"Evaluación y Mejoramiento de un Sistema de Producción de Alambre de Cobre por Trefilación"

Wilson Alberto León Quilli [1], Ignacio Vicente Wiesner Falconí [2]
[1] Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral
trucodelleon@yahoo.com

[2] Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971; Postgrado en México, UNAM – Politécnico de México; Investigador Visitante del CENIM – España y el IPT – Brasil; Profesor de la FIMCP – ESPOL desde 1975, Campus Politécnico Prosperina Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, intramet@hotmail.com

Resumen

En el presente trabajo profesional se resuelve un problema de una industria dedicada a la trefilación de alambre de cobre para la fabricación de alambres y cobre usados como conductores de energía eléctrica.

En primer lugar, se describe por medio de documentos fotográficos el tipo de fallas superficiales que constituyen una no conformidad del producto, luego se tomaron datos de planta de los parámetros relacionados con el sistema de producción existente, que tienen que ver con: materia prima, agua de enfriamiento, aceites lubricantes y emulsiones, para convertirlos en un diagrama de los componentes del sistema que fueron modificados y se elimino la no conformidad con un producto aceptable.

La causa principal para inducir las fallas en el producto estaban relacionadas con las deficiencias del uso del aceite lubricante, sin poder realizar o efectuar prueba alguna en la máquina, se utilizó una laminadora de laboratorio para simular el proceso de trefilación, ensayando cambios en los parámetros para poder encontrar la causa que promovía las manchas, posteriormente se ensayaron tipos de lavado luego de la laminación y se tuvieron probetas planas de aspecto impecable.

Por último se recomendó un nuevo esquema de producción basados en la utilización de una caja de lavado, ubicada entre la trefiladora y el horno de recocido.

Palabras Claves: *Trefilación, materia prima, parámetros, emulsiones, laminadora, simular, manchas, probetas, aspecto, recocido.*

Abstract

In the present professional work to solve a problem of an industry dedicated to the stranding of copper wire for the manufacture of copper wire and used as conductors of electricity.

First, is described by means of photographic documents the type of surface faults that constitute a non-conformity of the product, then data were taken from plant parameters related to the existing production system, which are related to raw material, cooling water, lubricating oils and emulsions, to turn them into a diagram of the system components that were modified and eliminated the non-compliance with an acceptable product.

The main cause to induce product failure were related to insufficient use of lubricant oil, unable to make or carry out any evidence in the machine, we used a rolling laboratory to simulate the wire drawing process, changes in the parameters tested to find the cause that promoted stains, then rinse types were tested after rolling and flat specimens were clean appearance.

Finally, we recommended a new production scheme based on the use of a washing box, located between the wire drawing and annealing furnace.

Keywords: *Stranding, raw materials, parameters, emulsions, laminator, simulate, spots, cylinders, appearance,* annealing.

Introducción

Desde hace muchos años y hasta hoy los cables de cobre son utilizados para un sin número de aplicaciones necesarias en la vida diaria. Desde los cables submarinos que unen continentes hasta los cables más finos que mantienen al mundo comunicado, como los teléfonos fijos, tienen aplicaciones gigantescas y los hay en todo tipo de dimensiones, es por ello la importancia del conocimiento de los procesos de manufactura que están involucrados en la elaboración del alambre de cobre, es mas, el país es exportador de este producto y por ende la calidad del mismo es de vital importancia para tener sustentabilidad en el mercado externo.

En los procesos de trefilación intervienen muchas variables tales como la materia prima, el sistema de enfriamiento, emulsiones de lubricación, velocidad de trefilación, recocido, vapor y agua de proceso, lo que hace complejo su estudio siendo necesario recurrir al uso de técnicas de laboratorio para simular las condiciones de trabajo que se tienen en fabrica; ya que la línea de producción de la empresa no está disponible para realizar pruebas, cuya producción es continua, la simulación mediante laminación fue de gran ayuda para reproducir la no conformidad del producto, manteniendo las mismas condiciones de entrada y salida del sistema de planta se paso al simulado y se encontró los parámetros desviados que provocaban las irregularidades. Utilizando éste mismo método experimental se varió los parámetros para encontrar las condiciones óptimas de trabajo en las que se obtuvo un producto final de buena calidad libre de manchas a tempori.

