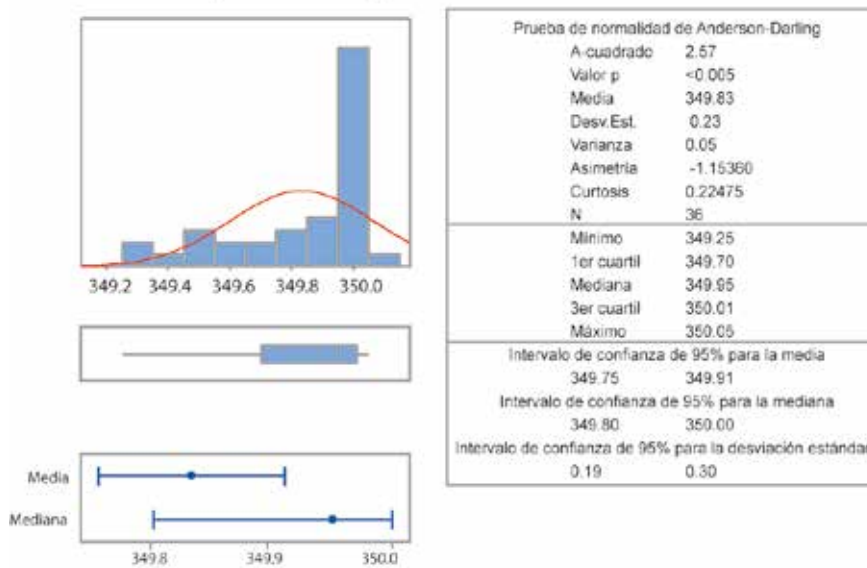
Durante los test de prueba se pudo obtener los siguientes resultados Tabla N° 1 y Figura N° 3:

3.1 Estadísticos descriptivos: DESV-OVA, PROM DI / DI

Variable	N	N*	Error de estándar		Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
			Media	la media					
desv-Ova	30	0	0.02617	0.00522	0.02859	0.000	0.00700	0.01450	0.037
prom di / d1	30	0	3.2051	0.00578	0.0316	3.179	3.1864	3.1945	3.21
Length	30	0	349.83	0.0384	0.231	349.25	349.70	349.95	350.01

Una de las variables críticas en la producción de alambres para electrodos es la longitud, seguidamente presentamos en las Tablas N° 1 y 2.

Tabla N° 1. Análisis de la distribución de longitudes  
Test report wire length (mm)



Gráfica Xbarra-R de Length (mm)

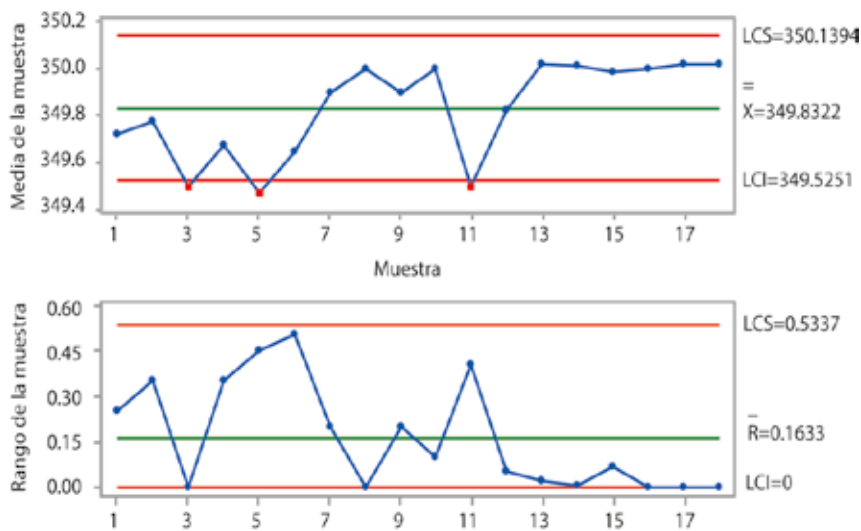


Figura N° 3. Gráfica de control de la fabricación

De acuerdo con los resultados vs. la norma AWS SFA 5.1-2012 vigente, la longitud del alambre usado para la fabricación de electrodos no debe exceder 10 mm de tolerancia ( $350 \pm 10$  mm). De acuerdo a los resultados obtenidos con el prototipo, esta media se encuentra en 349.8

mm y los valores se ubican entre 349.52 mm y 350.05 mm. Podemos concluir que estos resultados cumplen satisfactoriamente con una capacidad del proceso productivo, en 1.96 una desviación estándar ajustada de 0.17 mm. Ver Tabla N° 3.