Se planteo un objetivo general de mejoramiento de la calidad del alambre y para cumplir el mismo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Definición de los parámetros del sistema de trefilación.
- Establecimiento de condiciones de laboratorio para simular por laminación el proceso de trefilación.
- Encontrar los parámetros de trabajo con condiciones que reprodujeran los defectos y luego encontrar las condiciones que la eliminarán.
- Definir las condiciones que deben implantarse en el sistema de producción usado en fábrica, en la máquina principal y en componentes auxiliares.
- Calcular los costos que surgen con los cambios propuestos.

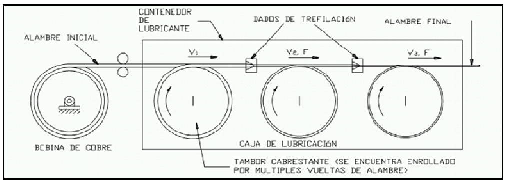
EVALUACION ACTUAL DEL PROBLEMA.

Materia prima

La materia prima que adquiere la empresa es alambrón de cobre de ocho milímetros de diámetro, la misma que es obtenida a partir de un proceso de colada continua que están conformados por dos hornos, uno de fundición y otro de mantenimiento.

Trefilación del alambrón

La trefilación es un proceso de deformación volumétrica comúnmente utilizada para el acero, cobre, aluminio y aleaciones dúctiles en donde la sección transversal de un alambre o barra se reduce al tirar a través de uno o varios dados y puesto que se mantiene el volumen se produce un alargamiento en el material trefilado

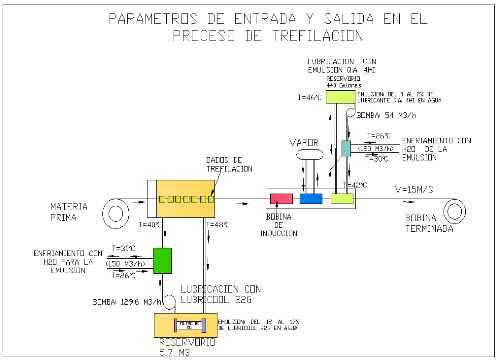


ESQUEMA DE LA TREFILACIÓN DE ALAMBRES

En el proceso de trefilación, el material de trabajo se jala a través del dado siendo obvia la presencia de esfuerzos de tensión, valor máximo que está limitado por la fractura del hilo, pero al mismo tiempo existe una compresión indirecta ya que el metal se comprime a medida que pasa por la abertura del dado

Parámetros de entrada y salida del sistema de producción

Para proceder a evaluar el proceso de trefilación, fue necesario conocer los parámetros de entrada y salida del sistema, para ello se tomaron los diferentes datos de planta involucrados en el proceso de trefilación del alambrón de cobre.

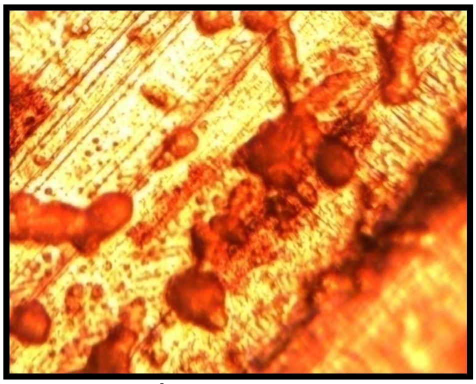


PARÁMETROS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

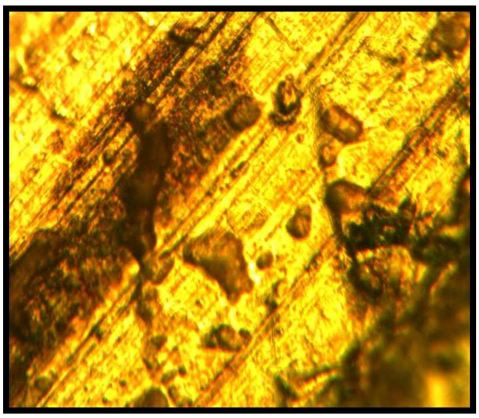
Calidad superficial del producto trefilado

En la producción de la empresa donde se desarrollo el presente trabajo se presentaron históricamente manchas en el producto y son las que se presentan a continuación y que tienen un aspecto de gotas de color tornasol.