Tabla N° 2. Capacidad del proceso de corte de alambre

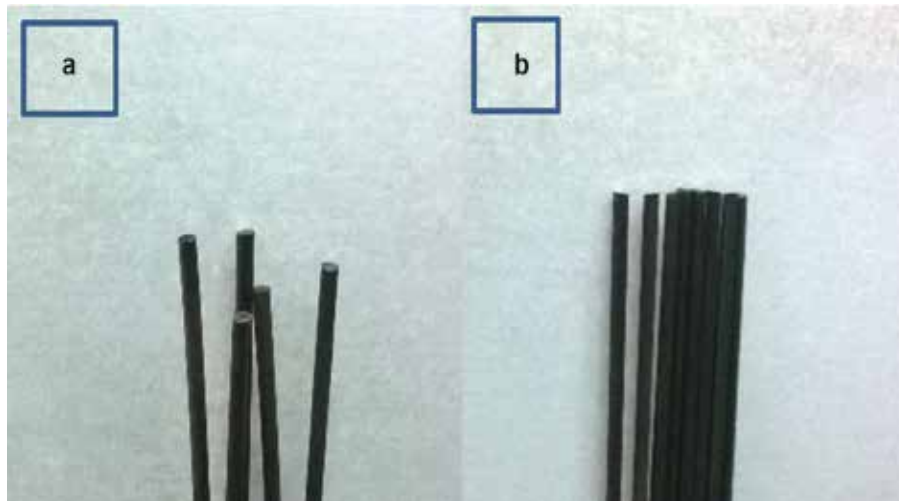
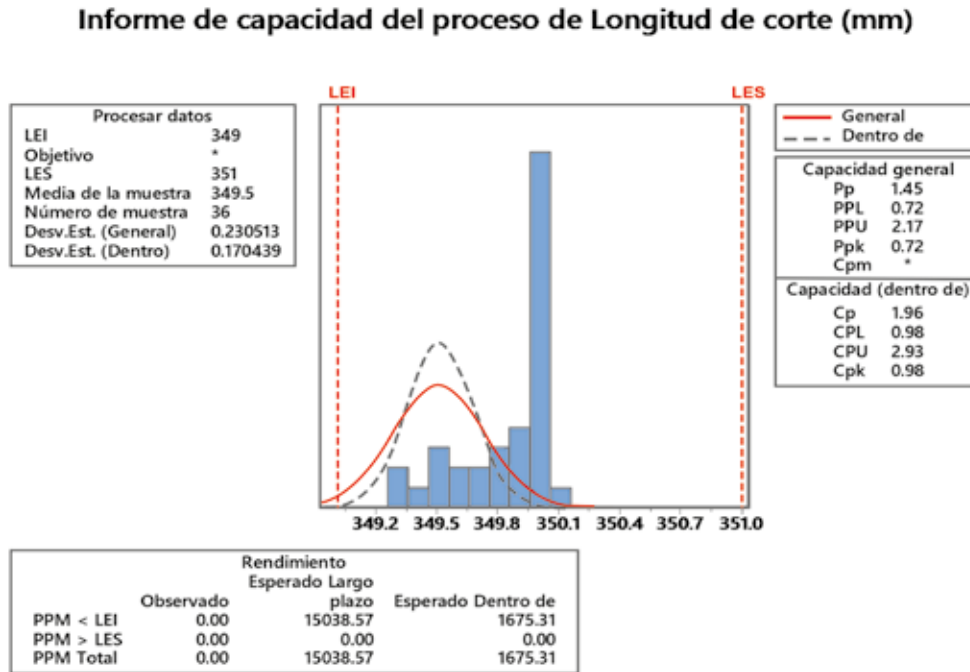


Figura N° 4. a: alambre corto y largo > tolerancia, b: alambre dentro de la tolerancia < 0.5 mm

La ovalidad del alambre en la norma establece una tolerancia máxima de 0.05 mm. Los resultados finales obtenidos de 0.026 mm, usando un análisis por Minitab, determinó un intervalo de confianza del 95%, con valores de 0.008 mm a 0.0368 mm de ovalidad, muy por debajo de lo exigido en la norma. La Tabla N° 4 y Figura N° 4 y 5 corroboran este resultado.