Se solicito a la empresa fotografías de aspectos superficiales de los alambres procesados y muestras del producto terminado de la línea de producción en la máquina MM85 para realizar los análisis en el laboratorio.



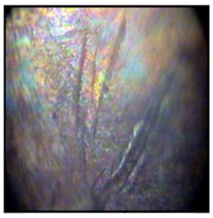
MICROGRAFÍA CORRESPONDIENTE A LA FUSTA 1.1



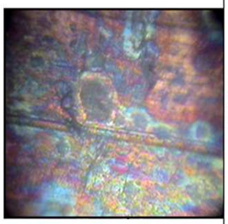
MICROGRAFÍA CORRESPONDIENTE A LA FUSTA 1.2

La característica más destacable es que tienen un aspecto tornasol con varios colores y predominan el verde y el azul, que no son de fácil remoción y se presentan inmediatamente después del paso de la línea o varias horas o varios días después.

A fin de tener documentación propia se procedió a recoger muestras en planta, las mismas que se presentan a continuación e identifican plenamente manchas en todas las fustas con su respectiva micrografía.

Muestra del proceso	Micrografía superficial	Detalle
Bobina Dulce fusta Ø 1.23 		Muestra de alambre recocido sacado de la trefiladora MM85.

ALAMBRE Y MICROGRAFÍA DE MUESTRA RECOCIDA

Agrio Ø 1.23 Fusta 		Muestra de alambre sin recocido correspondiente a la trefiladora MM85

ALAMBRE Y MICROGRAFÍA DE MUESTRA AGRIA

Evaluación de la calidad de la materia prima y materiales

Para la evaluación de la calidad de la materia prima se procedió con el análisis y evaluaciones del proceso de trefilado, enlistados a continuación:

- Análisis químicos y metalográficos de la materia prima.
- Análisis de la calidad del agua
- Análisis de la calidad de la emulsión y del aceite de la emulsión

Análisis químicos

En primer lugar se hicieron análisis químicos del alambrón tomando muestras de algunas coladas en espera de entrar a trefilación y los datos que se presentan son promédiales del contenido del alambrón de cobre por Rayos X:

TABLA 1.
Análisis Químico Vía Rayos X

Muestra	Pb%	Sn%	P%	Mn%	Ni%	Mg%	Cr%
1	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0003	<0.0005	<0.0003

Muestra	As%	Ag%	Co%	S%	Be%	Au%	B%
1	<0.0004	<0.001	<0.0015	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0005

Muestra	Zn%	Fe%	Si%	Sb%	Cd%	Bi%	Al%
1	<0.045	<0.0034	<0.029	<0.0019	<0.0003	<0.0042	<0.010

Muestra	C%	Ti%
1	<0.043	<0.0004

Calidad de agua

Conductividad eléctrica y sólidos totales del agua.- La conductividad de una sustancia se define como "*la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido*" (6). Siemens por metro [S/m] corresponden a las unidades en el sistema de medición internacional, SI y micromhos por centímetro [mmho/cm] en unidades estándar de EE.UU. La **conductividad eléctrica** (CE) es uno de los parámetros usados para medir la cantidad de iones presentes en el agua. La corriente eléctrica se transporta por medio de iones en una solución, así la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones.