Tabla Nº 3. Test report wire ovality

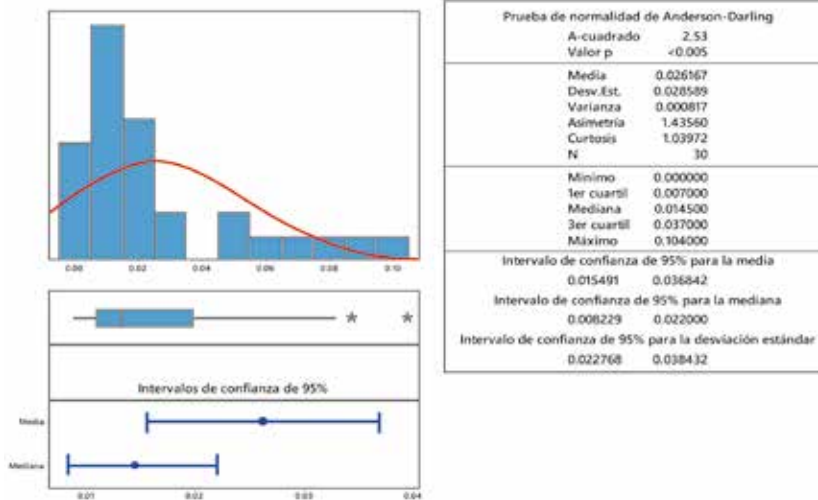


Tabla Nº 4. Gráfica marginal de desv-Ova vs. prom di-d1

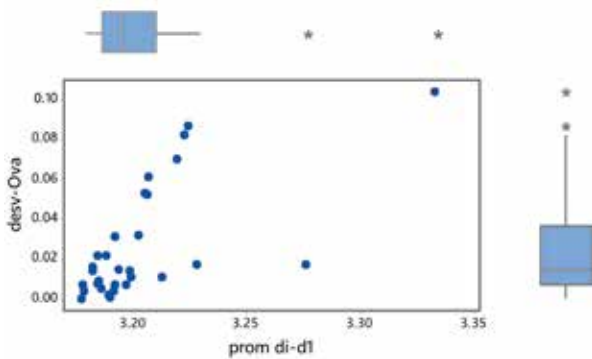


Figura Nº 5: Equipo prototipo de corte y enderezado de alambres

**IV. CONCLUSIONES**

- El sistema de rodillos horizontales y transversales permite el enderezado de los alambres indistintamente de la característica del material.
- Se reducen los calentamientos del alambre por efecto de la fricción de los modelos clásicos.
- El uso de los sistemas lógicos modular PLC es el núcleo de línea de productos para tareas de automatización de alta precisión, los cuales nos han permitido mejorar los rendimientos, mejorando los arranques; optimiza la motorización y ofrece la máxima seguridad al usuario.
- El uso de los sistemas lógicos modulares otorga una máxima flexibilidad en la configuración de máquinas individuales.

**4. I. Impactos del proyecto**

**a) Impactos internos**

Permitió desarrollar tecnología propia y desarrollar nuestro propio know how, sin necesidad de contar con personal extranjero adicional, y optimizar el consumo de energía.

**b) Impactos externos**

La posibilidad de fabricar localmente este tipo de equipos nos permitiría reducir los costos de operación, además de los costos del producto final, por su alta capacidad de producción a menor consumo de energía.

**V. AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos el apoyo brindado por la Universidad Nacional de Ingeniería a la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica y FONDO FINCYT- FIDECOM para el desarrollo del presente proyecto e investigación.

**VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. La Siderurgia en Cifras 2010, Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero – ILAFA, Las Condes - Santiago de Chile (2010)
2. La Siderurgia en Cifras 2010, Asociación Latinoamericana del Acero, Santiago de Chile (2011).
3. Lange, Kurt. Handbook of metal forming.. McGraw-Hill. United States of de America (1976)
4. Paech, M. Innovative Straightening Technology for the Positioning of Straightening Rollers. Eurowire, (1999) 8, pp. E64-E68.
5. Laue, K y H. Stenger, Extrusion – Processes, Machinery Tooling, ASM International 1981
6. Lange K. (8ed), Handbook, 2 vol, The wire Association International Inc. 1977 and 1981.
7. Hasford, W.F. y R.M. Caddell, Metal Forming: Mechanics and Metallurgy (2da Ed) Prentice Hall, 1993.