TABLA 2.
ANÁLISIS # 2 DE AGUAS DE RESERVORIO Y OSMOSIS

Parámetro	Unidad	Muestra #1	Muestra #2	Valores para agua potable	Valores agua de ablandador	Valores para Osmosis inversa
Conductividad	μS	40	1450	50 - 500	5 - 100	0 - 5
Dureza total (CaCO3)	mg/l	12	300	150 – 300	0 - 5	0
Cloruros (Cl^-)	mg/l	3	400	1,5 Max.	0	0
STD (sólidos totales disueltos)	mg/l	15	850	500 Max.	10-200	0-10

Análisis de la calidad de la emulsión y del aceite de la emulsión

No existen laboratorios en el medio que estén analizando esporádicamente todos los parámetros que tienen relación con la calidad de las emulsiones usados en procesos metalúrgicos, los resultados que presentamos a continuación han sido hechos en la ESPOL aunque no representan el universo de controles que se hacen a menudo en laboratorios de fabricas que trabajan revisando las propiedades importantes de los aceites de emulsiones

TABLA 3.
RESIDUO DE COBRE EN MUESTRAS DE EMULSIÓN

Muestras	pH (Unidad de pH)	Cobre (%)
E1	7.82	0.017
E2	7.79	0.040
E3	7.89	0.0002
E4	7.62	0.037
E5	8.30	0.19
E6	8.43	0.017

Debilidades del sistema de producción.

A partir de los hallazgos encontrados en las secciones anteriores, se tiene debilidades en el sistema en los siguientes aspectos:

- Agua de proceso en malas condiciones
- Emulsiones sin control de concentraciones
- Temperatura de la emulsión de Lubricool fuera de rango
- Temperatura de la emulsión de Q.A. fuera de rango

Agua de proceso en malas condiciones.- De los análisis de agua se tuvo que el valor del pH que sale de osmosis inversa es ácida con 5.33, al emplearse esta agua en la emulsión sin duda trae problemas de corrosión en el alambrón de cobre, sí la emulsión no es retirada posteriormente. El pH del agua de pozo con 9.31 que sirve de suministro para la planta ablandadora y de osmosis inversa, se afectada por la presencia de aguas alcalinas.

Para las muestras de agua del reservorio y del pozo, todos los valores de los parámetros analizados se encuentran fuera de rango. Los cloruros sin duda, con valores de 400 ppm indican claramente que no existe un control al momento de dosificar el hipoclorito de sodio.

La conductividad eléctrica del agua es una forma de evaluar el contenido de sales y el grado de incremento en la emulsión, dado a que existe una leve pérdida de agua por evaporación, la conductividad eléctrica se incrementa.

Emulsiones sin control de concentraciones.- La empresa cuenta con un refractómetro para medir la concentración en las emulsiones, pero ésta práctica no se la está llevando bajo frecuencias preestablecidas, por lo que no se tiene la seguridad que las emulsiones operen en las condiciones de concentración recomendadas.

Temperatura de la emulsión de Lubricool fuera de rango.- La temperatura en la emulsión de Lubricool 22G. se encuentran fuera del rango recomendado entre 35 y 45ºC al estar por el orden de los 48ºC. El sistema de enfriamiento presentó buenos resultados con temperaturas de enfriamiento 1ºC menor al medio ambiente, pero el intercambiador de calor no alcanza a mantener la temperatura de la emulsión dentro de los rangos recomendados.
La elevada temperatura desencadena un progresivo aumento de los sólidos totales disueltos (STD) lo que implica un aumento de la carga electrolítica. Cuando la temperatura de la emulsión y la carga electrolítica es elevada, el aceite se separa de la emulsión y flota.

MODIFICACION DEL SISTEMA PARA MEJORAMIENTO DEL PRODUCTO
En esta parte se desarrollarán ensayos de laminación en el alambrón de cobre con el fin de simular el proceso de trefilación y reproducir el producto no conforme, utilizando los mismos parámetros de operación empleados en la fabricación del producto debido a que no se puede realizar pruebas en la máquina de trefilación de la empresa por su proceso continuo de producción, además se realizarán ensayos cambiando los parámetros para ver cómo afectan el aspecto superficial, que es uno de los objetivos principales de estudio de ésta tesis. Con el resultado de los ensayos se procede entonces a la evaluación pertinente, analizando las distintas situaciones.

Simulación del proceso de trefilación por laminación del alambrón
La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible (5). La mayoría de problemas prácticos de ingeniería se resuelven usando las ecuaciones y procedimientos analíticos pero existe un gran número de problemas cuya solución depende de una combinación de análisis y datos que se obtienen experimentalmente de sistemas sencillos que se puedan usar para describir el comportamiento de otros sistemas semejantes y complejos.

Ensayos de laminación para reproducir defecto superficial cambiando los parámetros.
Las condiciones para realizar los ensayos de laminación que permitieron reproducir el defecto superficial del cobre trefilado están basados en las "condiciones de los parámetros" analizadas previamente, con las que se espera constatar el comportamiento de los materiales a condiciones similares a los de la planta de trefilación, al realizar operaciones de laminación con porcentajes de reducción equivalentes, uso de la emulsión aceite-agua de planta en diferentes condiciones de temperatura, laminaciones recocidas y agrias, y distintas probetas de cobre.

TABLA 4.
Prueba de ensayos de laminación para reproducir falla

Prueba #	Material de ensayo	Lubricante	Temperatura de la emulsión	Temperatura de recocido
1.1	Alambrón de cobre de la planta	Emulsión de planta	27 ºC	200 ºC
1.2	Platina comercial de cobre	Emulsión de planta	27 ºC	200 ºC

Prueba 1.1. Lamina de cobre de la planta

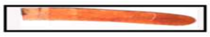
Prueba 1.2. Lamina de cobre comercial

Ensayo con variación de las condiciones de enfriamiento de la emulsión, emulsión nueva al 10%, y lavado previo (con agua, detergente y agua caliente)

La recomendación de los fabricantes de aceite para emulsiones es emplear agua con bajo contenidos de sales, cuya concentración de aceite varía de acuerdo al tipo de trefilado, del 10 al 12% cuando se reduce el alambrón hasta 1.8mm y del 6 al 8% para diámetros finales de 0.2 a 0.8 mm.

Una capa muy fina de lubricante ocasiona contacto metálico por adherencia con posterior desgarro por cizalladura.

TABLA 5.
Prueba 6 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión, lavado previo y emulsión nueva al 10%

Prueba #	*T.E. (°C)	Tipo de lavado	Resultados.
6.1	30	Agua	
6.2	35	Detergente	
6.3	40	Agua caliente	
6.4	45	Agua caliente	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

Ensayo variando las condiciones de enfriamiento de la emulsión, lavado previo con vapor y emulsión nueva al 12%

Como último método de limpieza en las probetas laminadas se procedió a realizar pruebas de laminación a temperatura ambiente en la emulsión (27ºC), 8 pases de reducción al 29% e igual velocidad de laminación, variando el número de pases de vapor sobre la superficie laminada como implementación de limpieza superficial.

La condición del vapor a utilizarse, es vapor saturado, aplicado directamente sobre la placa laminada que con ayuda de una pistola se simulará el roseado mediante aplicación manual a una velocidad constante.

TABLA 6.
Prueba 9 de ensayos de laminación con emulsión nueva al 12%, temperatura de emulsión a 27 ºC y lavados con vapor variables

Prueba #	# pases de vapor	Tipo de lavado	Resultados.
9.1	2	Vapor	
9.2	4	Vapor	
9.3	6	Vapor	
9.4	8	Vapor	

Cambios para mejoramiento

A partir de los resultados obtenidos en la prueba 9, se requiere cinco aspectos a mejorarse en el sistema:

Controlar los parámetros de la emulsión de Lubricool para mantener la calidad. Esto se logra al emplear aguas blandas previamente tratadas y con parámetros antes estudiados, dentro de rango. La concentración de la emulsión debe mantenerse en 12% de Lubricool de manera que el monitoreo frecuente mediante el refractómetro es necesario. La temperatura en la emulsión según el fabricante recomienda mantenerla entre 35 y 45 ºC, sin embargo según las pruebas experimentales se tiene buenos resultados con temperaturas menores a los 40ºC.

Mejorar es sistema de enfriamiento para la emulsión de Lubricool. El estudio de la eficiencia del intercambiador de calor proporcionará los datos para evaluar la posibilidad de adquirir un nuevo intercambiador de mayor capacidad ó es posible que el intercambiador sí este en capacidad de mantener la emulsión de Lubricool entre 35 y 45ºC y que por falta de limpieza el equipo no operando normalmente.

Implementación de una cámara de limpieza. El o los rociadores de vapor pueden ser montados en la cámara de ventilación que posee la máquina previo al recocido.

Controlar los parámetros de la emulsión de Q. A. 4H para mantener la calidad. Se debe controlar el agua de proceso y monitorear las concentraciones de aceite, que en este caso el fabricante recomienda al 2%. La temperatura de la emulsión debe mantenerse entre 35 y 45ºC.

Mejorar es sistema de enfriamiento para la emulsión de Lubricool. Es necesario realizar un estudio de eficiencia del intercambiador de calor de la emulsión.

MONTO TOTAL DE ADECUACIONES.

Los gastos considerados como una inversión para la readecuación de los equipos, se los muestra en la siguiente tabla, cuya vida útil para estas reposiciones es de 7 años, llegando a un monto total de 6315 USD.

TABLA 7.
Costos de inversión en equipos

Adecuación	Vida útil (años)	Costo (USD)
Costos por reposición de resinas en ablandadores de agua de proceso	7	3420
Costo de ablandador para agua de enfriamiento	7	2895
TOTAL		**6315**

El costo total anual para mejoras en el sistema de trefilación de alambre de cobre, cuyas actividades que representan estos gastos deberán ser efectuadas anualmente ascienden a 6324.08 USD.

TABLA 8.
Costos anuales para mejoras

Adecuación	Frecuencia de inversión	Costo (USD)
Costos por readecuación de intercambiadores de calor y sistema de enfriamiento	Anual	1490
Adecuación de pozo	Anual	450
Costos para control de aguas de proceso	Anual	3588
Costos para control de emulsiones	Anual	706.08
TOTAL		**6234.08**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Del estudio experimental realizado, el mejoramiento de la calidad del sistema de producción de alambres de cobre es posible implantando un nuevo esquema de producción en planta, y que se define con las siguientes conclusiones:

El retiro del aceite residual del alambre antes de pasar por la etapa de recocido, aseguran un producto final libre de manchas, por lo que la adecuación de una etapa de lavado es necesaria.

La aplicación de métodos experimentales de laboratorio como la laminación de cobre para simular el proceso de trefilación permitió reproducir de manera exitosa la no conformidad en el aspecto superficial del alambre y determinar las condiciones adecuadas de trabajo.

De acuerdo a las pruebas realizadas al trabajar con temperaturas menores a 40ºC en la emulsión elaborada con concentraciones entre el 10 y 12% de Lubricool y con agua ablandada, mejora las condiciones de operación de trefilación y la calidad final de un producto.

Para retomar las condiciones normales de operación del sistema hay que restablecer los ablandadores, monto que asciende aproximadamente al 50 % de la inversión inicial. La inversión restante corresponde al control de fluidos y mantenimientos de equipos.

RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones del presente trabajo, sumado a los conceptos de “La mejora continua” que establecen las normas ISO 9001 se dan las siguientes recomendaciones.

Incorporar sistemas de monitoreo en cada etapa del proceso que permitan tener datos en tiempo real de las temperaturas de las emulsiones, del sistema de enfriamiento y las condiciones del vapor.

Definir indicadores para los parámetros del sistema y automatizar completamente el proceso de trefilación del alambre de cobre.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cuevas Streeter Alejandro; “Procesos de manufactura”, Control # 2; Universidad de Chile, 2008.
2. http://www.avestapolarit.com/files/Outokumpu_ES.pdf
3. http://www.monografias.com/trabajos6/sipro/sipro.shtml#intro
4. http://www.textoscientificos.com/quimica/dureza-ablandamiento-agua
5. http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm
6. Incropera Frank P., De Witt David P.; Fundamentos de Transferencia de calor, PRENTICE HALL HIPANOAMERICANA, S. A., 4ª edición, Mexico 1999.
7. MIKELL P. GROOVER; “FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA”; PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A., 1997.
8. Philip Siegmann; “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO INDUSTRIAL PARA LA DETECCIÓN EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE DEFECTOS EN SUPERFICIE DE HILOS METÁLICOS FINOS”; MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR de la Universidad Complutense de Madrid, 2002.